



HAL
open science

Morphodynamique de réseaux viaires - Application au risque

Michel Nabaa

► **To cite this version:**

Michel Nabaa. Morphodynamique de réseaux viaires - Application au risque. Informatique [cs].
Université du Havre, 2011. Français. NNT: . tel-00623691

HAL Id: tel-00623691

<https://theses.hal.science/tel-00623691v1>

Submitted on 14 Sep 2011

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.

UNIVERSITÉ DU HAVRE

UFR Sciences et techniques

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur en Sciences

de l'Université du Havre

Discipline : INFORMATIQUE

Présentée par

Michel NABAA

Le 12 avril 2011

Morphodynamique de réseaux viaires Application au risque

Jury :

Rapporteurs :	Pr. Denise PUMAIN	Géographie-cités (Université Paris I)
	Pr. François BOURDON	Greyc (Université de Caen)
Examineurs :	Pr. Jean-Pierre MÜLLER	CIRAD (Montpellier)
	Pr. Guy MELANÇON	INRIA (Bordeaux I)
	Dr. Antoine DUTOT	LITIS (Université du Havre)
Directeur :	Pr. Cyrille BERTELLE	LITIS (Université du Havre)
Co-directeur :	Pr. Damien OLIVIER	LITIS (Université du Havre)
Tuteur d'entreprise :	Dr. Patrick LIONS	DIRM (CODAH)
Invité :	Pascal MALLET	DIRM (CODAH)

REMERCIEMENTS

En préambule à ce manuscrit, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui de près ou de loin, m'ont apporté leur aide et ont contribué à l'élaboration de ce manuscrit ainsi qu'à la réussite de cette thèse.

Je tiens à remercier sincèrement mon encadrant Damien Olivier de m'avoir permis de travailler avec lui. Tout au long de mes années de thèse, j'allais voir Damien pour une question et je sortais avec plein d'autres :) Merci Damien de ta disponibilité, ta générosité et tes conseils qui m'ont permis de bien mener ce travail.

Je remercie également mon directeur de thèse Cyrille Bertelle de m'avoir donné confiance depuis mon master jusqu'à la fin de la thèse. Merci pour tout ce que tu fais pour l'équipe *RI2C* et pour le laboratoire et pour tous tes mails entre 03h00 et 05h00 du matin.

Je remercie M. Patrick Lions, mon tuteur industriel de m'avoir accueilli au sein de la Communauté De l'Agglomération Havraise et d'avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour réussir cette thèse.

Ma gratitude pour mon super co-tuteur industriel Pascal Mallet pour le temps précieux qu'il m'a accordé et ses remarques très encourageantes. Pascal, c'était un vrai bonheur de travailler et d'échanger avec toi sur différentes problématiques touchant à l'informatique, au risque, à la géographie ...

Merci à Denise Pumain et à François Bourdon d'avoir accepté de rapporter sur cette thèse et de leurs remarques m'ayant permis d'enrichir ce manuscrit. Merci à Guy Melançon, Jean-Pierre Müller, Antoine Dutot, Patrick Lions et Pascal Mallet pour avoir accepté de participer au jury.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du laboratoire LITIS et particulièrement aux membres de l'équipe *RI2C*. Je remercie particulièrement Antoine Dutot d'avoir participé efficacement à l'encadrement. Merci Antoine de ta disponibilité et de ta générosité. Un geste de gratitude pour Véronique Jay qui a lu, relu, corrigé et re-corrigé ce manuscrit. Je ne manque surtout pas de remercier Frédéric Guinand pour sa gentillesse, ces remarques très pertinentes et très pointues qui m'ont permis de bien présenter mon travail.

Merci à mes super collègues et à la team *Urban Terror*, sans qui je n'aurais pas pu finir sereinement ce travail. Merci à Virus, Kekette, Kamikaze, Butcher, Razi3l, Ciao16coups,

Mobutu, Astra, Mao, Djamilator et Ichitaka pour la très bonne ambiance aussi bien au laboratoire qu'ailleurs. Je remercie aussi les collègues de la CODAH pour leur gentillesse, leur disponibilité et leur humour m'ayant toujours garanti une bonne productivité. Merci à Corinne, Sylvain, Franzo, Ismahène, Margaux, Ludovic, Enora, Ludivine, Marie-André et Virginie. Je remercie sincèrement Ismérie de sa sincérité, sa disponibilité, ses conseils et d'avoir aussi décortiqué mon manuscrit. Je tiens aussi à remercier mes amis havrais et libanais qui ont sans doute contribué par leurs encouragements à la réussite de ce travail.

Enfin, je termine par les meilleurs, ceux qui m'ont toujours donné sans attendre de retour. **Si**, le retour pour eux était simplement ma réussite. Je remercie mes parents, Elham et Chéhab et mes deux frères Diaa et Oussama de leur confiance, de leur soutien, de leurs encouragements ...

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	i
Table des figures	iii
Acronymes	1
I Problématique et environnement	7
1 Problématique	11
1.1 Contexte général	11
1.2 Le territoire de l'agglomération havraise face au risque	16
1.3 Objectif du travail	20
2 Du risque à la gestion de crise	25
2.1 Du risque au risque majeur	26
2.2 Crise et gestion de crise	29
2.3 Retour d'expériences sur des événements	29
3 Outils de gestion du territoire	51
3.1 Le bassin multi risques de l'estuaire de la Seine	52
3.2 Système d'Information Géographique	56
3.3 Un ensemble cohérent d'outils : SIBARIMAS	59
3.4 Vue globale des outils de la CODAH	67
II Complexe cité	71
4 Territoire, ville et risque, une affaire complexe	75
4.1 Du système aux systèmes complexes	77
4.2 Complexe cité et modélisation	83
4.3 Territoire et risque des liaisons dangereuses	84

4.4	Le réseau viaire : un système complexe	90
4.5	Vision systémique complexe du risque	91
5	Risque et réseaux	95
5.1	Vulnérabilité et dimension spatiale	99
5.2	Réseau routier	101
5.3	Recherche d'organisations dans un graphe	103
5.4	Modèle	107
5.5	Vulnérabilité et morphodynamique	110
III	Prévention et évacuation	113
6	Données relatives à la population exposée aux risques	117
6.1	Vision statique : modèle PRET-RESSE	118
6.2	Vision dynamique : Enquête Ménage Déplacements	121
7	Modèle de prévention de risque	133
7.1	Détection de communautés	134
7.2	Établissement de cartes de vulnérabilité	141
7.3	Estimer la vulnérabilité liée à la structure du réseau	143
8	Simulation du trafic routier	159
8.1	Microsimulation du trafic	164
8.2	Validation du modèle	182
9	Modèle de Micro-évacuation	185
9.1	Travaux antérieurs sur la micro-évacuation	186
9.2	Influence de la structure du réseau sur les flux	187
9.3	Modèle d'évacuation	198
9.4	Résultats de simulation	205
9.5	Récapitulatif	219
10	Conclusion	221
	Bibliographie	225

TABLE DES FIGURES

0.1	Schéma de présentation du manuscrit.	3
0.2	Architecture globale du modèle.	4
1.1	Procédure de prévention et du contrôle de risque par les établissements. . .	12
1.2	Inondation en Chine (juin 2010) : travaux de réparation de digues ¹	13
1.3	Carte des 17 communes de la COmmunauté De l'Agglomération Havraise (CODAH).	17
1.4	Événements dangereux sur le territoire de la CODAH.	18
1.5	Exemple d'un accident sur une route du réseau.	22
1.6	Exemple d'un accident sur une arête d'un graphe non orienté liant deux communautés.	23
2.1	Croisement d'aléas et d'enjeux vulnérables.	27
2.2	Courbe de Farmer sur la gravité / probabilité d'occurrence. Plus de détails se trouvent dans [67].	28
2.3	Inondation au sud-ouest des Pays-Bas en 1953 ²	32
2.4	Carte du bilan du tsunami de l'océan indien le 26/12/2004 ³	34
2.5	Pyramide des besoins de Maslow ⁴	36
2.6	Évolution des dispositifs de gestion de la sécurité (adapté dans la thèse de Gambon [33]).	38
2.7	L'accident ferroviaire de Mississauga-Toronto le 10 novembre 1979.	42
2.8	Catastrophe de Tchernobyl en 1986 ⁵	45
3.1	Approche géocindynique disponible dans [20]. Développement d'une politique déclinée en 6 volets interdépendants constituant les missions des collectivités locales en matière de risques majeurs.	52
3.2	Carte multi aléas de l'estuaire de la Seine.	53
3.3	Carte multi enjeux de l'estuaire de la Seine.	55
3.4	Carte multi risques de l'estuaire de la Seine.	57
3.5	Architecture de SIBARIMAS.	59
3.6	Propagation d'un nuage toxique avec 3 niveaux de danger dans l'estuaire de la Seine (modélisation SAFER).	61

TABLE DES FIGURES

3.7	Le signal national d'alerte ⁶	63
3.8	Un exemple de couverture sonore réalisée grâce au logiciel SIRENE dans la zone industrielle et portuaire du Havre.	64
3.9	Copie d'écran de l'outil hydro-météo de la CODAH sur l'arrondissement du Havre.	65
3.10	Vue d'ensemble des outils de modélisation de la CODAH par type d'utilisation.	68
4.1	Interaction et auto-organisation au sein d'une colonie de bactéries. Photographies de boîte de Pétri sur lesquelles on constate que les colonies de l'ordre d'une dizaine de milliards d'individus se structurent en réponse à une stimulation externe. Ces images proviennent du laboratoire de Pr. Eshel Ben-Jacob, de l'université de Tel Aviv.	76
4.2	La complexité vue du ciel.	78
4.3	Zoom sur 4.2b se focalisant sur la pelouse fourmilière. Les points noirs sont des individus que l'on voit dans le stade et sur les accès du stade formant des chemins comme ceux observés dans le fourragement chez les fourmis. Les interactions se font à la fois au travers de l'environnement par les traces au sol et par un mécanisme "panurgien". Mise en perspective avec l'analogie animale. Iran - Pelouse fourmilière -34°21'46.44"N 58°40'8.34"E - 11/09/2010.	79
4.4	Nouvelle Orléans (USA) : un territoire soumis à une catastrophe (cyclone Katrina 28/08/2005) et sa résilience. Quartier de Lower Ninth Ward 29°58'16.06"N 90° 1'12.27"W.	80
4.5	Vue schématique d'un système.	81
4.6	Le territoire : un anthropo-système.	86
4.7	Résilience d'ingénierie <i>vs</i> résilience écologique.	87
4.8	Dynamique de l'auto-organisation.	90
4.9	Le risque résulte du croisement d'un aléa et d'enjeux vulnérables.	92
4.10	Modèle du processus de danger selon la méthode Méthode Organisée Systémique d'Analyse des Risques (MOSAR) [141] : analyse de dysfonctionnement d'un système.	93
5.1	Photographies de villes à structure régulière.	97
5.2	La ville de Carcassone , située dans la région Languedoc-Roussillon à 80km de Toulouse (extrait de <i>Google Earth</i>).	98
5.3	Liens entre endommagement matériel et fonctionnel.	100
5.4	Influence de la perte d'un arc sur un graphe représentant un réseau routier en forme de grille de 7 * 7 sommets.	102
5.5	Influence de la perte d'un arc sur un graphe représentant un réseau routier de même taille que la celui de la figure 5.4.	103
5.6	La ville de Königsberg (aujourd'hui Kaliningrad) est construite autour de deux îles ⁷	105

5.7	Multigraphe correspondant au centre ville du Havre. Non orienté pour des raisons de représentation.	106
5.8	Exemple d'impact d'ajout d'un rond-point sur la circulation.	112
6.1	Allocation spatiale de la population dans l'agglomération à l'échelle de l'ilot Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) (copie d'écran Système d'Information Géographique du bassin de RISques MAjeurs de l'estuaire de la Seine (SIGRIMAS)).	119
6.2	La distribution diurne et nocturne de la population développée dans [20]. . .	121
6.3	Scénario de population exposée à un nuage toxique.	122
6.4	En haut, division de l'aire d'études en 31 secteurs. En bas, division du 1er secteur (coloré en mauve) en 5 zones.	125
6.5	Schéma UML correspondant à l'enquête ménage de la CODAH.	126
6.6	Extraction du multigraphe et planification des trajets des véhicules.	127
6.7	Courbe d'évolution du trafic global (l'ensemble du territoire) sur 24 heures selon l'enquête ménage dans l'agglomération havraise en 2007.	128
6.8	Utilisation des routes (du très fluide en bleu clair jusqu'au plus emprunté en rouge) dans l'agglomération havraise - Enquête Ménage Déplacements (EMD) 2007.	130
7.1	Exemple de détection de communautés dans un graphe.	136
7.2	Exemple de détection de communautés dans un multigraphe non orienté. . .	138
7.3	Dendrogramme correspondant aux communautés de la figure 7.2.	139
7.4	Exemple de carte de vulnérabilité appliquée à la ville américaine Georgetown en Caroline du Sud [43]. Prise en compte de l'aspect biophysique et social pour le calcul d'un score de vulnérabilité global.	142
7.5	Clustering hiérarchique sur le multigraphe de l'estuaire de la Seine.	144
7.6	Courbe d'évolution de la modularité en fonction des communautés obtenues sur le multigraphe de l'estuaire.	147
7.7	Clustering hiérarchique sur le multigraphe de la ville de Rouen.	148
7.8	Scénario de choix de routes pour évacuer une communauté C1 du multigraphe vers une communauté adjacente C2.	150
7.9	Liens faibles dans une zone exposée à un nuage toxique dans l'estuaire de la Seine.	151
7.10	Marche aléatoire sur le multigraphe de l'agglomération havraise après 4000 itérations : du non emprunté (en bleu) jusqu'au congestionné (en rouge). . .	154
7.11	La figure 7.10 avec des labels sur les zones « importantes ».	155
7.12	La marche aléatoire après 4000 itérations sans l' A13, l' A29 ni l'entrée principale du Havre.	156
7.13	La marche aléatoire après 4000 itérations sans l'entrée principale du Havre. .	157
8.1	Diagramme fondamental.	161

TABLE DES FIGURES

8.2	Vitesse moyenne pour 15 000 véhicules pendant 5000 secondes sur le réseau de l'estuaire de la Seine.	168
8.3	Vitesse moyenne pour 45 000 véhicules pendant 5000 itérations sur le réseau de l'estuaire de la Seine.	169
8.4	Vitesse moyenne pour 45 000 véhicules pendant 5000 itérations sur le réseau de l'estuaire de la Seine si la vitesse limite de tous les tronçons de routes = $14m/s$	170
8.5	Vitesse moyenne pour 100 000 véhicules pendant 5000 itérations sur le réseau de l'estuaire de la Seine.	171
8.6	Vitesse moyenne pour 100 000 de la figure 8.5 entre l'itération 3000 et 4000. . .	172
8.7	Nombre de véhicules circulant au Havre et à l'extérieur à chaque instant. . .	172
8.8	Vitesse moyenne pour 200 000 véhicules pendant 5000 itérations sur le réseau de l'estuaire de la Seine.	173
8.9	Comparaison des vitesses moyennes selon le nombre de véhicules sur l'estuaire de la Seine pendant 5000 itérations.	174
8.10	Comparaison des vitesses moyennes selon le nombre de véhicules sur l'estuaire de la Seine à l'instant $t = 4000$	174
8.11	Nombre d'arcs ayant une densité comprise dans l'un des 5 intervalles fixés. .	175
8.12	Nombre d'arcs ayant une densité comprise dans l'un des 5 intervalles fixés. .	176
8.13	Nombre d'arcs ayant une densité comprise dans l'un des 5 intervalles fixés. .	177
8.14	Nombre d'arcs ayant une densité comprise dans l'un des 5 intervalles fixés. .	177
8.15	Nombre d'arcs du Havre ayant une densité comprise dans l'un des 5 intervalles fixés.	178
8.16	Distribution des sommets selon leur degré des multigraphes du Havre, du périphérique et de l'estuaire de la Seine.	179
8.17	Degré de chaque sommet du réseau routier de l'estuaire de la Seine. Système de coordonnées : lambert 2 étendu.	179
8.18	Flux moyen par degré de sommet selon le nombre de véhicules sur le multigraphe de l'estuaire de la Seine.	180
8.19	Flux moyen par sommet pour 100 000 véhicules circulant sur le multigraphe de l'estuaire de la Seine. Système de coordonnées : lambert 2 étendu.	181
8.20	Flux moyen par sommet pour 100 000 véhicules circulant sur le multigraphe de l'estuaire de la Seine. Système de coordonnées : lambert 2 étendu.	181
8.21	Diagramme espace-temps.	182
8.22	Diagramme fondamental.	183
9.1	Graphe transitif.	188
9.2	Exemple de coefficient de clustering local sur un graphe non orienté pour le sommet en bleu foncé.	189
9.3	Exemple d'un graphe dont nous cherchons à calculer le coefficient de clustering.	190

9.4	Coefficient de clustering moyen par degré de sommet de l'exemple présenté dans la figure 9.3.	190
9.5	Exemple de l'influence locale d'un accident.	191
9.6	Vulnérabilité des arcs à un niveau local en fonction d'une taille de détour donnée (ici $k = 4$).	192
9.7	Coefficient de clustering moyen par degré de sommet sur le centre-ville du Havre et sur l'ensemble de l'estuaire de la Seine.	193
9.8	Application de l'algorithme de centralité d'intermédiarité sur le multigraphe de l'estuaire de la Seine. L'échelle de passage d'une couleur à une autre est géométrique.	195
9.9	Application de l'algorithme de centralité d'intermédiarité sur le multigraphe de l'estuaire de la Seine après avoir supprimé l'entrée principale nommée la Brecque. L'échelle de passage d'une couleur à une autre est géométrique. . .	196
9.10	Zoom sur la Brecque et son entourage de la figure 9.8 avant sa suppression. .	197
9.11	Zoom sur la Brecque et son entourage de la figure 9.9 après sa suppression. Les parties en bas et en haut de La Brecque mises en évidence sont plus marquées que dans la figure 9.10. Les plus courts chemins passent d'un côté et de l'autre de la Brecque après sa suppression.	197
9.12	Exemple d'application de l'algorithme de blocage d'une zone de danger appartenant au multigraphe de l'estuaire de la Seine.	201
9.13	Détection des impasses de taille (en nombre de sommets) ≤ 30	204
9.14	Évacuation d'une communauté appartenant au centre et ayant 15 liens vers l'extérieur. 45000 véhicules circulent dans tout le graphe. Les liens intercommunautaires sont colorés en rouge. La somme des capacités des liens sortants est de 450 véhicules. La communauté à évacuer est agrandie; les liens en rouges correspondent à ses entrées et sorties.	207
9.15	Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.14 pour le cas de 45000 véhicules dont 695 se trouvent dans la communauté, le cas de 60000 véhicules dont 925 dans la communauté.	208
9.16	Évacuation en cours d'une communauté ayant une interface avec la mer et 2 liens vers l'extérieur. La somme des capacités des liens sortants est de 9 véhicules. 45000 véhicules circulent dans tout le graphe. Les liens intercommunautaires sont colorés en rouge. La communauté à évacuer est agrandie; les liens en rouges correspondent à ses entrées et sorties.	209
9.17	Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.16 pour le cas de 45000 véhicules dont 696 se trouvent dans la communauté, le cas de 60000 véhicules dont 922 et le cas de 100000 dont 1545 dans la communauté.	209

TABLE DES FIGURES

9.18	Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.16 entre le cas de liens inter-communautaires d'une capacité totale de 9 et de 180 véhicules. 45 000 véhicules circulent dans le graphe dont 695 se trouvent dans la communauté.	210
9.19	Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.14 entre le cas de liens inter-communautaires d'une capacité totale de 450 et de 900 véhicules. 45 000 véhicules circulent dans le graphe dont 3000 se trouvent dans la communauté.	210
9.20	Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.16 entre le cas où 695 véhicules se trouvent dans la communauté mais aucun véhicule ne se trouve dans le reste du graphe et le cas de 45 000 véhicules circulant dans le graphe.	211
9.21	Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.14 entre le cas où 3000 véhicules se trouvent dans la communauté mais aucun véhicule ne se trouve dans le reste du graphe et le cas de 45 000 véhicules circulant dans le graphe.	212
9.22	Évacuation en cours d'une communauté ayant une interface avec la mer et 6 liens vers l'extérieur. La somme des capacités des liens sortants est de 316 véhicules. 45 000 véhicules circulent dans tout le graphe.	213
9.23	Évacuation en cours d'une communauté ayant une interface avec la mer et 6 liens vers l'extérieur. La somme des capacités des liens sortants est de 316 véhicules. 45 000 véhicules circulent dans tout le multigraphe. Le lien inter-communautaire au nord de la communauté (au milieu) est bloqué. Les liens inter-communautaires sont colorés en rouge.	214
9.24	Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.23 avant et après le blocage de la sortie nord. 45 000 véhicules circulent dans le multigraphe. Les liens inter-communautaires sont colorés en rouge.	215
9.25	Évacuation en cours d'une communauté de situant au nord-ouest du territoire et ayant 8 liens vers l'extérieur. La somme des capacités des liens sortants est de 212 véhicules. 45 000 véhicules circulent dans tout le multigraphe. Les liens inter-communautaires sont colorés en rouge. La communauté à évacuer est agrandie ; les liens en rouges correspondent à ses entrées et sorties.	217
9.26	Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.25 après blocage de la sortie 0 pour le premier test et la sortie 1 pour le second. 45 000 véhicules circulent dans le multigraphe.	218
9.27	Comparaison du temps d'évacuation des quatre communautés précédemment exposées (figures 9.14, 9.16, 9.22 et 9.25). 45 000 véhicules circulent dans le multigraphe.	218

ACRONYMES

- ANR** Agence Nationale de la Recherche
- ANRT** Association Nationale de la Recherche et de la Technologie
- ARIA** Analyse, Recherche et Information sur les Accidents
- BIGRIMAS** Base de données Géographiques du bassin de Risques MAjeurs de l'estuaire de la Seine
- BLEVE** Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion
- CCSRC** Communauté de Communes de Saint Romain de Colbosc
- CERTU** Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques
- CHCI** Centre Havrais de Commerce International
- CHCI** Centre Havrais de Commerce International
- CIFRE** Convention Industrielle de Formation par la REcherche
- CIGNALE** Centre Intégré de Gestion d'Alerte de l'Estuaire
- CNH** Club Nautique Havrais
- CODAH** COmmunauté De l'Agglomération Havraise
- CRED** Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
- DCCNa** Dichloro-s-triazinetrione de sodium
- DIRECCTE** Direction Régionale des Entreprises, de la Concurrence, de la Consommation, du Travail et de l'Emploi
- DIREN** Direction Régionale de l'ENvironnement
- DIRM** Direction pour l'Information sur les Risques Majeurs
- DOCRIMAS** DOcumentation du système d'information géographique du bassin de Risques MAjeurs de l'estuaire de la Seine
- DRE** Direction Générale de l'Environnement
- DREAL** Direction Régionale de l'Environnement, l'Aménagement et du Logement
- DRIRE** Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Information

EMD Enquête Ménage Déplacements
ENS Événements Non Souhaités
ERP Entreprises Recevant du Public
ESRI Environmental Systems Research Institute
FEMA Federal Emergency Management Agency
FIFO First In First Out
GPL Gaz de Pétrole Liquéfié
HRO High Reliability Organization
INGEOMINAS Instituto Colombiano de Geología y Minería
INSEE Institut National de la Statistique et des Études Économiques
IUPAC International Union of Pure and Applied Chemistry
LITIS Laboratoire d'Informatique, de Traitement de l'Information et des Systèmes
LWR Lighthill Whithman et Richards
MADS Méthode d'Analyse des Dysfonctionnements des Systèmes
MIC Methyl-IsoCyanate
MODELRIMAS les outils de MODELisation du bassin de Risques MAjeurs de l'estuaire de la Seine
MOSAR Méthode Organisée Systémique d'Analyse des Risques
NRO Normally Reliable Organization
OFDA Office of U.S. Foreign Disaster Assistance
OGC Open Geospatial Consortium
ONU Organisation des Nations Unies
ORMES Office des Risques Majeurs de l'Estuaire de la Seine
PCS Plan Communal de Sauvegarde
PCUZI Plan de Communication d'Urgence sur la Zone Industrielle
PDLT Population Diurne au Lieu de Travail
PDR Population Diurne Résidentielle
PMA Plan de Mise à l'Abri
POI Plan d'Opération Interne
PPI Plan Particulier d'Intervention
PPMS Plan Particulier de Mise en Sécurité
PRET-RESSE Population Réaliste dans l'Espace et le Temps sur le bassin de Risques majeurs de l'Estuaire de SEine

PRET Population Réaliste dans l'Espace et le Temps

PRT Population Résidentielle Totale

PTD Population Totale Diurne

PTN Population Totale Nocturne

RDS Radio Data System

RI2C Réseaux d'Interactions et Intelligence Collective

SECAV Société d'Études et de Contrôle en Acoustique et Vibration

SGBD Système de Gestion de Base de Données

SIBARIMAS Système d'Information du Bassin de Risques MAjeurs de l'estuaire de la Seine

SIG Système d'Information Géographique

SIGRIMAS Système d'Information Géographique du bassin de Risques MAjeurs de l'estuaire de la Seine

SIGU Système d'Information Géographique Urbain de la ville du Havre

SIRENE Système Informatique pour le Répertoire des Entreprises et de leurs Établissements

SNPE Société Nationale des Poudres et Explosifs

SRU Solidarité et Renouveau Urbains

TAR Tours Aéro-Réfrigérantes

TARANIS Technologie pour l'Apprentissage des Risques Majeurs pour l'Animation et la Simulation

TCDD 2,3,7,8-TétraChloroDibenzo-p-Dioxine

TMD Transport de Matières Dangereuses

UML Unified Modeling Language

Résumé

Le travail présenté dans cette thèse a pour cadre la prévention des risques et la gestion de crises nécessitant une évacuation. La structure du réseau viaire est étudiée mais également les processus de mobilité qui s'y développent. Nous utilisons en particulier des techniques d'intelligence en essaim pour étudier la morphodynamique du réseau. La prévention des risques est considérée en analysant la vulnérabilité du réseau représenté par un multigraphe. Sa structure est étudiée à différents niveaux d'échelle, par des méthodes de calcul de la centralité d'intermédiarité et de clustering hiérarchique. La gestion de crise lors d'une évacuation a aussi été traitée et a conduit à l'étude de la dynamique des déplacements au sein du réseau routier et à un traitement et une analyse multi-échelle. Nous avons développé un modèle microscopique de trafic ainsi qu'un modèle de micro-évacuation permettant d'organiser une évacuation depuis l'occurrence de la crise jusqu'à l'évacuation des véhicules en passant par la délimitation d'éventuelles zones en danger et par les stratégies de choix d'itinéraires afin de les évacuer. Le modèle est adaptatif, il prend en compte la structure du multigraphe, la vulnérabilité des éléments à différents niveaux d'échelle, les événements inattendus lors d'une évacuation et permet d'amener des éléments de réponse aux décideurs gérant le risque.

Mots Clés : réseau d'interaction, graphe, communautés, microsimulation, prévention, évacuation, trafic routier, risque, aléa, vulnérabilité, système complexe, morphodynamique.

Summary

In this thesis, we deal with risk prevention and crisis management requiring evacuation. Road network structure and mobility process are studied by using swarm intelligence methods. Risk prevention is treated by analyzing the vulnerability of the network represented by a multigraph, at different scale levels thanks to betweenness centrality and hierarchical clustering methods. Crisis management during an evacuation is also treated. A microscopic traffic model is developed and a micro-evacuation simulator is proposed to organize an evacuation, beginning from crisis occurrence until vehicles evacuation, taking into account dangerous areas enclosing and itineraries choice strategies to evacuate those areas. Our model is adaptive, it takes into consideration multigraph structure and its elements vulnerability at different scale levels, and unexpected events during an evacuation.

Finally, the developed tool helps decision makers managing risks.

KeyWords : interaction network, graph, communities, microsimulation, prevention, evacuation, road traffic, risk, hazard, vulnerability, complex system, morphodynamics.

PRÉFACE

L'estuaire de la Seine est un bassin multi-risques technologiques et naturels. C'est un territoire complexe abritant 300 000 habitants rattachés à trois départements et deux régions et comportant plus de trente communes. Le risque y est très présent et présente des caractéristiques aussi bien chroniques qu'accidentelles. Les acteurs institutionnels se sont engagés dans une politique de maîtrise de ces risques en tentant de mieux les connaître et les mesurer afin de pouvoir développer les moyens nécessaires de prévention et de gestion de crise. Cette démarche est accompagnée d'une veille scientifique et de travaux de recherche aussi bien sur les aspects sociaux et humains que sur ceux de la théorie de l'information ou encore concernant les phénomènes physico-chimiques. notre travail s'inscrit dans ces perspectives. Il est le fruit d'une thèse bénéficiant d'une Convention Industrielle de Formation par la REcherche (CIFRE) entre la CODAH⁸, l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) et l'Université du Havre. Ce travail est pluridisciplinaire ; il se situe au carrefour de différents domaines relevant de la science de l'informatique, de la géographie, et de la cyndinique⁹. Ainsi, nous tentons d'apporter des réponses liées au problème de l'évacuation de la population dans le cadre d'une gestion de crise majeure. Cette thèse s'inscrit en science des systèmes complexes et se positionne orthogonalement aux domaines précédemment cités. Elle cherche à proposer une contribution autour des réseaux offrant une appréhension commune¹⁰ du territoire et du risque au travers d'une convergence transdisciplinaire. L'objet est la protection de la population et plus précisément l'étude des flux de cette même population dans son environnement. Les flux sont générés par les différents déplacements et l'environnement considéré est le réseau viaire. Ces flux modifient l'état du réseau qui lui-même les conditionne. Un des éléments recherchés est l'émergence de structure, de forme et d'auto-organisation. L'objectif principal est de fournir, par des

8. La CODAH a été fondée en janvier 2001 et a pour objectif d'associer 17 communes, dont Le Havre, en vue d'élaborer et de conduire ensemble un projet commun de développement et d'aménagement du territoire, ainsi que d'assurer la gestion des services et des équipements : <http://www.agglo-lehavre.fr>.

9. Les cindyniques regroupent les sciences qui étudient les risques. On les appelle aussi « sciences du danger ». Elles s'intéressent plus particulièrement au risque industriel et plus spécifiquement aux risques majeurs.

10. Peut être devrions-nous dire complexe en nous appuyant sur l'étymologie : tissé ensemble.

analyses de la dynamique de la situation, des éléments d'aide à la décision permettant de planifier ce contrôle avec des informations pertinentes.

La rédaction du document commence par ressituer le problème par rapport aux attentes de la CODAH au niveau du risque avant d'exposer notre contribution qu'on peut ressituer dans le domaine des systèmes complexes, les réseaux d'interaction, les processus dynamiques et leurs contextes. Afin de faciliter la lecture du manuscrit, nous allons exposer la structure afin de mieux comprendre la méthodologie de travail, mais aussi d'orienter le lecteur vers les chapitres susceptibles de l'intéresser selon son domaine ou son centre d'intérêt. Ainsi, le schéma de la figure 0.1 présente l'organisation du manuscrit en mettant en évidence les principaux apports de chaque chapitre et les principales liaisons inter-chapitres.

L'orthogonalité revendiquée et le cadre de cette thèse nous ont conduit à déroger quelque peu au plan traditionnel. Ainsi, il nous a semblé nécessaire au préalable d'expliquer la problématique, l'environnement, le positionnement de ce travail pour la CODAH, et d'aborder les grandes catastrophes et les enseignements à en tirer, pour développer ensuite notre vision du problème dans le cadre de notre discipline et de la science des systèmes complexes ; la dernière partie s'intéresse aux problèmes de prévention des risques et de l'évacuation des populations en s'appuyant sur les deux précédentes. D'une façon générale, nous avons cherché à situer notre travail par rapport à l'existant sans en faire une partie dédiée qui nous aurait sans doute conduit à proposer des articulations artificielles ou à trop cloisonner.

Ainsi, le positionnement du travail / état de l'art par rapport à la problématique du risque est exposé dans la partie I alors que le positionnement du travail / état de l'art des recherches dans le domaine des systèmes complexes et de l'informatique est présenté dans les parties II et III. Pour mieux comprendre l'architecture du modèle permettant l'aide à la décision pour la prévention des risques et la gestion des crises liées au territoire et plus particulièrement à son réseau viaire, on pourra se reporter au schéma de la figure 0.2 montrant les liaisons entre les différents composants du modèle.

Le monde est de plus en plus exposé à des risques de différentes natures qui mettent en péril la population et l'environnement. De nombreuses catastrophes d'origine naturelle ou anthropique ont marqué l'histoire par leur impact parfois très lourd à supporter par la population. Les mesures de sécurité ne cessent d'évoluer afin de minimiser l'effet des risques et parfois d'éviter leur occurrence. Les règles de sécurité prises par les autorités changent d'un pays à un autre selon différents critères. Dans le chapitre 2, nous introduisons les concepts liés au risque avant d'exposer quelques événements catastrophiques ayant fait beaucoup de dégâts et à partir desquels les autorités, les scientifiques et la population ne cessent de tirer des leçons. Ces événements nous ont appris qu'une préparation correcte aux risques et la prise d'une « bonne décision » lors de l'occurrence d'une crise, pendant une période d'incertitude, permettent parfois d'empêcher le système de changer complètement de trajectoire. En revanche, les exemples exposés dans le chapitre 2 montrent également que des mauvaises décisions peuvent provoquer de

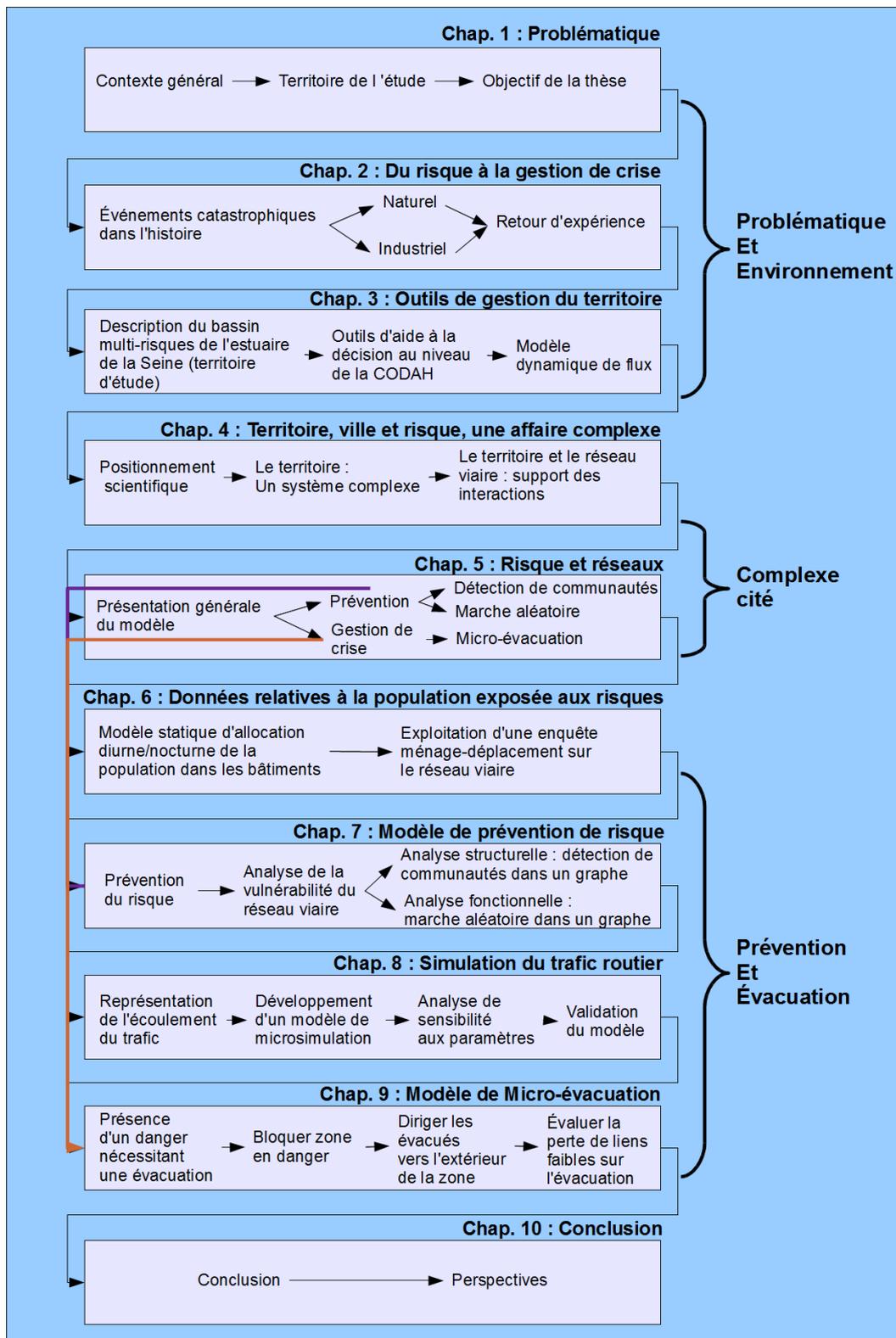


FIGURE 0.1: Schéma de présentation du manuscrit.

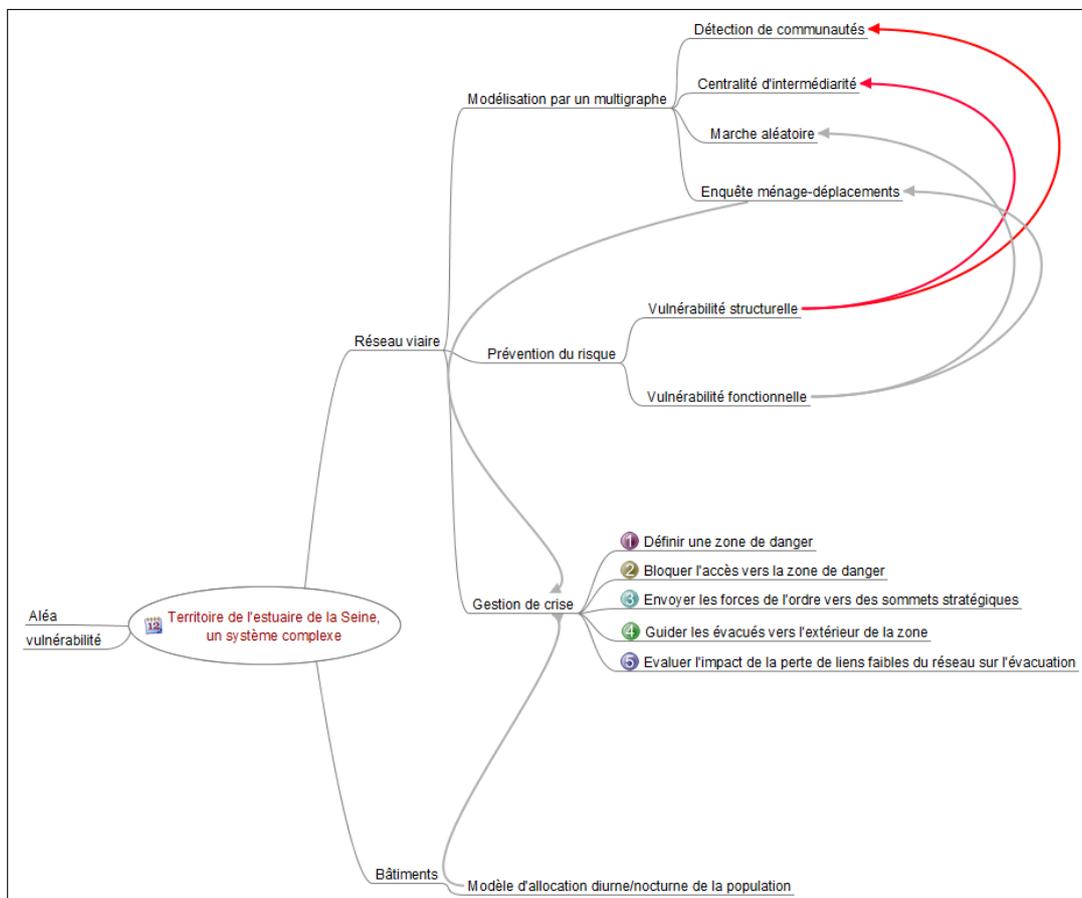


FIGURE 0.2: Architecture globale du modèle.

graves conséquences. Ce chapitre constitue la première motivation à développer un outil d'aide à la décision pour la gestion des risques.

La deuxième motivation de ce travail repose sur la volonté de la CODAH par sa Direction de l'Information sur les Risques Majeurs (CODAH) de mettre en place un outil permettant d'étudier les éléments pouvant influencer les flux de population en situation normale et de crise. Dans le chapitre 3, nous décrivons en premier lieu le territoire d'étude constituant un lieu propice au développement naturel et industriel, exposé aux différents risques. Afin d'éclairer notre propos, des cartes décrivant les aléas, les enjeux et les risques par croisement sont présentées. Nous exposons aussi dans ce chapitre les principales compétences de la Direction pour l'Information sur les Risques Majeurs (DIRM) en matière de gestion des risques et les principaux outils de modélisation à sa disposition, constituant ainsi un ensemble cohérent d'outils permettant l'aide à la décision et l'information de la population en cas de risque. Notre travail de recherche enrichit cet

ensemble d'outils complétant leur modèle statique d'allocation de la population dans les bâtiments en traçant la dynamique de la population en mouvement et en interaction sur le réseau viaire. À la fin de ce chapitre, nous proposons une vision globale de l'ensemble des outils de la CODAH.

De nombreux exemples de systèmes en physique, en biologie, en informatique ou encore en sciences humaines ont un comportement global émergeant des interactions fortes entre les entités homogènes ou hétérogènes de ces systèmes. Nous considérons donc le territoire comme un système complexe évolutif dans le temps grâce aux interactions qui lient un ensemble d'entités occupant et gérant un espace géographique. Un événement déclencheur de crise peut survenir faisant sortir le système de sa trajectoire, conduisant à se poser des questions sur la robustesse et la résilience du système pour lesquelles il faut impérativement amener des éléments de réponse. Le chapitre 4 nous permet de décrire cette vision systémique du territoire et son fonctionnement normal ou de crise, ce en quoi notre territoire d'étude, comme beaucoup d'autres territoires, peut être considéré comme un système complexe.

Dans le chapitre 5, nous posons le problème de l'influence de la structure d'un réseau sur les flux surtout lors d'un mouvement « anormal » de la population en cas de risque éventuel. Nous exposons ensuite la démarche de représentation de la structure du réseau viaire de notre territoire d'étude par un multigraphe et introduisons notre approche de calcul de vulnérabilité des arcs du multigraphe à trois niveaux d'échelle différents (micro, méso, macro) avant d'introduire le modèle de mobilité développé.

Une gestion des risques passe forcément par l'identification et la quantification, si possible, des enjeux vulnérables. La priorité parmi ces enjeux reste la population et sa localisation dans l'espace et le temps. Les individus vivant dans un territoire se trouvent principalement à chaque moment soit dans les bâtiments soit sur le réseau viaire du territoire. L'équipe DIRM de la CODAH a donc développé un outil permettant de localiser la population se trouvant dans les bâtiments (Entreprises Reçevant du Public (ERP), résidences, entreprises, ...) du territoire de la CODAH, nommé Population Réaliste dans l'Espace et le Temps sur le bassin de Risques majeurs de l'Estuaire de SEine (PRET-RESSE). Ce modèle est statique et ne tient pas compte du reste de la population qui emprunte le réseau routier. Dans le chapitre 6, nous détaillons le résultat d'exploitation d'une EMD qui nous a permis de tracer les trajets des individus à tout moment de la journée, grâce à un modèle simple de mobilité. PRET-RESSE et l'EMD sont complémentaires et doivent permettre, à tout instant, d'estimer la population exposée à un aléa, se trouvant dans les bâtiments mais aussi sur le réseau routier.

L'analyse de la vulnérabilité d'un réseau routier peut se faire en étudiant sa structure mais aussi son usage par les individus. En effet, l'usage comme la structure contraignent les flux et influencent la vulnérabilité dans un sens comme dans l'autre. Dans le chapitre 7, la vulnérabilité structurelle du réseau est étudiée grâce à un algorithme de détection de communautés (clustering hiérarchique) qu'on applique sur le multigraphe représentant le territoire d'étude. Cet algorithme détecte les arcs du multigraphe correspondant

à des liens faibles et donc vulnérables du réseau. Quant à l'usage du réseau routier, nous présentons une méthode de marche aléatoire sur le même multigraphe afin d'identifier les arcs et donc les connexions du réseau correspondant, qui sont susceptibles d'être plus empruntés que d'autres. La marche aléatoire trouve donc son intérêt dans l'analyse de l'influence de la structure du réseau sur l'usage du trafic. À la fin du chapitre 7, nous comparons le résultat de la marche aléatoire avec le résultat obtenu de l'exploitation de l'EMD exposée dans le chapitre 6.

Les modèles de trafic routier peuvent être différenciés selon leur finesse et la représentation de l'écoulement. Nous définissons ensuite notre modèle microscopique de trafic routier et nous étudions la sensibilité du modèle aux paramètres dans le chapitre 8. Le changement d'un paramètre dans un environnement complexe peut provoquer un changement plus ou moins important dans la trajectoire globale du système. Notre modèle de microsimulation est ensuite validé par l'étude du comportement individuel des véhicules mais aussi par l'étude du comportement collectif du flux de véhicules.

La microsimulation dans une situation de crise sera étudiée dans le chapitre 9. Pour un événement déclenchant un accident voire une crise, le travail est de gérer cette crise de façon à en minimiser les conséquences et les effets. Il vise à appliquer les plans de protection pré-établis et à permettre l'adaptation aux imprévus provoqués par la crise. Nous traitons particulièrement les cas nécessitant une évacuation. Pour cela, nous présentons une méthode de choix de sommets stratégiques autour d'une zone de danger afin d'envoyer les forces de l'ordre vers ces sommets pour bloquer l'accès à ces zones à partir de l'extérieur. Ensuite, nous dirigeons les évacués vers l'extérieur de la zone de danger en fixant un objectif de les faire sortir le plus rapidement possible en dehors de la zone. Afin de valider l'influence des arcs vulnérables du multigraphe, évoquée principalement dans les chapitres 5 et 7, sur le bon déroulement d'une évacuation, nous bloquons dans quelques tests l'accès à ces arcs.

Le dernier chapitre analyse globalement le modèle et ses composants pour terminer sur les perspectives à court et à long terme de ce travail de thèse.

Première partie

Problématique et environnement

Après avoir introduit notre travail de thèse et la structure du document, nous exposons dans cette partie la problématique et le contexte lié à cette problématique. Ainsi, nous posons les objectifs du travail et les principales méthodes de résolution du problème dans le chapitre 1. Ensuite, nous évoquons quelques catastrophes dans l'histoire ayant parfois nécessité des plans d'évacuation efficaces de la population légitimant ainsi notre travail avant d'exposer les principaux risques menaçant notre territoire d'étude et les principaux outils d'aide à la décision pour la gestion de ces risques dont dispose la CODAH, notre modèle les complétant.

PROBLÉMATIQUE

1.1	Contexte général	11
1.2	Le territoire de l'agglomération havraise face au risque	16
1.2.1	Coordination inter-acteurs pour assurer la sécurité	16
1.2.2	Outils de modélisation au sein de la CODAH	19
1.3	Objectif du travail	20

1.1 Contexte général

Le monde fait face à des risques de différentes natures, aussi bien naturels qu'anthropiques. La population doit affronter ces risques et l'autorité publique doit tenter de les gérer et les minimiser ; l'objectif est de protéger les individus. Tout ceci s'inscrit dans un besoin de sécurité croissant exigé de plus en plus par les populations. Le principe de précaution est érigé en loi¹ et est inscrit dans la Constitution Française, pendant que les populations exposées augmentent par un effet mécanique naturel dû à la croissance de la population et à la concentration des individus dans les zones urbaines. Les experts du domaine définissent généralement le risque comme étant le produit d'un aléa et d'une vulnérabilité : $Risque = aléa * vulnérabilité$ [50].

1. Principe selon lequel l'absence de certitudes, compte tenues des connaissances scientifiques et des techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement, à un coût économiquement acceptable.

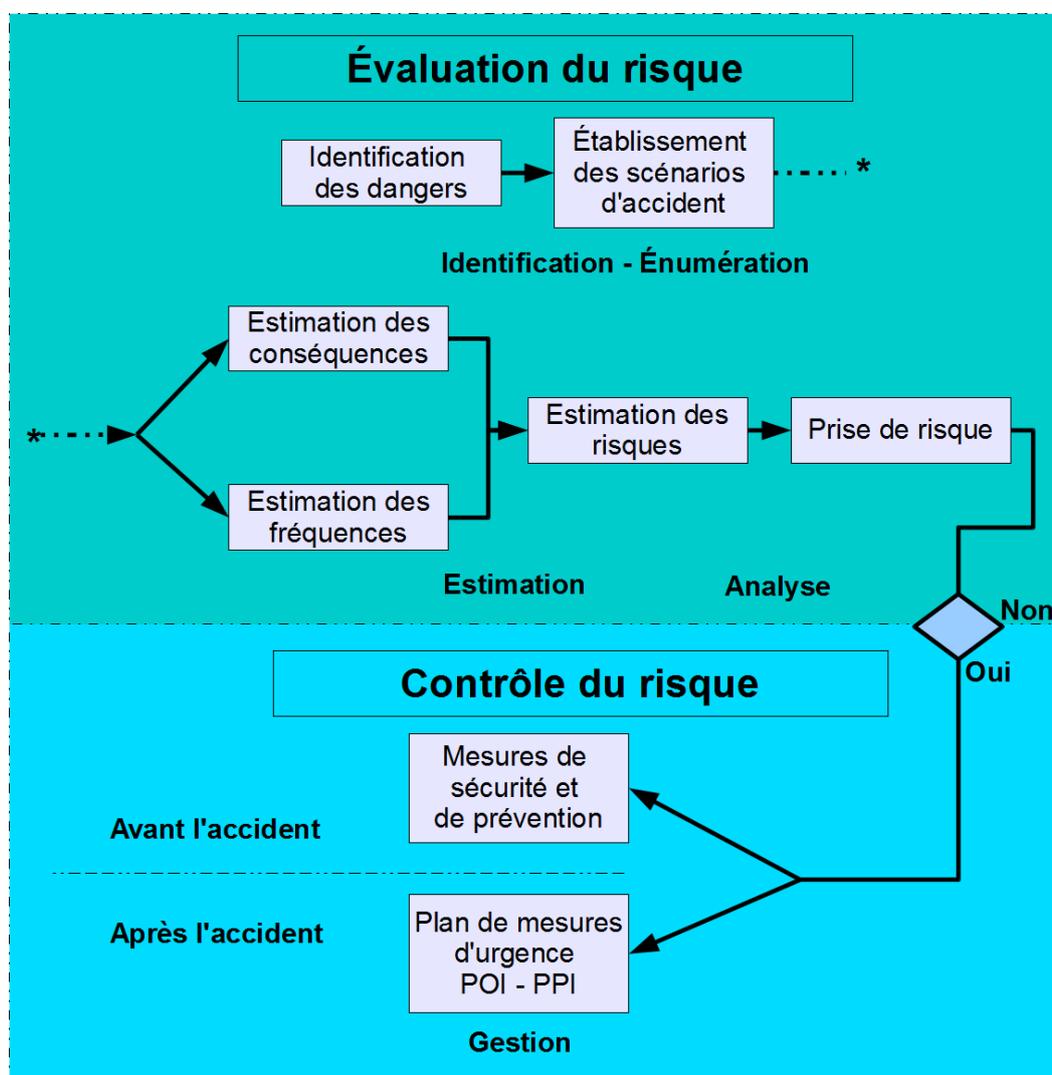


FIGURE 1.1: Procédure de prévention et du contrôle de risque par les établissements.

La réduction de l'aléa ou de la vulnérabilité sous-entend donc la diminution des conséquences du risque. L'aléa représente en fait un événement potentiellement dangereux se caractérisant par une probabilité d'occurrence et dont les effets ont une certaine gravité plus ou moins facilement quantifiable. Pendant longtemps, les experts et les autorités se sont penchés plutôt sur la réduction des aléas que sur la vulnérabilité. Cependant, la réduction de l'aléa n'est pas toujours facile à mettre en œuvre. Les établissements industriels tentent d'identifier et de mesurer le plus souvent de façon probabiliste ces aléas en s'appuyant éventuellement sur des études statistiques. En effet, les

industriels connaissent bien leurs produits dangereux et mènent des études de danger afin de réduire la probabilité et les effets d'un accident éventuel (voir figure 1.1). Dans la réglementation française [19], les établissements dont l'activité présente un risque élevé (classés Seveso² ou pas) doivent élaborer un Plan d'Opération Interne (POI) qui prend les mesures d'urgence en cas d'accident limité à l'intérieur de l'établissement. Les autorités représentées par le préfet coordonnent aussi les moyens d'intervention publique avec les industriels en mettant en œuvre un Plan Particulier d'Intervention (PPI) dès lors que l'événement a des effets à l'extérieur de l'enceinte de l'établissement. Notons pour terminer que le principe de précaution évoqué au début de ce chapitre s'accommode mal de la notion d'aléa et de sa mesure puisqu'il correspond typiquement à des événements que l'on ne peut pas probabiliser.



FIGURE 1.2: Inondation en Chine (juin 2010) : travaux de réparation de digues³.

Le risque naturel nous met face à des problèmes pour lesquels nous avons malheureusement moins de moyens de maîtrise que dans le cas du risque technologique. En

2. La directive dite Seveso ou directive 96/82/CE, édictée suite à l'accident survenu en Italie en 1976 est une directive européenne qui impose aux États membres de l'Union européenne d'identifier les sites industriels présentant des risques d'accidents majeurs. Un établissement est classé Seveso seuil bas ou haut selon les quantités de substances dangereuses et des seuils réglementaires.

3. Source de la figure : www.news.cn.

effet, il est souvent difficile de diminuer l'aléa : les dispositifs de protection collectifs comme par exemple la construction de digues et de bassins de rétention n'empêchent pas nécessairement une inondation de se produire [161] et d'avoir des conséquences graves sur la population et l'environnement, et déplacent éventuellement le problème. Les actions entreprises diminuent éventuellement la fréquence mais pas nécessairement la gravité. Ainsi, l'effondrement d'un tronçon d'une digue de la rivière « Fuhe » en Chine le 10 juin 2010 (voir figure 1.2) a nécessité l'évacuation de plus d'un million d'habitants et a fait au moins 199 morts et 123 disparus le 11 juin 2010 [127].

La vulnérabilité est un terme polysémique, néanmoins de façon générale, on peut la caractériser par les pertes occasionnées dues à l'occurrence d'un événement. Pour donner suite à notre exemple précédent, la réduction de la vulnérabilité se limite parfois à la limitation de la construction en une zone inondable ; d'où l'intérêt de mettre en place des moyens de mise en sécurité efficaces pour atténuer l'effet de la vulnérabilité sur les enjeux (humains, économiques, environnementaux, patrimoniaux) exposés à un aléa. Les mesures de sécurité diffèrent d'un pays à un autre selon les aléas auxquels on est confronté et selon un ensemble de paramètres comme les moyens dont l'État [88], les collectivités et la population peuvent disposer, les avancées technologiques et industrielles, le niveau de vie de la population . . . L'acceptabilité du risque par la population diffère également d'un pays à un autre et dépend notamment de la perception du risque par la société, un concept subjectif et variant d'un individu à un autre selon la localisation et le niveau de risque qu'il estime supportable. L'acceptabilité est beaucoup moins élevée dans les pays développés où l'on dispose de plus de moyens et où l'on attend plus des autorités en terme de mesure de sécurité que dans les pays moins développés où on est submergé par les problèmes et où la population attend moins des autorités. La question à se poser portera sur le choix de la bonne stratégie à appliquer avant, pendant et après l'occurrence du danger.

L'information sur les risques naturels et technologiques majeurs vient en premier lieu et peut être représentée en trois échelles (micro, méso et macro). Elle est accordée de plein droit et mise à disposition des citoyens dans le cadre du Code de l'environnement français.

- Au niveau micro, elle permet à un citoyen de s'informer sur les aléas auxquels il est exposé, les mesures à prendre pour minimiser sa vulnérabilité ainsi que les moyens de protection et de secours mis en œuvre par les pouvoirs publics.
- Au niveau méso, cette information se traduit souvent au travers d'exercices dans les écoles, les entreprises et les lieux recevant du public. En fait, les écoles doivent mettre en place un Plan Particulier de Mise en Sécurité (PPMS) avec l'aide de l'éducation nationale. Ceci doit permettre la mise en sécurité des personnes à l'école suite à un éventuel nuage toxique dans l'atmosphère par exemple. Les

ERP⁴ réalisent aussi un Plan de Mise à l'Abri (PMA) peu défini à ce jour et pas réglementé. Les petites entreprises dans une zone industrielle peuvent décider la mise en place d'un tel plan en commun. Sur le territoire de la CODAH, les entreprises de la zone industrielle sont en train de développer un plan commun nommé Plan de Communication d'Urgence sur la Zone Industrielle (PCUZI).

- Au niveau macro, les exercices « grandeur nature » entraînent la population à mieux réagir dans le cadre d'un accident nécessitant des réactions d'ordre collectif comme lors d'une évacuation d'un quartier ou d'une ville. Bien que ces entraînements puissent apprendre à la population les bons réflexes en cas de panique collective, ils sont extrêmement coûteux et difficiles à mettre en œuvre [105, 121], d'où l'intérêt de recourir à des méthodes de simulation pour aider les décideurs à mieux comprendre l'influence du comportement individuel sur le comportement global d'une foule lors d'une situation de danger.

Au cœur de la crise, toute décision face à une situation de danger oblige à opter entre la nécessité ou non de la mobilité de la population. La décision de « mobilité » correspond à l'évacuation de la population et la « non mobilité » correspond à la mise à l'abri. Il convient ensuite de communiquer cette décision à la population et de la tenir informée, ceci via des sirènes d'alerte⁵, les radios, le Radio Data System (RDS)⁶, le « Call Broadcasting », la diffusion de SMS voire même la diffusion de messages de proche en proche par des technologies WIFI ou BLUETOOTH n'utilisant pas d'infrastructures de communication [74]. Ceci peut s'avérer utile surtout dans le cas de défaillance des structures fixes de communication et doit permettre de coordonner les différents services de secours des personnes exposées. Les autorités après la crise auront un rôle important, à court terme, en amenant des éléments de réponse, en rassurant la population et en lui permettant de reprendre une activité normale. À long terme, elles devront être capables de tirer des enseignements et de réaliser un retour d'expérience.

4. Le terme ERP est défini par l'article R123 – 2 du Code de la construction et de l'habitation, désigne en droit français les lieux publics ou privés accueillant des clients ou des utilisateurs autres que les employés (salariés ou fonctionnaires), qui sont, eux, protégés par les règles relatives à la santé et la sécurité au travail. Cela regroupe un très grand nombre d'établissements comme les cinémas, théâtres, magasins (de l'échoppe à la grande surface), bibliothèques, écoles, universités, hôtels, restaurants, hôpitaux ... que ce soient des structures fixes ou provisoires (chapiteau, structures gonflables) : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Etablissements-recevant-du-public,13420.html>.

5. Pour plus de détails sur les consignes d'alerte et les sirènes, le site de l'Office des Risques Majeurs de l'Estuaire de la Seine (ORMES) est consultable sur le lien http://www.ormes.fr/dossier.asp?DOSS_CLE=253.

6. Service de transmission de données numériques en parallèle des signaux audio de la radio FM en bande 2.

1.2 Le territoire de l'agglomération havraise face au risque

Située à l'embouchure de la Seine, sur un territoire de plus de 20 000 ha, la CODAH regroupe 17 communes comptant aux alentours de 250 000 habitants autour de projets communs de développement et d'aménagement du territoire⁷.

De par son emplacement en plein estuaire de la Seine, la CODAH fait face à des risques naturels d'inondation, mouvements de terrain, effondrements de terrain et des tempêtes causant la chute d'arbres et d'installations [82].

À la fois pôle industriel, portuaire et logistique européen, la CODAH et plus largement la zone industrielle et portuaire du Havre dispose d'une zone de plus de 5 000 ha dédiée à ces activités. Elle regroupe 33 établissements à haut risque dont la moitié classée « Seveso seuil haut »⁸ et absorbe un trafic important de Transport de Matières Dangereuses (TMD), l'exposant aux divers risques technologiques dont l'incendie, l'explosion et la propagation de nuages toxiques pouvant impacter un très grand nombre de personnes dont la cause pourrait provenir d'une source fixe (une usine) ou mobile (un camion-citerne transportant des matières dangereuses)⁹. Le territoire a déjà connu des incidents et des accidents. La figure 1.4 présente les principaux événements dangereux d'origine naturelle et technologique ayant touché la CODAH. Face à la complexité des problèmes posés et afin de répondre aux attentes de la population en terme de sécurité, les industriels et les autorités coordonnent les moyens pour réduire la probabilité d'occurrence et l'effet d'accidents éventuels en assurant des mesures de protection nécessaires.

1.2.1 Coordination inter-acteurs pour assurer la sécurité

Dans le cadre de la sécurité (prévention et protection), les autorités publiques et industrielles doivent se coordonner et se mobiliser pour prévenir les accidents et en réduire les conséquences. Des études de danger ont donc été réalisées par les entreprises sur les risques encourus, leurs conséquences et les zones concernées¹⁰.

7. Le site web de la CODAH est consultable à l'adresse suivante : <http://www.agglo-lehavre.fr>.

8. Les entreprises sont classées « Seveso » en fonction des quantités et des types de produits dangereux qu'elles accueillent. Il existe ainsi deux seuils différents classant les entreprises en « Seveso seuil bas » ou en « Seveso seuil haut ». Les établissements militaires et les dangers liés aux rayonnements ionisants (nucléaire) ne sont pas concernés par cette directive. Le calcul de dépassement de seuil se réalise par une somme pondérée des masses de produits présents dans l'entreprise. Les entreprises dont le premier seuil n'est pas franchi ne sont pas concernées par la directive. Les entreprises qui dépassent le premier seuil sont concernées par la Directive et sont classées « Seveso seuil bas ». Les entreprises qui dépassent le second seuil sont elles classées « Seveso seuil haut ».

9. Site officiel de l'ORMES : <http://www.ormes.fr/>.

10. Brochure du Plan Particulier d'Intervention établie en mai 2010 par les établissements industriels et la préfecture de la Seine Maritime, en collaboration avec l'ORMES, les communes concernées, la sous-préfecture du Havre, la Direction Régionale de l'Environnement, l'Aménagement et du Logement (DREAL), les préfectures de l'Eure et du Calvados.



FIGURE 1.3: Carte des 17 communes de la CODAH.

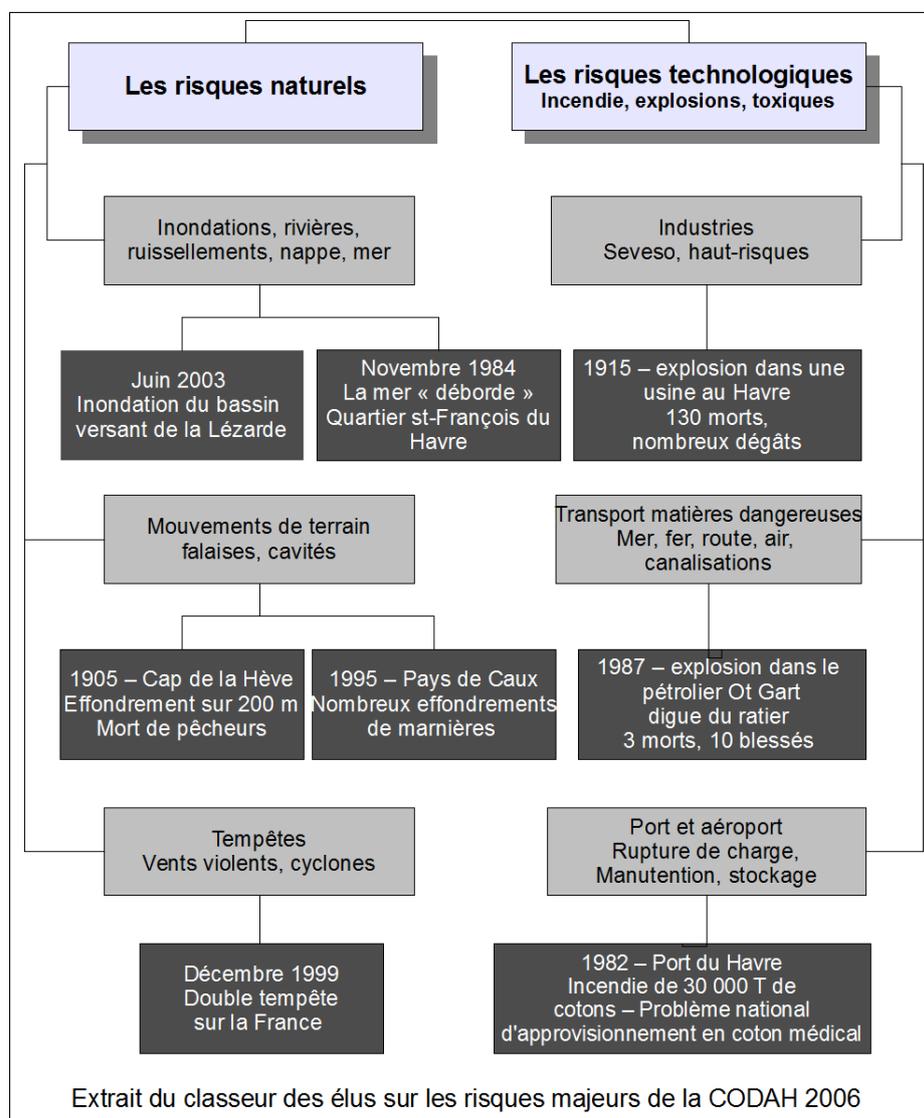


FIGURE 1.4: Événements dangereux sur le territoire de la CODAH.

- Du côté industriel : des études ont été menées pour optimiser le déplacement et le stockage de produits, l'utilisation de matières moins dangereuses... Dans tous les cas, les établissements industriels doivent respecter des procédures d'autorisation ou de déclaration prévues dans le Code de l'environnement. Ils sont suivis et contrôlés même s'ils ne sont pas classés Seveso. En cas d'accident limité à l'intérieur d'une usine, l'industriel applique lui-même les mesures d'urgence avec l'aide éventuelle des secours extérieurs ; il s'agit du POI. Cette approche isole la

problématique du risque au niveau des représentations locales sans prendre en compte les conséquences en série sur le voisinage des incidents locaux.

- Du côté des autorités publiques : sous la direction du préfet, la **DREAL**¹¹ impose des mesures de prévention et procède à des inspections périodiques pour assurer le respect des dispositions prises par l'exploitant. Quant au Plan Particulier d'Intervention (**PPI**), il constitue un plan pour faire face aux risques générés par des établissements présentant un risque. Il est établi par le préfet et mis en œuvre une fois ce dernier prévenu par l'industriel d'un sinistre qui s'étend à l'extérieur de l'usine. Le Plan Communal de Sauvegarde (**PCS**) est obligatoire dans les communes situées dans la zone d'application d'un **PPI**. Il a pour objectif d'organiser l'assistance et le soutien à la population à l'échelle communale et sous l'autorité du maire.

En cas de danger, la population est alertée via un ensemble de sirènes couvrant le territoire. Ce réseau¹² de sirènes est mis en place et maintenu par l'équipe de la **DIRM** de la **CODAH** et par les industriels. L'alerte peut éventuellement être complétée si besoin par des véhicules mobiles, des haut-parleurs ...

1.2.2 Outils de modélisation au sein de la CODAH

L'examen des populations impactées reste un exercice difficile ; la modélisation et l'évaluation des dangers nous sont utiles lorsqu'on les croise avec les enjeux exposés. Dans ce cadre, la Direction des Risques Majeurs **DIRM** de la **CODAH** s'est investie dans la recherche en collaborant avec des universitaires autour des projets sur la gestion du risque et s'est dotée d'un ensemble d'outils d'aide à la décision. Parmi ces outils qui seront détaillés dans le chapitre 3, nous pouvons citer :

- SAFER Hazmat Responder : un outil de modélisation des accidents industriels sous forme de propagation d'un nuage toxique entre autres.
- SIRENE : un outil d'étude de la couverture sonore pour optimiser l'emplacement de sirènes afin qu'elles soient audibles par la population.
- MIKE : un outil de modélisation fournissant des solutions locales aux problèmes mondiaux tels que l'adaptation au changement climatique, les inondations, la pénurie d'eau, la sécurité de l'approvisionnement d'une eau de bonne qualité et l'assainissement de l'hydraulique de surface et débordement de rivière ...
- InfoWorks : la modélisation de l'ensemble du cycle de l'eau, depuis l'alimentation et la distribution d'eau potable, les réseaux d'assainissement, jusqu'aux rivières ... Il est aussi utilisé au sein de la **CODAH** pour simuler la submersion marine en milieu urbain.

11. La **DREAL** remplace la Direction Régionale de l'ENvironnement (**DIREN**), la Direction Générale de l'Environnement (**DRE**)¹² et la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Information (**DRIRE**) depuis le 28 juin 2009.

12. Le terme générique « réseau » désigne un ensemble d'entités (objets, personnes, ...) interconnectées les unes avec les autres.

- **PRET-RESSE** [20] : un modèle d'allocation spatio-temporelle de la population à l'échelle des bâtiments exposée au risque. Il permet à la **CODAH** de quantifier la population dans les bâtiments en distinguant leur occupation diurne et nocturne sans toutefois avoir une idée de leur distribution sur le réseau routier. Il paraît donc opportun de mettre en place un modèle dynamique permettant de déterminer et de quantifier l'évolution des flux sur le réseau routier.

Bien qu'il permette de localiser la population, ce modèle reste statique car il ne prend pas en considération les déplacements journaliers des personnes sur les axes de transport. Un modèle dynamique de flux doit permettre de mieux comprendre les paramètres qui déterminent les évolutions des flux et fournir des outils d'aide à la décision en estimant le nombre de personnes présentes dans telle ou telle zone urbaine et leur distribution spatiale à tel moment de la journée, permettant d'aider à terme dans le choix de la politique d'évacuation dans le cadre d'une gestion de situation d'urgence. Dans le travail actuel, le trafic routier dans le cadre d'une évacuation nous intéresse puisqu'une simple perturbation peut causer des modifications importantes au niveau des flux, surtout en présence d'un danger se propageant assez rapidement. Les décideurs utilisent des cartes de vulnérabilité pour les aider à estimer le risque et mettre en place des stratégies de gestion du risque. Ces cartes sont basées sur plusieurs types de vulnérabilité : socio démographique, biophysique et autres regroupant plusieurs types de dangers. Néanmoins, ce genre d'approches reste statique et ne prend pas en compte le déplacement de la population dans le calcul de la vulnérabilité. Quelques travaux ont été développés pour calculer un score de vulnérabilité lié à l'accès au réseau routier en adoptant une approche pessimiste dans le calcul du danger, *i.e.* plusieurs individus, dans une zone de danger, décident tous de prendre la même route pour évacuer cette zone, ce qui se passe malheureusement assez souvent dans la réalité.

Avant d'exposer la démarche scientifique et l'objectif de la thèse, nous introduisons la notion de graphe qui sera fréquemment utilisée dans le manuscrit, nous détaillerons davantage ce type de représentation dans le chapitre 5. Un réseau routier peut être représenté par un graphe $G = (V, E)$ représentant sa structure, où V désigne l'ensemble des sommets et E l'ensemble des arêtes. Ainsi, un nœud du réseau est représenté par un sommet et une connexion du réseau est représentée par une arête. Dans le reste du manuscrit, on utilise le terme « arête » pour qualifier une connexion non orientée et le terme « arc » dans le cas inverse. Un graphe est donc non orienté s'il ne contient que des arêtes (connexions non orientées) et il est orienté s'il ne contient que des arcs (connexions orientées).

1.3 Objectif du travail

Nous sommes face à un problème complexe correspondant à la représentation de l'agglomération et la morphodynamique liée aux flux la traversant, aussi bien dans le cadre d'une situation normale que lors d'une situation de crise qui vient perturber les

flux. Nous nous intéressons particulièrement à la problématique liée à la prévention du risque, visant à anticiper sur l'éventuelle survenance d'un événement déclencheur de crise par l'établissement de mesures de sécurité, mais aussi à la gestion de la crise en utilisant les moyens de protection pré-établis tout en essayant de s'adapter à l'imprévu. Afin de répondre à cette problématique, nous avons mis en place un outil d'aide à la décision dans le cadre de la prévention et de la gestion du risque. Pour la prévention de risque, on s'intéresse d'abord à l'identification des zones du réseau routier plus ou moins denses grâce à l'exploitation d'une EMD réalisée au sein de la CODAH. Un algorithme de marche aléatoire dans un graphe permet aussi d'identifier les zones du réseau susceptibles d'être congestionnées en cas d'évacuation, et ceci à partir de la structure du graphe. Pour l'aspect « gestion du risque », un modèle simple de micro simulation de trafic routier a été mis en place. On passe du niveau macro à un niveau fin de représentation dans le cas d'un risque pour mieux visualiser les interactions entre évacués.

Suite à l'occurrence d'un accident technologique ou naturel, les décideurs doivent faire un choix par rapport à la mise en péril supposé d'enjeux, notamment la population exposée. Ils doivent donc selon (i) le type de danger, (ii) sa localisation et (iii) sa gravité décider de la stratégie de mise en sécurité et la communiquer à la population. La décision peut résulter d'une stratégie de « non mobilité » ou d'une stratégie « de mobilité ». La première consiste à mettre la population à l'abri ou à lui demander de se confiner et la seconde demande à la population d'évacuer la zone de danger. Si une décision de « mobilité » est prise par les autorités, les personnes en danger empruntent principalement le réseau viaire pour évacuer.

Les évacués interagissent entre eux et sont influencés par le comportement et la panique éventuelle des uns et des autres, et puisqu'ils utilisent principalement le réseau routier, ils sont influencés par la structure du réseau qui conditionne la fluidité des flux. À son tour, l'état du réseau est également influencé par le comportement des personnes. C'est dans le cadre de prise de décision liée à la mobilité que nous plaçons ce travail de thèse. Une agglomération à la fois urbaine, industrielle et portuaire est représentative d'un système complexe dans lequel un grand nombre d'entités sont en forte interaction. L'environnement correspond au réseau routier. Le comportement des entités influe sur le réseau routier qui à son tour conditionne le comportement des entités. Le moment de la crise provoque une sortie de la trajectoire normale du système. Le but sera de ramener le système vers une trajectoire contrôlée traduisant la maîtrise de la situation. Ceci est fait par des flux externes correspondant aux forces de l'ordre qui doivent, suite à une décision de « mobilité », (i) veiller au bon déroulement d'une évacuation, (ii) bloquer les entrées vers la zone en danger et (iii) guider les évacués vers l'extérieur de la zone.

Plus concrètement, nous étudions des éléments pouvant affecter positivement ou négativement le bon déroulement d'une évacuation :

- l'influence de la structure du réseau routier,
- la dynamique liée à l'utilisation du trafic routier.

L'influence de la structure du réseau routier

La structure du réseau routier représentée par un multigraphe¹³ orienté dans ce travail de thèse (voir chapitre 5 pour plus de détails), influence les flux en situation normale comme en situation de crise. Un aléa frappe une partie du réseau routier et crée en effet un endommagement matériel, provoquant un changement dans la structure du réseau débouchant sur des dommages fonctionnels et influençant les entités qui empruntent ce réseau, d'où la notion de la vulnérabilité matérielle, structurelle et fonctionnelle développée dans [79, 80, 155]. En effet, l'endommagement matériel dépend entre autres de l'aléa et du niveau d'exposition de l'enjeu. Il s'agit de la vulnérabilité matérielle. Le réseau routier, de par sa structure, est aussi exposé donc vulnérable. On note que la structure du réseau peut jouer un rôle positif ou négatif dans la réduction de la vulnérabilité. Un réseau à structure maillée est moins vulnérable que d'autres du fait que l'on peut souvent trouver des chemins alternatifs pour éviter des parties endommagées du réseau. À une autre échelle, l'endommagement structurel influe sur la fonction du réseau routier et donc sur les entités empruntant ce réseau, d'où le concept de la vulnérabilité fonctionnelle qui, à son tour peut influencer sur la structure du réseau.

Nous analysons la structure du réseau à trois niveaux d'échelle : micro (voir figure 1.5), méso et macro (figure 1.6).

Au niveau micro, nous étudions comment un accident local peut influencer sur le fonctionnement du réseau routier et ceci en étudiant, pour chaque connexion, son importance dans le réseau. Cette dernière dépend du coefficient de clustering¹⁴ des sommets extrémités de chaque arc du multigraphe. Un arc dont les deux sommets extrémités ont un coefficient de clustering élevé offre plus de chemins alternatifs pour relier ses extrémités s'il est endommagé suite à un accident.

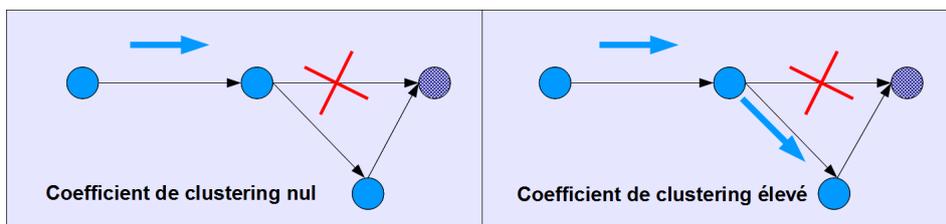


FIGURE 1.5: Exemple d'un accident sur une route du réseau.

13. Un multigraphe $G = (V, E)$ est un graphe pour lequel peuvent coexister plusieurs arcs entre deux sommets adjacents, ce qui le différencie d'un graphe.

14. Le coefficient de clustering d'un sommet v d'un graphe G (le coefficient a la même valeur si G est orienté ou non) est la probabilité, étant donnés deux voisins v_1 et v_2 de v , qu'ils soient connectés entre eux. Le coefficient de clustering du graphe G est la moyenne de celui de tous les sommets de G . Le coefficient de clustering d'un multigraphe et de ses sommets peut être adapté à partir de la méthode de calcul du coefficient de clustering dans un graphe. Dans ce cas, on ne considère entre deux sommets voisins i et j qu'une seule arête même si entre i et j , coexistent plusieurs arêtes.

Nous avons développé une seconde méthode permettant de quantifier le détour à faire suite à la perte éventuelle d'un arc, elle sera détaillée davantage dans le chapitre 9. Au niveau mésoscopique, nous calculons la centralité d'intermédiarité dans le multigraphe. Ce calcul est adapté de la méthode de calcul de centralité dans un graphe [75, 76]. Il s'agit de calculer l'importance à l'échelle mésoscopique de chaque arc dans le graphe, *i.e.* le nombre de plus courts chemins entre chaque pair de sommets du graphe passant par cet arc.

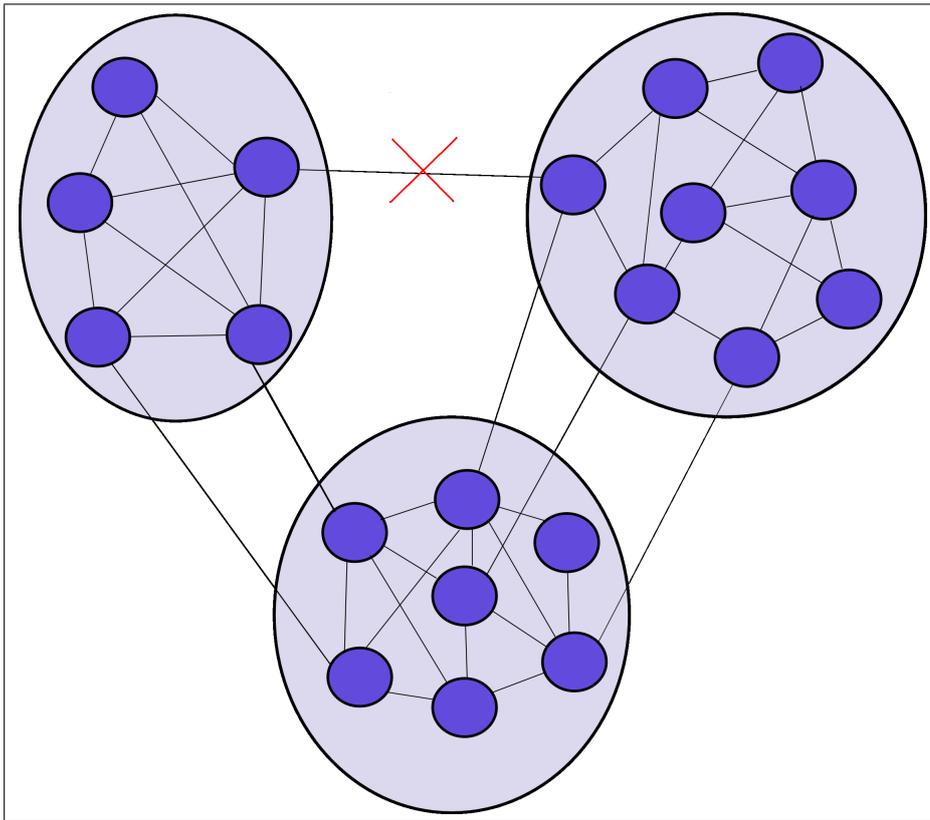


FIGURE 1.6: Exemple d'un accident sur une arête d'un graphe non orienté liant deux communautés.

Au niveau macro, nous mettons en place une méthode de détection de communautés applicable aussi bien sur un graphe que sur un multigraphe qui permet de montrer les arcs inter communautés faibles sur le réseau (voir figure 1.6 pour le cas d'un graphe). Ces arcs représentent donc des lieux de passage incontournables et en tant que tels, ce sont des singularités importantes dans la carte globale de vulnérabilité. Nous développons aussi une méthode de marche aléatoire sur le multigraphe, permettant d'identifier les zones du réseau susceptibles d'être plus empruntées et congestionnées que d'autres

en situation normale de trafic, et ceci à partir de la structure du multigraphe.

La dynamique liée à l'utilisation du trafic routier

Nous avons complété le modèle statique d'allocation de la population [PRET-RESSE](#) (voir [1.2.2](#)) développé par la [CODAH](#) en exploitant une [EMD](#). Nous avons aussi mis en place un modèle simple de trafic routier basé sur le principe de la distance de sécurité du Code de la route français. Les véhicules ont un comportement normal ou de danger selon qu'ils se situent ou non près d'une zone de danger. Les forces de l'ordre interviennent suite à une décision de « mobilité » pour encercler une zone de danger, bloquer les entrées et guider les personnes vers l'extérieur de la zone. Il s'agit donc de tenter de contrôler un système complexe.

Nous sommes confrontés à un problème de réduction de la vulnérabilité des enjeux exposés et tout particulièrement la population. Pour cela, nous étudions en premier lieu une partie importante de l'environnement correspondant au réseau routier, sa structure, ses caractéristiques. En second lieu, nous faisons appel à des méthodes de modélisation et de simulation informatique afin de gérer la dynamique et les flux.

DU RISQUE À LA GESTION DE CRISE

2.1	Du risque au risque majeur	26
2.2	Crise et gestion de crise	29
2.3	Retour d'expériences sur des événements	29
2.3.1	Évolution de la gestion du risque naturel	30
2.3.2	Évolution de la gestion du risque technologique	37

Durant ces dernières décennies, le monde a été de plus en plus exposé aux risques d'origine naturelle ou anthropique qui ont provoqué des dommages sur les populations et leurs environnements. La perception de la notion de sécurité des hommes et des biens ne cesse d'évoluer. Alors que le sentiment de sécurité reposait éventuellement sur des croyances [68], les savoirs se sont développés suite à plusieurs événements dramatiques, débouchant sur des dernières avancées en technologies de l'information et de communications et la mise en œuvre de politiques et de moyens réalisés par les États et plus particulièrement les pays industriels développés. En France, les collectivités territoriales se voient porter des responsabilités croissantes et se dotent de plus en plus de compétences sur le recensement des risques, l'information préventive des populations et l'élaboration de plans d'intervention. Dans ce cadre, la CODAH a créé en 2001 la DIRM.

2.1 Du risque au risque majeur

De tout temps, l'homme a été exposé aux risques et a cherché à les gérer au mieux avec les moyens dont il disposait. Ce qui ne veut pas dire que nous sommes dans un domaine figé, ce champ ne cessant d'évoluer et de se transformer. Nous allons tenter au cours de ce chapitre d'apporter un éclairage sur la terminologie employée dans le contexte de la cindynique. Avant de définir ce qu'est un risque, il nous semble nécessaire de définir les notions d'aléa et de vulnérabilité que nous avons déjà largement employées.

Aléa

L'aléa stricto sensu est une évolution non prévisible que peut prendre une situation, un événement ... Sa mesure est donc impossible, de ce fait c'est une approche probabiliste qui est utilisée. Un aléa peut être d'origine naturelle (séisme, inondation, glissement de terrain) ou anthropique (industriel, transport de matières dangereuses, ouvrages hydrauliques ...).

Enjeux

Les enjeux représentent les hommes, les biens, l'environnement qui peuvent être exposés à un aléa.

Vulnérabilité

La vulnérabilité exprime le niveau de conséquences prévisibles d'un aléa sur les enjeux exposés. Un enjeu est vulnérable s'il est possible qu'il soit touché par un aléa. La vulnérabilité dépend de la sensibilité et de l'adaptabilité du système aux phénomènes. Elle peut être liée à la méconnaissance des risques, à une politique de l'État, au manque de prévention, de protection et de préparation ... Vivre dans une construction se situant dans une zone inondable avec le plancher au ras du sol en est un exemple.

Risque

Ainsi que nous l'avons déjà défini (voir 1.1), le risque est généralement présenté comme étant le résultat du produit d'un aléa et d'une vulnérabilité ou plutôt d'une composition de vulnérabilités. De nombreux experts dans le domaine du risque le définissent par la formule suivante : $Risque = aléa * vulnérabilité$ [50] ; ce qui veut dire qu'un même niveau de risque peut résulter d'un aléa fort et d'une vulnérabilité faible ou d'une vulnérabilité forte et d'un aléa faible.

En effet, l'utilisation d'un produit nous semble trop réductrice et la formule $Risque = F(aléa, vulnérabilité)$ est plus générale et peut changer selon le problème

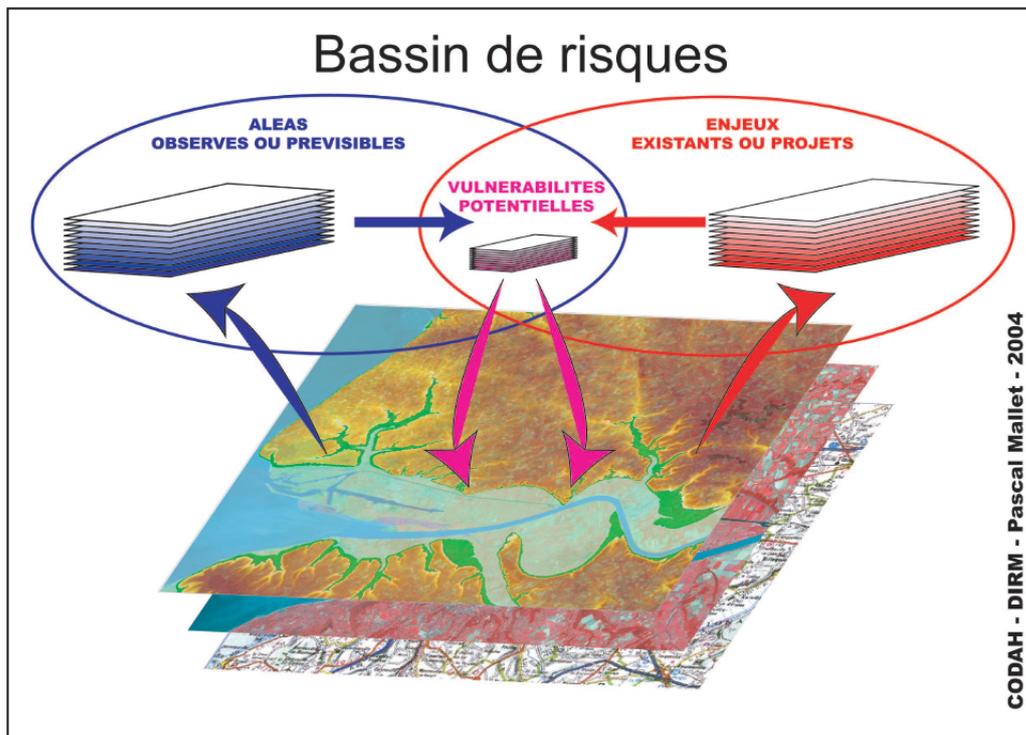


FIGURE 2.1: Croisement d'aléas et d'enjeux vulnérables.

étudié. *Le risque relève du probable et la catastrophe (elle est imprévisible) de l'ordre du réel (un risque de guerre au Kosovo qui s'est transformé en catastrophe au printemps 1999)* [50]. La figure 2.1 illustre une explication du risque très fréquemment utilisée par les spécialistes du domaine. Elle souligne bien le fait qu'un risque existe si l'aléa et l'enjeu vulnérable se retrouvent en contact.

Risque majeur

Il est souvent fait une distinction entre les risques liés à la vie quotidienne et de faible gravité, les risques plus graves dits accidentels et les catastrophes qui appartiennent aux risques majeurs. La caractérisation essentielle se fait sur l'ampleur des dommages. En effet, un risque majeur est la possibilité qu'un événement d'origine naturelle ou anthropique puisse causer des dommages importants pour la société. Il est généralement caractérisé par :

- **sa gravité**, pouvant être très lourde à supporter pour la population, les collectivités et l'environnement,
- **sa fréquence**, parfois si faible et que l'on peut oublier et ne pas bien s'y préparer.

Parfois de très grande ampleur, l'accident majeur nécessite alors la mise en place de gros moyens et d'une organisation spécifique préalablement testée (plans de secours par exemple).

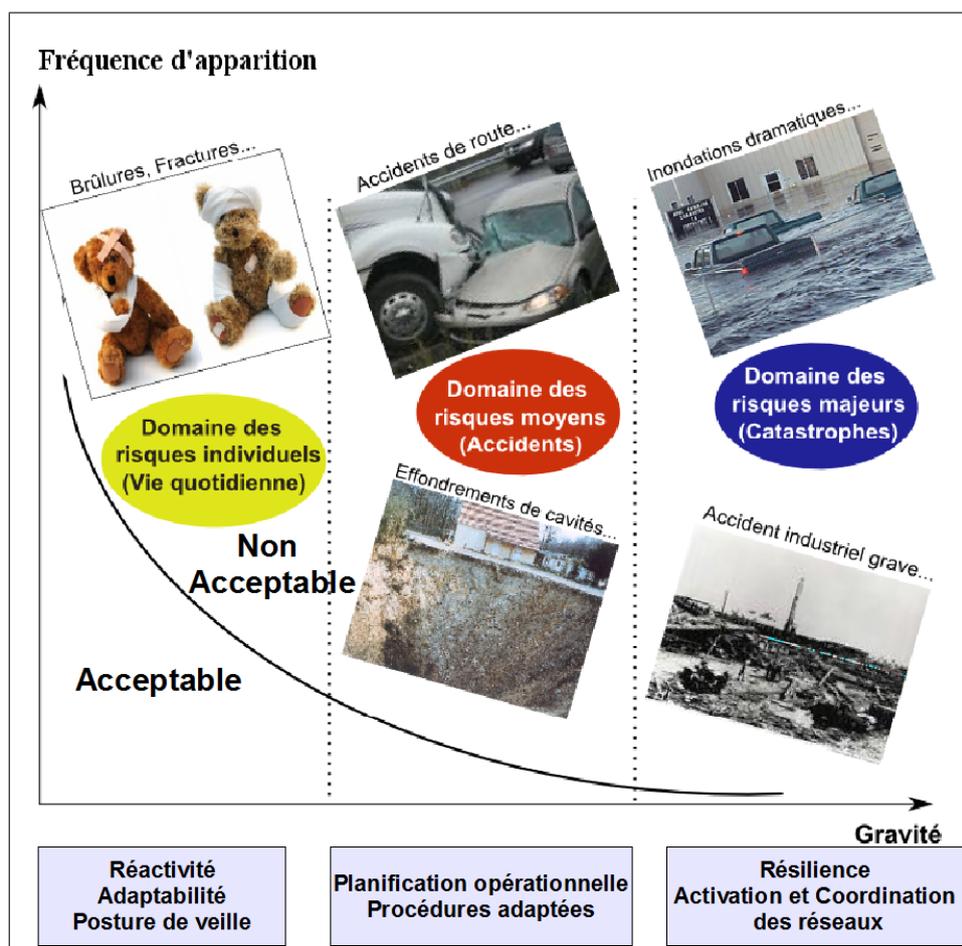


FIGURE 2.2: Courbe de Farmer sur la gravité / probabilité d'occurrence. Plus de détails se trouvent dans [67].

La courbe de Farmer trace une frontière entre la face acceptable et inacceptable du risque et montre en particulier que l'acceptabilité dépend de la fréquence et de la gravité. En effet, un risque peut être considéré comme acceptable lorsque la population continue à vivre avec en contre partie d'un bénéfice, et s'il est éventuellement contrôlé. Si on traduit la fréquence en terme de probabilité d'occurrence, la courbe met en évidence les trois domaines de risques dont le risque majeur caractérisé par une faible probabilité d'occurrence et un impact très important sur la population et l'environnement.

2.2 Crise et gestion de crise

Le territoire sur lequel s'applique le risque constitue un ensemble complexe organisé en système. Par système, nous entendons un ensemble de composants pouvant être de même ou de différentes natures et dont les interactions respectent un certain nombre de règles. Limité par une frontière, sa complexité augmente avec le nombre d'interactions inter composants. Dans un fonctionnement normal, un système présente une trajectoire liée aux interactions entre ses éléments assurant sa stabilité. La crise se définit comme l'état du système au moment où une rupture de la trajectoire est imminente. La rupture de la trajectoire nécessite des interventions externes au système pour pouvoir lui permettre de retourner dans son état initial ou dans un état acceptable. Elle survient lors du dépassement d'un « scénario possible ». C'est un moment d'extrême tension, de paroxysme, de conflit et de changement. Selon Lagadec [99], les caractéristiques d'une crise se résument en « 5d » : **d**éferlement des difficultés, **d**érèglement fonctionnel, **d**ivergences multiples, **d**écrédibilisation, **d**éstabilisation. Ainsi, en période de crise, les organisations en charge des activités en cause se trouvent « dépossédées » de leurs compétences par la pluralité des intervenants, du fait de la disproportion entre les problèmes qui apparaissent et les moyens pour les traiter (exemple : Seveso 1976, Tchernobyl 1986). La crise nécessite une réponse rapide, adaptée et structurée soit pour la prévenir soit pour la gérer. Quant à la gestion de crise impliquant une décision en phase d'incertitude, elle consiste à mettre en œuvre des stratégies, des tactiques, des méthodes spécifiques ou adaptées visant à se préparer et faire face à la crise ainsi qu'aux problèmes de retour à une situation normale jusqu'à la réhabilitation et la reconstruction tout en essayant de tirer des enseignements de l'expérience passée.

2.3 Retour d'expériences sur des événements

Un intérêt scientifique et pédagogique important nous pousse à catégoriser les catastrophes par origine naturelle et technologique. Le domaine des catastrophes est complexe ; il est difficile d'avoir une compréhension globale de ces phénomènes : un mécanisme déclencheur d'ordre naturel pourra très bien être suivi par d'autres processus physiques et humains pouvant accentuer les impacts désastreux : c'est le cas, par exemple, d'un séisme suivi par des effets de chaîne comme la rupture de barrages. Dans l'histoire, des événements à risque élevé ont nécessité ou non des évacuations à petite ou à grande échelle, que ce soit en France ou ailleurs dans le monde. Dans ce qui suit, nous évoquons l'évolution de la perception des risques naturels et technologiques, quelques événements qui ont marqué l'histoire et les retours d'expérience liés à ces événements. Parmi les accidents technologiques les plus importants, on compte Seveso en 1976, Tchernobyl en 1986 (l'évacuation de 135 000 personnes et la stérilisation de 30 km de diamètre ont coûté 12 milliards d'euros) et Bhopal en 1984 [34]. Parmi les accidents

naturels récents, on compte entre autres, l'inondation des Pays-Bas en 1953, le tsunami dans l'océan indien en 2004.

2.3.1 Évolution de la gestion du risque naturel

Les définitions récentes du risque naturel peuvent changer d'un pays à un autre mais soulignent le fait qu'il résulte du croisement d'un aléa naturel (inondation, séisme, mouvement de terrain, avalanche, feux de forêt, cyclone, tempête, éruption volcanique ...) et d'une vulnérabilité touchant des enjeux humains et/ou matériels.

Généralement, les catastrophes naturelles se produisent lorsqu'une très forte concentration d'énergie se libère. C'est cette puissance énergétique qui provoque directement ou souvent indirectement la perte des vies humaines. C'est le cas du séisme qui a provoqué un tsunami en océan indien en libérant une énergie équivalente environ à 30 000 bombes nucléaires similaires à celle d'Hiroshima (voir section 2.4).

Bien que l'aléa naturel n'évolue que très peu, la perception du risque par les hommes n'a pas cessé d'évoluer. Dans le passé (avant l'occurrence du séisme au Portugal en 1755), l'homme essayait de domestiquer la nature tout en ayant une approche fataliste. À titre d'exemple, les grecs expliquaient qu'un séisme résulte du vent divin [50].

Après le séisme de Lisbonne au 18^{ème} siècle, les travaux de Michell¹ furent les premiers à utiliser une méthodologie scientifique de compréhension et d'explication de ces événements. Ensuite, des explications objectives des catastrophes commencent à voir le jour en Méditerranée où l'on essayait d'expliquer les mouvements horizontaux et verticaux liés aux ondes de propagation lors de l'occurrence d'un séisme. Au cours de ces dernières décennies, la vulnérabilité de la population ne cesse de croître suite à l'évolution des activités humaines. En général, les catastrophes naturelles sont plus meurtrières que les catastrophes technologiques et les pertes humaines sont clairement plus importantes dans les pays du Tiers Monde que dans les pays développés [81].

Dans les pays plus riches, des investissements pour avoir une meilleure connaissance autour des risques permettent de mieux agir avant, pendant et après la catastrophe. Le monde moderne dispose d'outils de prévision et de surveillance pour différents aléas naturels et met en œuvre des moyens pour réduire l'exposition des enjeux. Parmi les techniques mises en œuvre, nous pouvons citer quelques outils de surveillance de volcans comme le Vésuve en Italie, des mesures anti-sismiques comme au Japon, des réglementations pour limiter la construction dans des zones dangereuses, la construction de digues et de zones de stockage d'eau en tête des bassins versants, les prévisions météorologiques ...

1. Physicien, astronome et géologue britannique (1724 – 1793). Certains de ses travaux n'ont été redécouverts par les astronomes que dans les années 1970. Il est considéré comme l'un des fondateurs de la sismologie moderne, car il fut le premier à suggérer que les mouvements du sol impliqués dans un tremblement de terre se propageaient à l'intérieur de la Terre sous forme d'ondes à partir d'une rupture dans l'écorce terrestre. Cette idée lui était venue après le grand séisme de Lisbonne, qui eut lieu en 1755 et qui joue un rôle important dans le roman *Candide* de Voltaire.

Du fait que plusieurs aléas naturels sont liés plus ou moins étroitement aux conditions météorologiques, une prévision fiable comme celle faite par Météo France est indispensable. Ainsi, il est parfois possible de prévoir la trajectoire d'un cyclone et de tempêtes. Les avalanches et les feux de forêt sont aussi très liés à la météorologie. Les prévisions peuvent aussi être complétées par des mesures de hauteur de l'eau dans les bassins de stockage afin de prévoir des inondations à l'avance.

Faute de moyens financiers, des outils de prévention, de surveillance, d'alerte et de secours n'existent souvent pas ou sont moins développés dans les pays pauvres et la population ne possède pas de culture du risque : deux cyclones de même intensité n'ont sûrement pas le même effet sur la population aux États-Unis et au Bangladesh [81] ... Cependant en aucun cas, il est possible à tout moment de prévoir et de surveiller tout type d'aléa et l'histoire récente l'a bien montré. Ainsi, la prévision d'une manière fiable du moment où l'éruption volcanique devient un danger nécessitant l'évacuation des populations n'est pas toujours réalisable, l'éruption du volcan guadeloupéen de la Soufrière en 1976 est un exemple. La décision d'évacuation a été prise par le préfet après deux avis contradictoires : 76000 personnes ont été évacuées « pour rien » sur une période de 4 mois [81].

Il reste à noter que les catastrophes naturelles provoquent largement moins de polémique que les catastrophes technologiques. Peu de gens sont capables d'analyser le processus qui a provoqué ou accentué la catastrophe naturelle faute d'identifier un ou des responsables. Ce rôle est souvent endossé par le directeur de l'établissement dans le cas d'une catastrophe technologique. Notons aussi que la réduction du risque à la source est plus aisée pour le risque technologique puisque le « générateur » de risque est connu [81]. En effet, les autorités contrôlent les établissements à risque et les obligent à mener des études de danger. Néanmoins, ces études tiennent souvent plus compte de l'aléa que de la vulnérabilité et de l'effet domino au cas où le risque dépasse l'intérieur de l'établissement.

L'histoire nous fournit des exemples que nous allons maintenant présenter chronologiquement sans chercher l'exhaustivité mais plutôt sous l'éclairage particulier du problème de l'évacuation.

Inondation par la mer du nord au Pays-Bas (1953)

Le 1^{er} février 1953, un raz-de-marée emporte les digues et les barrages anti-tempête de la Zélande et des îles de Hollande-Méridionale dans le sud-ouest des Pays-Bas. Le vent a soufflé du nord-ouest, donc perpendiculairement à la côte, phénomène très dangereux pour les Pays-Bas². La marée haute a alors atteint une hauteur supérieure à la moyenne d'environ 3 m le jour de la catastrophe. Des milliers de personnes restèrent bloquées plusieurs jours après l'accident sur les toits de leurs maisons sans eau potable

2. Wikipédia, révisé le 16 juillet 2010, disponible sur l'adresse http://fr.wikipedia.org/wiki/Inondation_causée_par_la_mer_du_Nord_en_1953.

ni nourriture.

La catastrophe a provoqué la mort de 1835 personnes et l'évacuation de 70 000 autres, 500 km de digues détruites, 4 500 bâtiments détruits et 50 000 autres endommagés, 200 000 hectares submergés par les flots. Le bilan était lourd à supporter pour la population et les autorités dans un pays qui venait de sortir de la guerre.

Les autorités n'ont pas déclenché d'alerte, et la coordination des secours a été lente puisque l'événement a eu lieu un dimanche. C'est la catastrophe la plus lourde qu'a subi le pays depuis l'inondation de Sainte-Elisabeth qui avait entraîné la mort de 2 000 personnes et la submersion de 30 villages en 1421 [130].



FIGURE 2.3: Inondation au sud-ouest des Pays-Bas en 1953³.

Suite à la catastrophe, les autorités ont mis en place le plan Delta afin d'empêcher la reproduction des dégâts occasionnés⁴. De 1956 jusqu'à 1986, elles ont construit

3. Disponible sur http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Watersnoodramp_1953.gif.

4. <http://www.deltawerken.com/>.

d'énormes barrages pour protéger la région de la Zélande [63, 8], dispositions très importantes pour la protection des enjeux mais insuffisantes si on ne met pas en place un système d'alerte et un plan d'évacuation essentiels surtout en cas de rupture de digues. Cet événement aussi bien que d'autres ayant nécessité une évacuation nous motive dans le cadre de cette thèse à proposer un modèle d'évacuation qui dépend de la structure du réseau et de la dynamique liée à ce réseau.

L'éruption du « Nevado Del Ruiz » (Colombie 1985)

Le 13 novembre 1985 à 23h30, le volcan « Nevado Del Ruiz », situé sous les glaces à plus de 5000 m d'altitude, rentre en éruption [134]. Sous l'action de la chaleur, une partie du glacier fond et un énorme torrent d'eau se forme, emporte des débris et avance à une vitesse élevée (environ 80 km/h). Deux heures plus tard, le torrent atteint le village d'Amero situé à 40 km du volcan et les villages avoisinants sans que les secouristes puissent intervenir... Le volcan était nommé « le lion endormi » par la population car malgré un passé très actif, était inactif depuis 1845.

Le bilan des pertes de cette catastrophe est très lourd : 25000 morts, 10000 blessés, 27000 personnes sans abris et les dégâts sont chiffrés à 1 milliard de dollars [3]. Depuis le début de l'année 1985, le volcan avait repris modestement ses activités [120]. Des scientifiques du groupe Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS)⁵ évaluaient alors à 60% le risque qu'une éruption entraîne des glissements de boue. Ce même groupe recommandait l'évacuation de la ville d'Améro trois jours avant l'éruption (information non confirmée) [102]. Cependant, les autorités n'ont pas pris les mesures efficaces afin d'évacuer la population, et ce pour différentes raisons dont en particulier le coût engendré et la crainte d'affoler la population. L'ordre d'évacuation a été donné vers 19h00 et a été annulé par la suite quand les cendres ont cessé de tomber [128]. Le maire a redonné l'ordre d'évacuation à 23h00 [3], mais il était trop tard.

Cette catastrophe, comme beaucoup d'autres, montre toute la difficulté de la prise de décision et de la coordination entre les experts et les décideurs. Nous proposons dans ce travail un système d'aide à la décision pour aider les décideurs à gérer une situation nécessitant une évacuation.

Séisme dans l'océan indien 2004

Le 26 décembre 2004, un séisme se produit au large de l'île indonésienne de Sumatra dans l'océan indien avec une magnitude de 9.1 à 9.3 à 30 km de profondeur. Il provoque un tsunami⁶ qui frappe plusieurs pays dont l'Indonésie, les côtes du Sri Lanka et du sud de l'Inde, ainsi que le sud de la Thaïlande et l'île touristique de Phuket et arrive jusqu'aux

5. voir le site <http://www.ingeominas.gov.com>.

6. Un tsunami est une onde marine exceptionnelle déclenchée par un soudain déplacement du plancher océanique. Le terme est dérivé d'un mot japonais qui signifie « vague portuaire » (harbor wave).

2. DU RISQUE À LA GESTION DE CRISE

côtes africaines. Ce tsunami est certainement l'un des plus violents et meurtriers dans le monde [65].

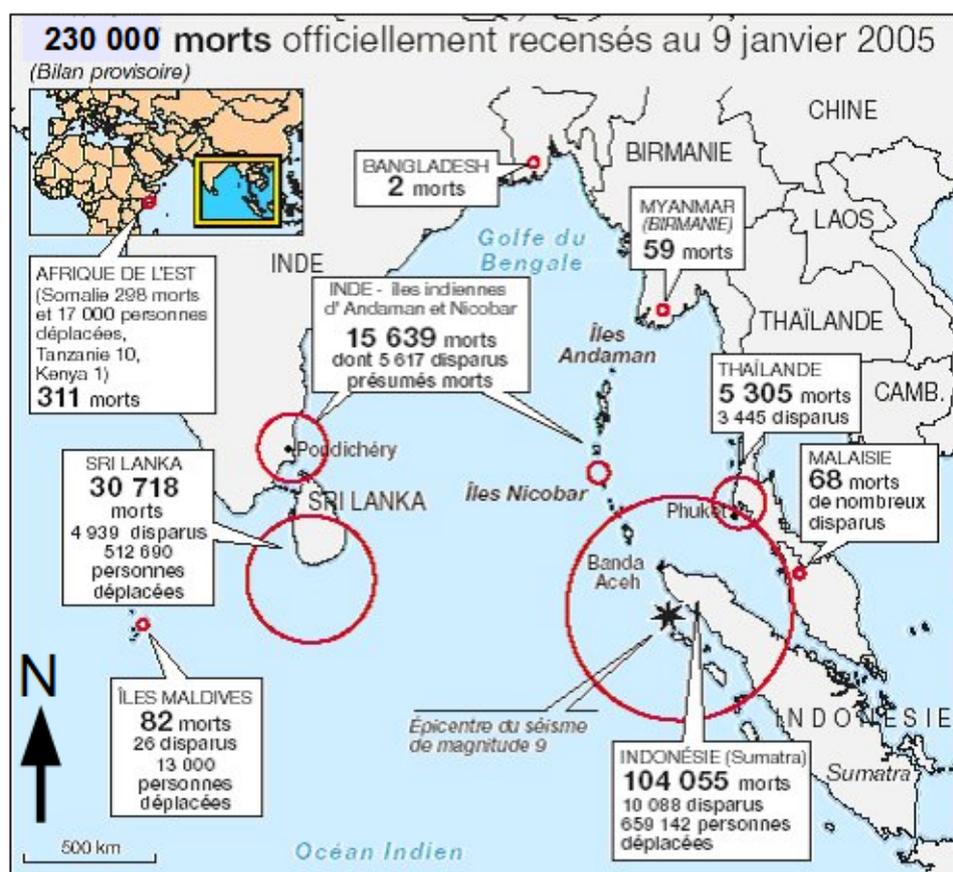


FIGURE 2.4: Carte du bilan du tsunami de l'océan indien le 26/12/2004⁷.

Le bilan des pertes par pays touché est illustré dans la figure 2.4. La hauteur des vagues a varié entre 3 et 15 m emportant des populations jamais prévues d'un danger aussi énorme. Ces vagues ont aussi atteint l'Afrique de l'Est, où l'on a signalé la mort d'une centaine de pêcheurs somaliens.

On a ainsi estimé que la libération d'énergie équivalait en effet à l'explosion de 30 000 bombes atomiques similaires à celle d'Hiroshima. Selon l'Office of U.S. Foreign Disaster

7. Disponible sur http://www.pedagogie.ac-nantes.fr/servlet/com.univ.collaboratif.utils.LectureFichiergw?CODE_FICHER=1183635148984&ID_FICHE=1183631399203.

Assistance (OFDA)⁸ et le Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)⁹, il y a eu environ 227 000 morts et disparus (ceci diffère du bilan officiel), un bilan humain jamais vu dans l'histoire des tsunamis, ce qui fait de cette catastrophe naturelle l'une des plus graves de l'histoire récente ayant touché des zones côtières très peuplées et vulnérables. Ce bilan aurait pu être moins lourd si les autorités locales et les populations avaient été préparées à une telle éventualité. En plus, contrairement au Pacifique, où l'on a mis en place un système de détection de tsunami permettant d'avertir les populations une dizaine de minutes voire quelques heures avant l'arrivée des vagues, aucun dispositif équivalent n'était installé dans l'océan indien pour plusieurs raisons dont la pauvreté des pays concernés.

Le tsunami aurait pourtant pu être prévu sachant qu'il a mis quelques heures avant de toucher certains pays. Les télévisions indiennes ont néanmoins prévenu la population mais l'information était mal transmise voire même bloquée pour éviter le désordre public.

Par comparaison, le Japon régulièrement touché par des tsunamis est bien préparé car il dispose d'un système avancé pour la protection des enjeux allant des mesures de séismes, de prévention, d'alerte à la population jusqu'à l'information à l'avance des itinéraires d'évacuation et des lieux de rassemblement.

La figure 2.5 représente la pyramide des besoins de l'homme par ordre de priorité établi par le psychologue américain Maslow¹¹. Cette pyramide montre bien que pour la majorité des personnes, la priorité primaire est de satisfaire les besoins physiologiques de la nourriture au logement... Ceci est en fait indispensable à la survie de l'homme. Les besoins physiologiques précèdent donc, selon la pyramide, la satisfaction des besoins de protection et de sécurité qui viennent en deuxième lieu. L'homme a aussi besoin d'assurer sa sécurité physique dans le sens de la réduction des dangers menaçant le corps ou la vie [110]. Le danger peut être lié à une maladie, un accident ou à un risque lié à l'environnement. Ceci explique aussi le fait de la grande différence d'acceptabilité des risques que l'on retrouve dans les sociétés « modernes » assurant majoritairement la satisfaction des besoins de la base de la pyramide. Les sociétés du Tiers Monde, en revanche, ayant du mal à satisfaire les besoins liés aux bonnes conditions de nourriture et de logement et ne peuvent être que plus « tolérantes » par rapport aux exigences du deuxième niveau

8. Office chargé de faciliter et de coordonner l'aide américaine d'urgence du gouvernement à l'étranger. OFDA répond, entre autres, à tous les types de catastrophes naturelles, y compris les séismes, éruptions volcaniques, cyclones, inondations, sécheresses, incendies, épidémies...

9. Centre de recherche, de formation et d'expertise technique sur les situations d'urgence humanitaire, avec un accent particulier sur la santé publique et en épidémiologie. Il fournit une base de données sur les maladies et les problèmes de santé provoqués par des catastrophes et des conflits pour améliorer la préparation en fonction des besoins et des réponses aux urgences humanitaires.

10. Disponible sur http://fr.wikipedia.org/wiki/Pyramide_des_besoins_de_Maslow, révisé le 24 juillet 2010.

11. Abraham Maslow (1908 – 1970) est un psychologue célèbre considéré comme le principal meneur de l'approche humaniste, surtout connu pour son explication de la motivation par la hiérarchie des besoins, qui est souvent représentée par une pyramide des besoins.

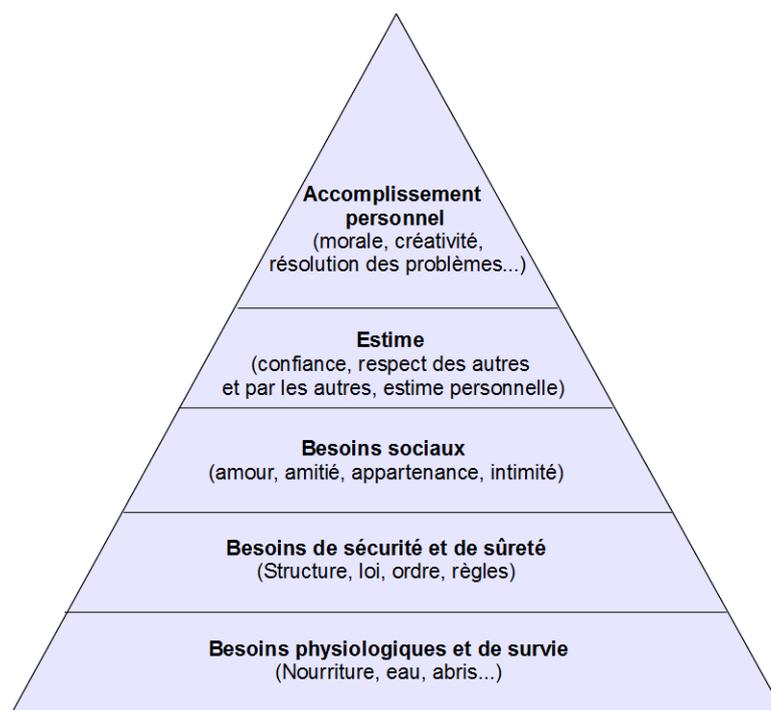


FIGURE 2.5: Pyramide des besoins de Maslow¹⁰.

de la pyramide touchant à la sûreté et à la sécurité. Notons que l'Organisation des Nations Unies (ONU) joue un rôle important sur le transfert du savoir faire vers les pays du Tiers Monde pour les aider à mieux s'organiser face aux catastrophes. Cette dernière a récemment mis en place un dispositif d'alerte aux tsunamis pour les pays de l'océan indien et un exercice de simulation grandeur nature a été mené avec succès¹².

Ouragan Katrina (2005)

Après avoir touché les côtes de la Floride à partir du 24 août 2005, l'ouragan Katrina atteint la Nouvelle-Orléans, la ville la plus peuplée de l'état de Louisiane. Le 29 août 2005, il emporte les digues autour de la ville, construite au-dessous du niveau de la mer, qui devient vite inondée. Notons que les digues, dont la gestion était assurée par différents services, ont été mal construites, mal entretenues, et sans système de surveillance ni d'alerte. Les secours n'arriveront sur les lieux que 48 heures plus tard et l'évacuation des personnes prend quelques jours. Le bilan des pertes est lourd au niveau humain et économique : on signale environ 2000 morts et 80 milliards de dommages en Louisiane

12. Centre d'actualités de l'ONU disponible sur le site : <http://www.un.org/apps/newsFr/storyF.asp?NewsID=20375&Cr=tsunami&Cr1=>.

et dans l'état voisin du Mississippi [117].

La différence de dégâts entre la Louisiane (et particulièrement la ville de la Nouvelle-Orléans) et la Floride est énorme pour un même aléa provoqué par le cyclone frappant les deux états. Les conditions se ressemblent puisque les espaces urbanisés de Floride sont construits en zone humide comme ceux de la Nouvelle-Orléans, mais 28% des habitants de la Nouvelle-Orléans vivent au-dessous du seuil de pauvreté, sans compter les personnes à mobilité réduite. Les plus pauvres n'ont pas pu partir se réfugier vers des quartiers semblant plus « résistants » et se sont retrouvés pris au piège [164]. De plus, les personnes ont attendu l'arrivée hypothétique des services de secours sur les toits de leurs maisons, des cadavres sont restés plusieurs semaines et des actes de violence ont eu lieu dans les centres de refuge encombrés et inadaptés pour l'accueil des familles dans des conditions acceptables. Tout cela a conduit à confirmer que la protection des enjeux avait été très mal gérée par les autorités, qui étaient au courant de l'ouragan 5 jours avant qu'il atteigne l'état de la Louisiane.

De plus, la Federal Emergency Management Agency (FEMA) avait déjà réalisé une simulation d'un éventuel cyclone nommé « Pam », dans le but de se préparer à d'éventuels désastres. « Pam » a été construit sur le modèle d'un ouragan lent de catégorie 3 en prenant en compte de nombreux paramètres d'ordre naturel, social, organisationnel . . . La simulation a estimé des conséquences économiques et humaines graves et plusieurs aspects imprévus sont apparus pour aggraver le désastre [109]. Malheureusement, les résultats de la simulation n'ont pas été pris en compte lors de cette crise. Les modèles de simulation d'une évacuation, même simplistes nous semblent intéressants car ils amènent des éléments de réponse pour aider les décideurs à faire des choix lors d'une situation de crise.

2.3.2 Évolution de la gestion du risque technologique

Dans le domaine du risque technologique, la gestion de la sécurité a suivi une évolution permanente. Alors que les experts se sont concentrés sur la fiabilité des composants techniques au début des années cinquante, le facteur humain a commencé à prendre de l'ampleur entre les années soixante dix et quatre vingt, les experts se focalisant de nos jours sur les facteurs organisationnels voire même inter-organisationnels [33].

Fiabilité des composants techniques

Les techniques de fiabilité des années 30 n'étaient pas basées sur des techniques scientifiques clairement définies. Ces techniques ont commencé à se mettre en place après la seconde guerre mondiale et les premières méthodes de sûreté de fonctionnement ont vu le jour entre les années 50 et 60 surtout dans les domaines de l'aéronautique et du nucléaire [168]. Ce n'est qu'au début des années 60 que l'on a pris conscience que les accidents ne s'expliquaient pas uniquement par des défaillances techniques et que l'on ne pouvait plus négliger les erreurs humaines [83].

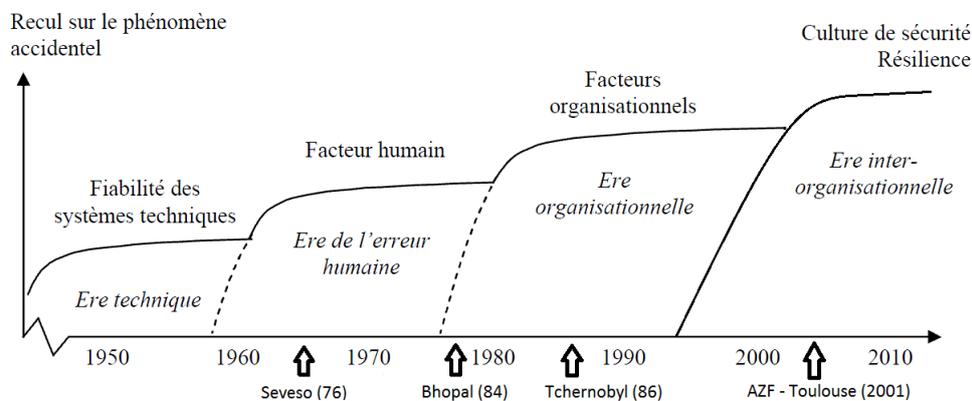


Figure 3. Evolution des approches du management de la sécurité (adapté de Groeneweg, 2002 et de Wilpert et Fahlbruch, 1998)

FIGURE 2.6: Évolution des dispositifs de gestion de la sécurité (adapté dans la thèse de Gambon [33]).

Influence du facteur humain

Des exemples simples d'accidents de la vie quotidienne au domicile ou sur la route et des phénomènes de plus grande ampleur ont montré clairement que l'erreur humaine doit absolument être prise en compte dans la gestion de la sécurité. Des approches fiabilistes conçues par des ingénieurs associent l'erreur à un manque de formation ou à un problème de sélection du personnel. Les psychologues ont aussi leur approche qui caractérise l'erreur humaine comme étant une déviance par rapport à l'intention de l'individu, ce dernier étant influencé par plusieurs facteurs tels la fatigue, le stress ... Fiabilistes et psychologues se sont rejoints sur le fait que le facteur humain est l'une des sources à ne pas négliger dans la genèse ou l'aggravation des accidents. Les ergonomes quant à eux contestent l'approche trop réductrice qui explique qu'un accident se produit soit par la faute d'une défaillance technique soit à cause d'une erreur humaine. Ils considèrent qu'un accident provient d'un mauvais couplage entre l'opérateur et son environnement de travail. Les retours d'expérience suite aux catastrophes industrielles des années 80 (Tchernobyl, Bhopal ...) ont confirmé l'hypothèse posée par les ergonomes que la faille trouve généralement ses sources dans une dimension organisationnelle du travail [154].

Approche organisationnelle de la sécurité

La dimension organisationnelle proposée par les ergonomes se développe à partir des années 80. Le défi consiste dans l'étude de l'organisation et de l'environnement dans lequel évolue l'opérateur. Un accident est alors vu comme la conséquence d'un environ-

nement organisationnel amenant l'opérateur à commettre des erreurs. En fait, l'erreur humaine ne sera pas mise de côté mais la manière de l'appréhender évolue. On ne se contente plus de se fixer sur les erreurs commises par les opérateurs, mais on cherche en amont les mauvaises décisions prises par la hiérarchie ayant provoqué une faille dans le système [153, 154]. Au début du 21^{ème} siècle, les approches dépassent les frontières d'une seule organisation tenant compte du fait qu'une faille dans une organisation peut être provoquée par des facteurs externes à l'organisation. Les aspects multi-factoriels sont considérés qu'ils soient endogènes ou exogènes.

Vers une gestion inter-organisationnelle de la sécurité

Actuellement, les experts profitent des nouvelles avancées scientifiques qui prennent en compte les approches précédentes pour aller au-delà de la frontière de l'organisation [172, 87]. L'approche est systémique et considère le système dans sa globalité et non isolé. Il s'agit d'un système complexe en évolution perpétuelle contenant l'organisation qui interagit avec d'autres entités contraignant son fonctionnement. L'interaction entre les entités peut être sociale, géographique, fonctionnelle ou autre ... Cette approche est novatrice et tient compte de l'approche organisationnelle des années 90 mais considère aussi que des événements extérieurs peuvent influencer la fiabilité de l'organisation.

Par ailleurs, de nombreuses expériences ont montré que l'occurrence d'une crise amène des éléments inattendus ou déviants pas rapport aux scénarii prédéfinis par l'organisation. Dans la thèse d'Ivanne Merle [112], l'auteur conteste le principe de High Reliability Organization (HRO) ¹³ ou organisations à haute fiabilité après avoir analysé une entreprise classée Seveso 2 de bonne réputation en matière de gestion de la sécurité. Elle a constaté des signes de fragilité et de contradiction dans leur management de la sécurité. Elle propose une nouvelle approche nommée Normally Reliable Organization (NRO) ou organisation normalement fiable dans la gestion de la sécurité. Les perspectives ne seront plus d'appliquer les consignes définies dans les plans de sécurité, mais de pouvoir « vivre avec » et gérer la déviance collective de l'organisation lors d'une crise par rapport aux plans de sécurité prédéfinis. L'important n'est plus d'empêcher la dérive de trajectoire, mais de la maintenir dans un domaine fiable et de pouvoir la ramener dans son bassin d'attraction initial. Ci-après, nous exposons quelques catastrophes d'origine technologique significatives.

Catastrophe de Seveso (1976, Italie)

Le 10 juillet 1976, un accident se produit au sein de l'usine Icmesa située dans la commune de Meda voisine de celle de Seveso, à 20 km de Milan (Italie), appartenant

13. Principe posé par des chercheurs de l'université de Berkley en 1985. Une organisation est qualifiée HRO si elle est soumise à des exigences de haute fiabilité en raison de ses activités qui sont susceptibles d'induire des conséquences catastrophiques.

à la société Givaudan, filiale du groupe suisse Roche. Une surchauffe au niveau d'un réacteur fabriquant du trichlorophénol (suspecté d'être cancérigène) a provoqué la libération d'un nuage rouge, par la cheminée de l'usine, s'élevant dans l'atmosphère¹⁴. Le panache se propage au sud-est de l'usine sous l'effet d'un vent à 4 m/s.

Dès le lendemain, la végétation est brûlée, des enfants ont de la fièvre et des animaux meurent par dizaine. Les médecins ignorent totalement la thérapie à appliquer. Ce n'est qu'après 10 jours que le groupe chimique annonce que le nuage libéré contient de la dioxine¹⁵. Ceci pousse les autorités, 4 jours plus tard, à l'évacuation de près de 700 personnes habitant dans les zones proches touchées alors que la population avait continué à consommer des produits locaux depuis la catastrophe [44].

Les conséquences environnementales sont importantes, 2000 ha de sols contaminés, 3300 animaux trouvent la mort et on abat 78000 bêtes environ. Sur le plan sanitaire, on n'a pas signalé une hausse de la moyenne des malformations et de cancers après la catastrophe. En revanche, des décès dus à des problèmes cardio-vasculaires ont été signalés par la suite dans la zone touchée. Quant au bilan économique, les activités dans la zone la plus touchée par le panache ont été interdites (entreprises, exploitations agricoles, jardins potagers ...), des travaux de décontamination de sols et habitations ont démarré et le groupe chimique a dédommagé les habitants, les entreprises et l'État.

La commission d'enquête a souligné des anomalies de fonctionnement de l'usine. Parmi elles, l'absence d'un contrôle automatisé de production, une ignorance sur le danger que peut provoquer le trichlorophénol, l'absence d'une chambre étanche pour retenir le gaz en cas de fuite, des modifications dans le processus de fabrication par rapport au brevet initial ont été signalés [99].

De part l'importance de cette catastrophe qui est sûrement loin d'être la plus grave des accidents chimiques (voir catastrophe de Bhopal dans la section 2.3.2), nous avons choisi dans ce manuscrit de développer celle de Seveso pour souligner les enseignements tirés de cet accident au moins au niveau européen. En effet, les autorités locales italiennes n'étaient pas au courant des substances chimiques utilisées par l'établissement, ce qui les a rendues incapables de gérer de manière adéquate la crise. Le Conseil de l'Europe a alors décidé de mettre en œuvre une directive nommée Seveso pour inciter les États européens à appliquer une politique commune sur la prévention des risques industriels.

Catastrophe de Los Alfaques (1978, Espagne)

Dans le cadre de la présente thèse, nous nous intéressons à l'influence de la structure du réseau routier sur la vulnérabilité des enjeux, justifié par le fait que lors d'une

14. Wikipédia (révisé en mars 2010) : http://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_de_Seveso.

15. C'est une molécule chimique qui peut induire des effets nocifs chez l'homme lorsqu'elle est apportée par l'alimentation. La 2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-p-dioxine ou TCDD, surnommée dioxine de Seveso (en référence à la catastrophe de Seveso) est l'une des dioxines les plus toxiques pour l'homme, et la seule considérée comme cancérigène.

évacuation, les personnes utilisent principalement celui-ci pour fuir le danger.

Pour cette raison, nous avons choisi de parler d'une catastrophe qui a eu lieu lors d'un transport de matières dangereuses à Los Alfaques en Espagne le 11 juillet 1978. Un camion transportant 25 tonnes de propylène¹⁶ heurte le mur d'un camping. De grandes quantités de propylène s'échappent dans l'espace environnant, se gazéifient et, mélangées à l'air, s'enflamment, provoquant une violente explosion. Une boule de feu à 1000°C se forme entraînant la mort de 217 personnes et la destruction du camping¹⁷.

C'est le désordre total dans la demi-heure qui suit l'accident. Les services de secours sont mal organisés et le nombre d'ambulances est insuffisant pour transporter les blessés et les morts [5]. Il a fallu environ 3 heures pour transporter toutes les victimes. Le camion en feu bloque la route, divisant les blessés en deux groupes dont l'un est transporté vers le nord et l'autre vers le sud, où il y avait, semble-t-il des hôpitaux à des normes semblables et à des distances comparables.

L'accident est dû à une surcharge du camion par la raffinerie « Entrepol ». Cet accident a montré des lacunes dans les dispositifs de sécurité et d'organisation des différents services. Par la suite, l'État a mis en place de nouvelles dispositions telles que l'arrêt du transport de propylène sur le réseau routier et l'ajout de soupapes de surpression sur les citernes transportant des produits inflammables, la définition de routes spécifiques à ces camions pour éviter qu'ils passent dans des zones peuplées et vulnérables et l'amélioration de la coordination inter personnels s'occupant de la sécurité des individus (secours, hôpitaux ...) [107].

Accident de transport de matières dangereuses à Toronto (1979, Canada)

Un convoi ferroviaire de 3 locomotives et 106 wagons dont 38 contiennent des produits qualifiés de dangereux a vu deux wagons dérailler en s'approchant de Toronto. Les autres wagons se sont empilés les uns sur les autres, ce qui a causé quatre explosions successives. Les officiels n'étaient pas au courant du contenu des wagons empilés. Il a fallu cinq heures pour infirmer le fait qu'un wagon contenait du polychlorobiphényle, produit extrêmement dangereux susceptible de se décomposer à haute température en une série de produits très toxiques.

Trois heures et demie après l'accident, les pompiers confirment la présence d'un wagon contenant du chlore. Le lendemain, le wagon de chlore qui reposait contre deux wagons de propane à risque élevé d'explosion était fissuré sur 80 centimètres et le vent qui tournait a obligé l'éloignement la population. Deux jours après l'accident, 6 évacuations successives ont été menées, soient 240 000 personnes. Quatre jours plus tard, la

16. Le propylène ou propène (nomenclature International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)) est un produit chimique organique ayant une double liaison. De ce fait, il est insaturé et apte à être transformé en une multitude d'autres produits. À température et pression ambiantes, le propylène est un gaz. Il est incolore et inodore (comme la plupart des hydrocarbures simples) et hautement inflammable.

17. Wikipédia, révisé le 17 juillet 2010, disponible sur l'adresse http://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_de_Los_Alfaques.



Source : Direction générale du transport des marchandises dangereuses - Canada
<http://www.tc.gc.ca/tmd/menu.htm>

FIGURE 2.7: L'accident ferroviaire de Mississauga-Toronto le 10 novembre 1979.

zone évacuée a été réouverte à la population.

Dès le premier jour, un poste de commandement se met en place, les hôpitaux sont prévenus, des ambulances et des autobus envoyés sur les lieux pour transporter les personnes sans voiture, des centres d'évacuation ouverts avec l'aide de la Croix Rouge. Une fois confirmée la présence d'un wagon de chlore, les policiers s'éloignent du site et 4 hôpitaux reçoivent l'information et se préparent, la première évacuation est terminée. Le vent change de direction, ce qui pousse à modifier le plan d'évacuation en se dirigeant vers le nord. De plus, le premier centre d'évacuation contenant des milliers de personnes devient saturé. Deux autres centres d'évacuation sont ouverts et la deuxième phase d'évacuation est terminée. Les vapeurs s'étendent loin avec la direction du vent et une troisième phase d'évacuation survient. Quelque temps après, l'hôpital de Mississauga se situant à la limite de la zone de danger reçoit l'ordre d'évacuer après l'observation d'une fumée noire s'approchant dans sa direction. D'autres zones et centres de mise à l'abri ont été évacués selon le changement de la direction du vent.

Différentes causes ont provoqué cet accident. On peut souligner une négligence technique (l'essieu d'un des wagons a cédé par manque de lubrifiant), un transport de matières dangereuses près d'une zone urbanisée et un manque de prévention par rapport au transport ferroviaire. L'accident de Toronto est un événement grandeur réelle que les autorités canadiennes, ainsi que les organisations non officielles ont su très bien traiter du fait de leurs expériences sur des événements passés (explosion de gaz naturel en 1969, incendie de raffinerie nécessitant une évacuation de 1000 personnes en 1978 ...) dont elles ont tiré des leçons en changeant la réglementation du transport des matières dangereuses au Canada et en élaborant des plans d'évacuation dans différentes communes canadiennes [99].

Catastrophe de Bhopal (1984, Inde)

Le 3 décembre 1984, une explosion survient au sein de l'usine Union Carbide (Dow Chemical maintenant) située dans la ville indienne de Bhopal. Suite à l'explosion, 40 tonnes de pesticides se libèrent dans l'air, affectent environ 350000 personnes et entraînent la mort subite de 3800 habitants et de plus de 25000 à long terme [103], des brûlures de poumons, malformations, stérilités, cancers ... Pour se débarrasser du gaz restant¹⁸, il a fallu faire refonctionner l'usine. Les habitants ont fui en masse les lieux de manière désorganisée.

Bhopal est un cas d'école qui présente les caractéristiques d'une catastrophe aux propriétés complexes mais également prévisibles! Sans en faire une analyse complète, on pourra pour cela se référer à [60], nous pouvons cependant mettre en avant certaines causes de dysfonctionnement en retraçant la chronologie des événements, la nuit du 2 au 3 décembre 1984 :

- 21h15 : lavage d'un tuyau communicant avec le silo où est stocké le Methylisocyanate (MIC), c'est un produit très toxique réagissant à l'eau. L'eau est injectée dans le réacteur.
- 22h20 : la pression à l'intérieur du réacteur est de 0.14bar.
- 23h00 : la pression monte jusqu'à 0.69bar, picotement des yeux, fuite restreinte de MIC.
- 23h30 : la fuite est localisée et le contrôleur est prévenu.
- 00h15 : la pression monte à 2.07bar.
- 00h30 : la pression continue à monter pour atteindre 3.79bar. Le chef de service est prévenu, le couvercle du silo se fend, la valve de sécurité saute et le nuage mortel s'échappe sur le bidonville de Bhopal.
- 01h00 : l'alarme est déclenchée.
- 02h30 : la valve est refermée.
- 03h00 : les autorités sont prévenues.

18. Wikipédia, révisé le 16 juillet 2010 disponible sur l'adresse : http://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_de_Bhopal.

Les dysfonctionnements mis en évidence avec pour référence le schéma de la figure 2.6 sur l'évolution des dispositifs de la gestion de sécurité, sont à la fois techniques, humains, organisationnels et inter-organisationnels, mais également sociaux, stratégiques et politiques.

Un dysfonctionnement organisationnel et une erreur humaine ont conduit à injecter l'eau dans le réacteur. Les systèmes d'alarme ne fonctionnaient pas, ni les systèmes prévus pour neutraliser le Methyl-IsoCyanate (MIC) en sortie du réacteur en cas d'accident. À tout cela, s'ajoutent des problèmes de communication et de culture qui conduisent à donner l'alerte très tardivement mais également un dysfonctionnement réglementaire ayant permis une urbanisation très dense autour du site industriel. L'absence de plan de prévention et l'impréparation à un tel événement ont eu pour conséquence des services de secours incapables d'intervenir et d'évacuer la population.

Nous ne pouvons pas nous contenter de ces explications ; à cela il faut ajouter les difficultés économiques de l'usine Union Carbide qui avait diminué peu auparavant son activité et muté des cadres d'expérience. Des problèmes de communication existaient, les ouvriers lisaient au mieux l'hindi alors que les consignes et documents étaient en anglais. Le dysfonctionnement est organisationnel mais également social. La vision stratégique et politique de l'État et de la société est également en cause.

L'État a minimisé le nombre de victimes et a transigé avec l'usine Union Carbide à hauteur de 470 millions de dollars pour un retrait des poursuites judiciaires, ce qui confirme encore une fois l'acceptabilité du risque beaucoup plus élevée dans les pays en cours de développement que dans les pays développés. L'accident de Seveso, voir 2.3.2, en 1976 n'ayant entraîné aucun mort mais pour autant largement médiatisé, a donné naissance à la directive européenne qui porte la même appellation, alors que la catastrophe de Bhopal a donné lieu à un simple règlement financier et génère encore des victimes.

Catastrophe de Tchernobyl (1986, URSS - Ukraine)

L'industrie nucléaire a établi une échelle de risque allant de 0 jusqu'à 7. Le niveau 7 n'a été atteint qu'avec la catastrophe de Tchernobyl en Ukraine le 26 avril 1986, ce qui en fait l'accident nucléaire civil le plus grave jusqu'à présent. La centrale nucléaire de Tchernobyl a explosé lors d'un test d'alimentation de secours. Ce genre de test est essentiel au cas où une rupture de courant électrique survient. Ce jour-là, un problème de surchauffe a eu lieu dans l'un des réacteurs qui n'a pas été refroidi de manière suffisante, ce qui a augmenté la pression dans le cœur du réacteur nucléaire et a provoqué par conséquent son explosion¹⁹. Des particules radioactives ont donc été libérées dans l'atmosphère.

19. Wikipédia, révisé le 5 juillet 2010, disponible sur l'adresse http://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_de_Tchernobyl.

20. Disponible sur http://www.dissident-media.org/infonucleaire/tcherno_news.html.



FIGURE 2.8: Catastrophe de Tchernobyl en 1986²⁰.

De multiples causes directes et indirectes ont mené à la catastrophe. Parmi les causes directes, le réacteur était mal conçu, instable et sans enceinte de confinement. Initialement prévu un jour plus tôt, le test a été repoussé car une autre centrale électrique est tombée en panne et le centre de régulation de Kiev a confirmé l'autorisation pour faire le test la veille de l'accident à une heure tardive. Plusieurs consignes de sécurité ont été négligées par les opérateurs et le directeur de la centrale n'était pas un spécialiste du nucléaire mais de la thermodynamique. Enfin, un manque de contrôle sur le respect des normes de construction de la centrale est aussi l'une des causes indirectes et bien antérieures à la catastrophe [77].

Les conséquences de la catastrophe ont été énormes au niveau humain, économique, écologique, sanitaire et politique. L'enjeu le plus urgent était d'éteindre l'incendie suite à l'explosion et la combustion de graphite²¹ qui, mélangé au magma provoque un nuage de fumée radioactive. Des dizaines de milliers d'ouvriers sont intervenus dans l'urgence (militaires, sapeurs pompiers, pilotes d'avion ...) sans forcément mesurer les vrais risques encourus. Ceux qui sont intervenus au début ont trouvé la mort et certains sont

21. Le graphite est un minéral qui est, avec le diamant, la lonsdaléite et la chaoite, l'un des allotropes naturels du carbone ; c'est un élément natif qui se trouve surtout dans les sédiments de métamorphisme régional mais, selon les roches, il peut se former aussi à partir du charbon organique, du magma ou par réduction des carbonates. Il est utilisé comme modérateur dans des réacteurs nucléaires.

décédés suite à un cancer de la thyroïde, de la peau ou des os. Des malformations ont été signalées aussi chez les descendants de ces ouvriers.

Plus de 200 000 personnes ont été évacuées en plusieurs étapes (jusqu'en août 1986) dont 130 000 sans retour. Quelques semaines plus tard, le nuage radioactif a recouvert près de 40% de la superficie de l'Europe [141]. L'évacuation n'a commencé que le 27 avril, lendemain de la catastrophe alors que la population a poursuivi ses activités normales le jour de l'accident.

Accident AZF à Toulouse (2001, France)

L'accident est survenu dans l'usine « Grande Paroisse » à Toulouse. Cette usine, située à 3 km du centre ville, fabriquait des engrais azotés et produisait également la synthèse de dérivés chlorés. L'établissement était classé Seveso 2 (seuil haut) en raison de la présence de matières dangereuses comme l'ammoniac, le chlore ... et il était soumis par conséquent au POI visant les mesures d'urgence en cas d'accident limité à l'intérieur de l'établissement et au PPI, plan établi par le préfet et mis en œuvre quand un sinistre s'étend à l'extérieur de l'usine [45].

Le 21 septembre 2001, une énorme explosion a touché un hangar situé dans le secteur nitrates de l'usine. La population a ressenti cette explosion à plusieurs kilomètres. Elle correspond à une magnitude de 3.4 sur l'échelle de Richter. Peu après l'explosion, un nuage poussiéreux s'est formé et a pris la direction nord-ouest. Par mesure de précaution, la préfecture a demandé à la population de se confiner malgré les dommages importants ayant touché de nombreuses habitations.

Le bilan des dégâts est lourd aussi bien sur les enjeux humains qu'économiques et environnementaux. Au niveau humain, il y a eu 31 morts, 29 blessés et 2442 personnes hospitalisées ... Au niveau environnemental, des polluants chimiques ont été dispersés et des produits azotés ont pollué la Garonne. Une mortalité de poissons a également été signalée. Au niveau économique, environ 25 000 logements ont été endommagés dont près de 11 000 gravement. Près de 1300 entreprises embauchant environ 20 000 salariés ont été endommagées et un hôpital a été touché. Les pertes économiques évaluées par les assureurs varient entre 1.5 et 2.3 milliards d'euros. Les télécommunications ont été perturbées dans un rayon de 100 km et les lignes téléphoniques ont été saturées pendant des heures, démontrant l'importance de mettre en place au service de la population des solutions de diffusion de messages de proche en proche par des technologies WIFI ou BLUETOOTH s'affranchissant d'infrastructures de communication, particulièrement utile dans ce cas [74]. Heureusement, aucun effet « domino » ne s'est produit bien que l'usine soit entourée par des établissements classés Seveso (ex : la Société Nationale des Poudres et Explosifs (SNPE) qui contient des wagons de phosgène²²).

22. Le phosgène, aussi nommé dichlorure de méthanoyl, oxychlorure de carbone ou dichlorure de carbonyle est un gaz très toxique à température ambiante, qui appartient à la classe des agents suffocants, comme le dichlore, le sulfure d'hydrogène ou le dibrome.

Aucune hypothèse n'a été mise à l'écart pour déterminer la cause de la catastrophe. Le rapport des experts qui ont enquêté propose la thèse d'un accident chimique dû au Dichloro-s-triazinetrione de sodium (DCCNa)²³ versé par erreur sur 500 kg de nitrate d'ammonium 20mn avant l'explosion [45].

Des mesures de sécurité ont été mises en œuvre pendant et après la catastrophe. De nombreux bâtiments et écoles dans la zone d'impact ont été évacués et un périmètre de sécurité de 500 m a été défini autour du site. La population a reçu un ordre de confinement suite à la propagation du nuage poussiéreux et des masques ont été distribués aux personnes proches du site. Le PPI a été levé une semaine après le sinistre.

Le retour d'expériences est une étape primordiale qui survient après un accident. Dans ce cadre, la méthode d'estimation des risques a été déclarée insuffisante et la prise en compte des scénarii les plus improbables pouvant entraîner, d'après la courbe de Farmer (voir figure 2.2), des conséquences extrêmement graves, devaient être analysées. En pratique, aucun scénario d'explosion d'ammonitrates n'avait été envisagé. Dès lors, certains seuils de la directive européenne Seveso ont été modifiés par une intensification du contrôle des dépôts de nitrate d'ammonium et par une redéfinition de la gestion des espaces autour des installations qualifiées de « dangereuses » afin de réduire l'exposition des personnes à proximité. Une loi a été votée le 30 juillet 2003 sur la prévention des risques technologiques et naturels permettant, sans être exhaustif, l'information transparente de la population, la maîtrise de l'urbanisation autour des établissements à risque, une meilleure coordination inter acteurs intervenant sur un site et une meilleure indemnisation des victimes d'accidents industriels [45].

Enseignements tirés en France de quelques catastrophes technologiques

Au fil du temps, l'évolution des risques a provoqué des catastrophes générant des pertes humaines et économiques. Certes les études de danger par les établissements à risque, la prévention et l'alerte sont primordiales dans la lutte contre le risque, pour étant, il ne faut pas négliger l'importance du retour d'expérience sur les accidents passés. En France et en Europe, un ensemble de réglementations a été mis en place suite à plusieurs catastrophes s'étant produites en Europe et dans le monde entier. Ceci permet d'apprendre des lacunes du passé pour une meilleure prévention et gestion des risques dans des éventuels événements futurs. Nous avons sélectionné quelques événements marquants de la base de données Analyse, Recherche et Information sur les Accidents (ARIA)²⁴ qui ont conduit à des changements de réglementation en France. Ces événements et les enseignements tirés sont illustrés dans le tableau 2.1.

23. Le DCCNa est une source stable de chlore libre. Il est utilisé comme désinfectant, biocide, désodorisant industriel. Il est non combustible mais favorise la combustion d'autres substances. Il provoque l'émission de fumées (ou de gaz) irritantes ou toxiques lors d'incendie. Il présente des risques d'incendie et d'explosion au contact d'agents réducteurs forts, de bases fortes, de l'ammoniaque, de l'urée ou de l'eau.

24. Base de données ARIA, disponible sur l'adresse http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/barpi_4204.jsp.

Un plan d'évacuation prédéfini est indispensable ...

Plusieurs catastrophes naturelles et technologiques nous ont appris que l'élaboration de plans d'évacuation prédéfinis est nécessaire pour mieux organiser les évacuations et diminuer par conséquent l'effet de l'exposition des enjeux.

Dans ce chapitre, nous avons essayé de spécifier le contexte général de ce travail de thèse. Nous sommes donc partis de la définition des termes liés au risques. Ensuite, nous avons présenté des événements catastrophiques d'origine naturelle ou technologique ayant marqué l'histoire. Nous avons aussi détaillé le retour d'expérience lié à ces événements. Dans le cadre de la gestion d'une crise, les décideurs ont à prendre une décision qui consiste selon la situation à évacuer ou à mettre à l'abri la population.

Ce travail de thèse a pour but d'amener des éléments de réponse aux décideurs suite à un événement nécessitant une évacuation. Si un accident survient sur une éventuelle zone, nous sommes capables de recenser d'une manière approximative la population dans les bâtiments et sur le réseau routier, d'encercler la zone d'impact pour empêcher les flux entrants vers la zone et de rediriger les flux sortants, puis de lancer une microsimulation de trafic pour calculer enfin le temps nécessaire pour évacuer la zone.

Dans le tableau 2.2, nous listons quelques événements pour lesquels un plan d'évacuation et un système d'alerte nous semblent indispensables afin de limiter les expositions des enjeux. Ceci nous légitime encore plus dans notre travail à compléter un système d'alerte existant par un modèle de simulation d'évacuation tout en étudiant l'influence de la structure du réseau et du comportement des acteurs (évacués, forces de l'ordre, secouristes ...) sur la fluidité des flux.

2.3. Retour d'expériences sur des événements

Catastrophe	Enseignements tirés
Explosion de la poudrerie de Grenelle - France (1794).	Décret impérial de 1810 complété par la législation récente à propos des installations classées et du respect du voisinage et de l'environnement.
Explosion d'un tas de nitrate et sulfate d'ammonium à Oppau en Allemagne (1921) : 561 morts et 1900 blessés.	Les engrais à base de nitrate d'ammonium se fabriquent en granulés.
Explosion d'un lieu de stockage de Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) dans la raffinerie de Feyzin - France(1966) : 18 morts, 84 blessés, 1450 maisons endommagées.	Prévention des accidents de Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE) ^a , modification des modalités d'inspection des installations qui sont confiées au corps des ingénieurs des mines devenue DRIRE ^b (DREAL ^c maintenant).
Explosion d'une usine de production de caprolactame, intermédiaire du nylon à Flixborough - Angleterre (1974) : 28 morts, 89 blessés, 3000 personnes à évacuer et 378 millions de dollars de dégâts.	Loi du 19 juillet 1976 suite à l'accident de Feyzin en 1966 et de Flixborough : nouvelles procédures pour l'autorisation préalable et le contrôle par l'administration, études de danger [52], introduction de la notion d'environnement (non seulement hommes et santé), obligation d'informer le public [114] ...
Catastrophe de Seveso (1976) : fuite de dioxine entraînant l'évacuation de milliers de personnes, contamination de sols, mort d'animaux ...	Mise en œuvre de la directive européenne Seveso en 1982. La directive impose aux États membres de l'Union européenne d'identifier les sites industriels présentant des risques d'accidents majeurs.
Explosion BLEVE à Mexico (1984) : 550 morts, 7000 blessés, 39000 sans abris, 200000 personnes évacuées.	Possibilité d'occurrence d'un BLEVE suite à l'inflammation d'une fuite, éloignement des habitations.
Catastrophe de Bhopal en Inde (1984) : la plus grave catastrophe chimique, usine sans responsable de sécurité, difficultés financières ...	La crainte du risque technologique augmente en France avec l'existence de nombreuses usines Seveso, plus de transparence sociale, transformation du processus de fabrication dans une usine à Béziers fabriquant la même famille de pesticides que Bhopal [1] mais pas de réglementations inspirées de Bhopal dans les pays occidentaux car d'après des experts, il n'y a pas de faille de sécurité comme dans le cas de Bhopal [59].
Explosion de la raffinerie de la Mède (1992, France) : rupture d'une canalisation suivie par un incendie : 6 morts.	Obligation de création de salles de contrôle anti explosion des unités et réseau de détection de gaz.
Accident de stock de nitrate d'ammonium dans une usine à Toulouse (2001) : 30 morts, milliers de blessés, 25000 logements endommagés, 2 milliards d'euros de pertes.	Loi « Bachelot » du 30 juillet 2003, modification des seuils de la directive Seveso, contrôle des dépôts de nitrate d'ammonium, une nouvelle gestion de l'espace autour des installations dangereuses afin de limiter l'exposition des enjeux.
Épidémie de légionellose ^d dans la région de Lens (2003–2004, France) : l'usine Noroxo exploite des Tours Aéro-Réfrigérantes (TAR) fonctionnant en système humide, contamination par des légionelles : 18 victimes et 68 malades.	Recenser les TAR et les classer dans la liste d'installations dangereuses, exiger des mesures strictes de prévention. Chez Noroxo, suppression des opérations susceptibles de contaminer des TAR, modification de conception des circuits, nettoyage permanent de toutes les surfaces en contact avec l'eau [30] ...

TABLE 2.1: Enseignements tirés en France par plusieurs catastrophes technologiques.

a. Les gaz liquéfiés sous pression présentent un risque important en cas de rupture du réservoir : l'ébullition-explosion, ou en anglais BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion).

b. Créée en 1983, elle assurait plusieurs missions liées à l'environnement, le développement durable, l'énergie, la sûreté nucléaire, l'aide aux entreprises ... Les DRIRE ont été réorganisées entre 2009 et 2010. Leurs missions ont été reprises par la DREAL et la Direction Régionale des Entreprises, de la Concurrence, de la Consommation, du Travail et de l'Emploi (DIRECCTE) sauf en Ile-de-France.

c. Sous l'autorité du préfet de la région, elles sont donc chargées d'élaborer et de mettre en œuvre les politiques de l'Etat en matière de changements climatiques, de biodiversité, de construction, d'urbanisme, d'infrastructures de transport, d'énergie ou encore de sécurité des activités industrielles et de prévention des pollutions (bruit, air, déchets, eau, sols).

d. Infection bactérienne pulmonaire causée par des bactéries du genre Legionella.

Catastrophe	Éléments liés à l'évacuation
Inondation aux Pays-Bas (1953)	Évacuation à partir du lendemain de l'accident : 72 000 évacués en total [129]
Catastrophe de Seveso (1976)	700 personnes évacuées : la première évacuation a commencé 14 jours après l'accident et la dernière un mois après
Catastrophe de Los Alfaques (1978)	La catastrophe a eu lieu sur le réseau routier sans besoin d'évacuation (à part les morts et blessés secourus)
Accident TMD de Toronto (1979)	6 évacuations successives, soient 240 000 personnes évacuées en 2 jours, retour à domicile 6 jours après l'accident [99]
Catastrophe de Bhopal (1984)	Pas de plan d'urgence ni de plan d'évacuation prévus [24]
Eruption de Nevado Del Ruiz (1985, Venezuela)	Ordre d'évacuation donné vers 19h00 et annulation quand les cendres ont arrêté de tomber [128]. Le maire redonne l'ordre d'évacuation à 23h00 [3], mais c'est trop tard ...
Catastrophe nucléaire de Tchernobyl (1986)	Évacuations successives à partir du lendemain (200 000 en total dont 130 000 sans retour). Entre temps, la population non informée « vivait sa vie » normalement
Tsunami en Océan Indien (2004)	Pas de système d'alerte pour prévenir la population et lui demander d'évacuer
Ouragan Katrina aux États Unis (2005)	Le maire de la Nouvelle-Orléans ordonne l'évacuation bien à l'avance, une partie de la population n'avait pas accès à des moyens de transport, mise en place de refuges ponctuels et évacuations successives de ces refuges
Débordement de la rivière « Fuhe » en Chine (10 juin 2010)	Évacuation de plus d'un million d'habitants

TABLE 2.2: L'importance d'un plan d'évacuation et d'un système d'alerte pour réduire les conséquences du risque.

OUTILS DE GESTION DU TERRITOIRE

3.1	Le bassin multi risques de l'estuaire de la Seine	52
3.1.1	Les aléas technologiques dans l'estuaire de la Seine	52
3.1.2	Les aléas naturels dans l'estuaire de la Seine	54
3.1.3	Les enjeux dans l'estuaire de la seine	56
3.2	Système d'Information Géographique	56
3.3	Un ensemble cohérent d'outils : SIBARIMAS	59
3.4	Vue globale des outils de la CODAH	67

Notre travail, comme nous l'avons mentionné précédemment (*cf.* 1.2) s'inscrit au sein de l'estuaire de la Seine dans lequel la CODAH constitue un acteur majeur. Dans ce cadre, la CODAH s'est dotée d'une compétence risques majeurs mise en œuvre sous la forme d'une direction qui vient en appui auprès des communes notamment en ce qui concerne (i) la prévention et l'information, (ii) l'élaboration des plans communaux de sauvegarde et de gestion de crise et (iii) la gestion de l'alerte de la population (*cf.* figure 3.1). L'approche du risque retenue est globale et associe la gestion de crise et la prévention [99]. Dans ce contexte de prévention et de gestion, des plans sont élaborés, des outils d'information et d'alerte aux populations sont développés et mis en place. Ainsi, on peut citer par exemple le dispositif de sirènes d'alerte ou les brochures d'information; les difficultés auxquelles est confrontée la CODAH sont les tests en situations réelles et la validation. C'est pourquoi elle s'est dotée d'outils de modélisation et de simulation, notre travail s'intégrant à ce contexte.

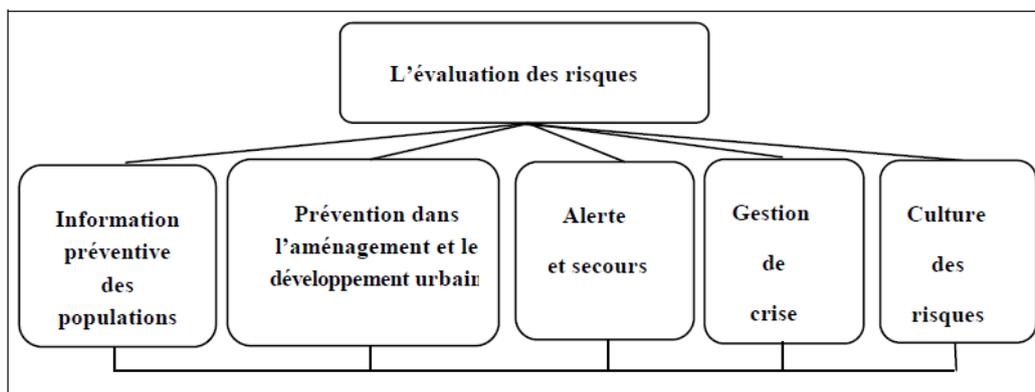


FIGURE 3.1: Approche géocindynique disponible dans [20]. Développement d'une politique déclinée en 6 volets interdépendants constituant les missions des collectivités locales en matière de risques majeurs.

Afin que l'on puisse comprendre cet environnement logiciel, nous allons le présenter, mais il nous semble nécessaire de développer dans un premier temps le contexte spatial local constituant le territoire et les aléas ainsi que les enjeux identifiés.

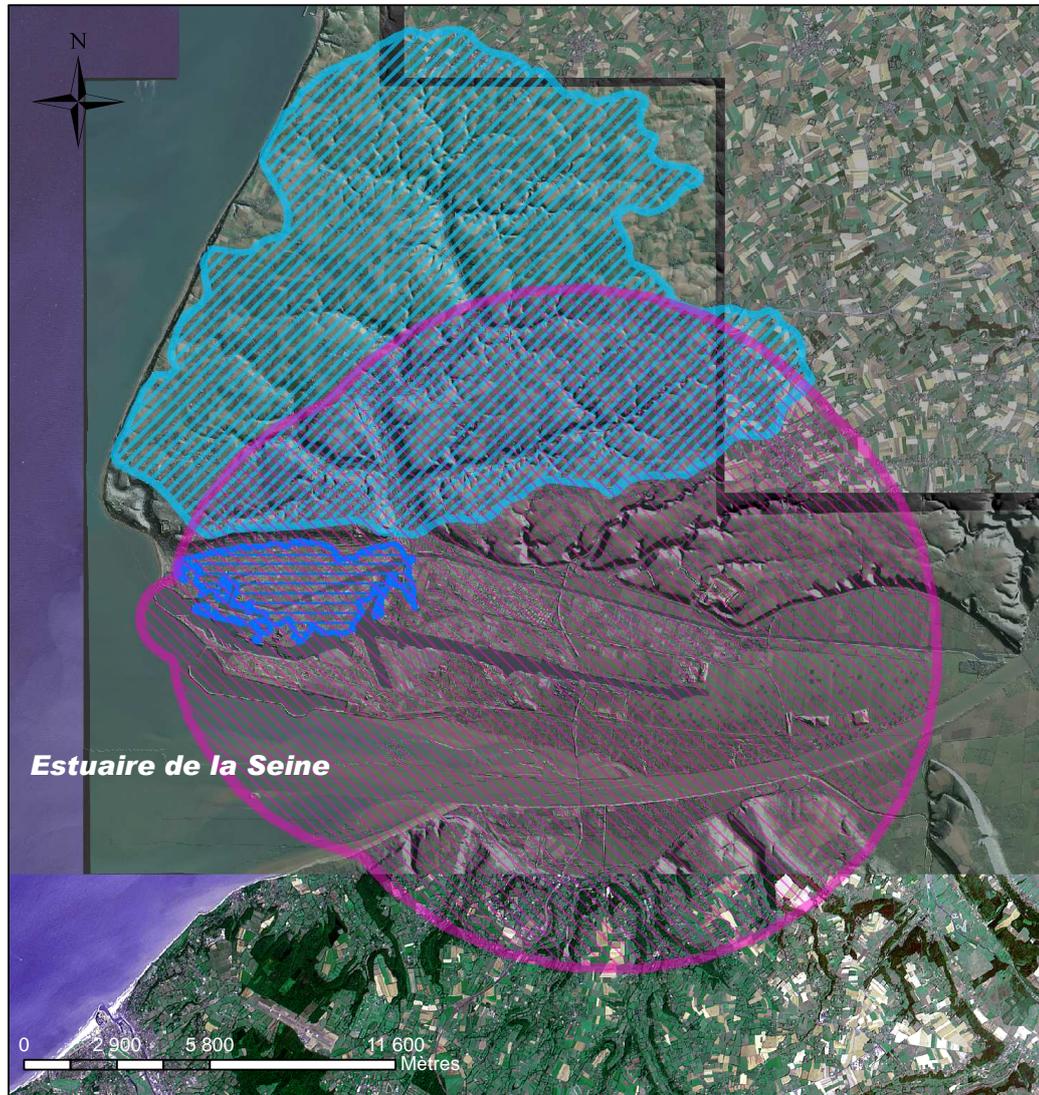
3.1 Le bassin multi risques de l'estuaire de la Seine

La Seine se termine par son estuaire qui constitue l'interface entre la mer, le continent et le fleuve. Cet estuaire comme la plupart est un lieu propice au développement naturel et industriel. Cette dualité forte l'expose de ce fait aux aléas naturels et industriels avec des enjeux forts. L'estuaire de la Seine est un espace complexe regroupant plus de 80 communes englobant celles de la CODAH, soit plus que 320 000 habitants. En s'appuyant sur la base du modèle conceptuel source-effet-cible découlant de la Méthode d'Analyse des Dysfonctionnements des Systèmes (MADS) qui sera détaillé dans le chapitre 4, il apparaît que l'estuaire constitue un bassin multi-risques au sein duquel différents aléas (figure 3.2), et enjeux (figure 3.3) peuvent être identifiés. Le bassin de risques n'est pas un espace défini, borné, administré mais résulte de la combinaison d'objets complexes et évolutifs ... Il s'agit d'un espace où sont présents de nombreux risques naturels et technologiques parfois en interrelation.

3.1.1 Les aléas technologiques dans l'estuaire de la Seine

Le territoire de l'étude est un pôle portuaire et logistique urbain. Il regroupe 33 établissements à haut risque dont la moitié est classée Seveso seuil haut. Nous avons pré-

Bassin multi-aléas CODAH estuaire de la Seine - 2010



Principaux aléas (critère de surface)

-  Aléa industriel
(périmètre PPI 2008)
-  Aléa naturel :
Inondation par la mer - niveau 10 mètres CMH
-  Aléa naturel : Inondation
Ruissellement, crue torrentielle,
débordement de rivière,
débordement de nappe
dans le bassin versant de la Lézarde

- (c) Orthophoto CODAH/GPMH 2008
- (c) MNT Ombré CODAH (LIDAR) 2008
- (c) Spotimage multispectrale 1999
- (c) Syndicat mixte de bassin versant - 2004
- (c) DRIRE - Périmètre PPI 2008
- (c) Ville du Havre - Service sécurité - 1989
- (c) Communauté de l'agglomération havraise
Système d'information géographique d'agglomération
Direction pour l'Information sur les Risques Majeurs

Les aléas pris en compte dans la construction du bassin de risques exposent le territoire de la CODAH.
Ces aléas peuvent avoir leur source dans la CODAH ou à son voisinage.
Cette carte combine (en fonction des données disponibles) en arrière plan une vue satellite, un orthophoplan
et un MNT ombré issu du levé lidar
(CODAH/GPMH)

Carte réalisée par Pascal Mallet & Michel Nabaa - 2010

FIGURE 3.2: Carte multi aléas de l'estuaire de la Seine.

senté dans la figure 1.4 (chapitre 1) des événements dangereux qui se sont produits sur le territoire dont l'inondation du bassin versant de la Lézarde¹ en juin 2003, l'explosion dans une usine au Havre qui a entraîné la mort de 130 personnes en 1915 et l'explosion du pétrolier « Ot Gart » en 1987 qui a fait 3 morts et 10 blessés. Le territoire n'est pas du tout à l'abri du risque. Les nombreuses installations industrielles, ainsi que le transport des matières dangereuses peuvent provoquer des accidents graves dont l'incendie, l'explosion et la propagation de nuages toxiques.

Nous avons mentionné avant ce chapitre que les entreprises et les autorités coordonnent les moyens dans le cadre de la prévention des risques et de la protection des enjeux. Les industriels mènent des études sur le risque et ses conséquences et sont sujets à des contrôles réguliers par les autorités. Les entreprises à haut risque sont dans l'obligation de définir un POI. Du côté des autorités, le préfet établit et met en œuvre un PPI qui définit les mesures à prendre aux abords des installations ou ouvrages industriels susceptibles de présenter des risques [56]. Un périmètre de danger doit considérer théoriquement les scénarii de danger de la façon la plus pessimiste possible par précaution, pouvant toucher toutes les installations de façon cumulative. Le périmètre illustré en rose dans la figure 3.4 englobe les périmètres de danger de chacune des installations et peut croître ou décroître selon l'évolution des activités industrielles, les politiques de réduction des risques et l'amélioration des connaissances sur le risque.

3.1.2 Les aléas naturels dans l'estuaire de la Seine

De par son emplacement qui constitue l'interface entre la mer, le continent et le fleuve, l'estuaire de la Seine est exposé à différents risques d'origine naturelle comme illustré dans la carte de la figure 3.2. Nous pouvons les classer tout en précisant les mesures préventives comme suit :

- inondation par la mer : élévation de murets portuaires pour lutter contre les événements de surcote marine² ;
- inondation hydrographique : gestion des cours d'eau (entretien et restauration, bassins de retenue, dispositifs d'hydrologie douce) ;
- inondation par ruissellement : construction et gestion d'ouvrages de régulation (bassins d'orage, ...);
- mouvements de terrains associés aux falaises : murs de soutènement, clouage de falaise, entre autres ;
- mouvements de terrains associés aux cavités souterraines : comblement de cavités souterraines (marnières, ...).

1. Une petite rivière de Seine-Maritime qui se jette dans l'estuaire de la Seine à Harfleur (rive droite), après un cours de 14.2 kilomètres.

2. Niveau d'eau observé supérieur à celui prévu, issu du calcul du service hydrographique et océanographique de la Marine (France).

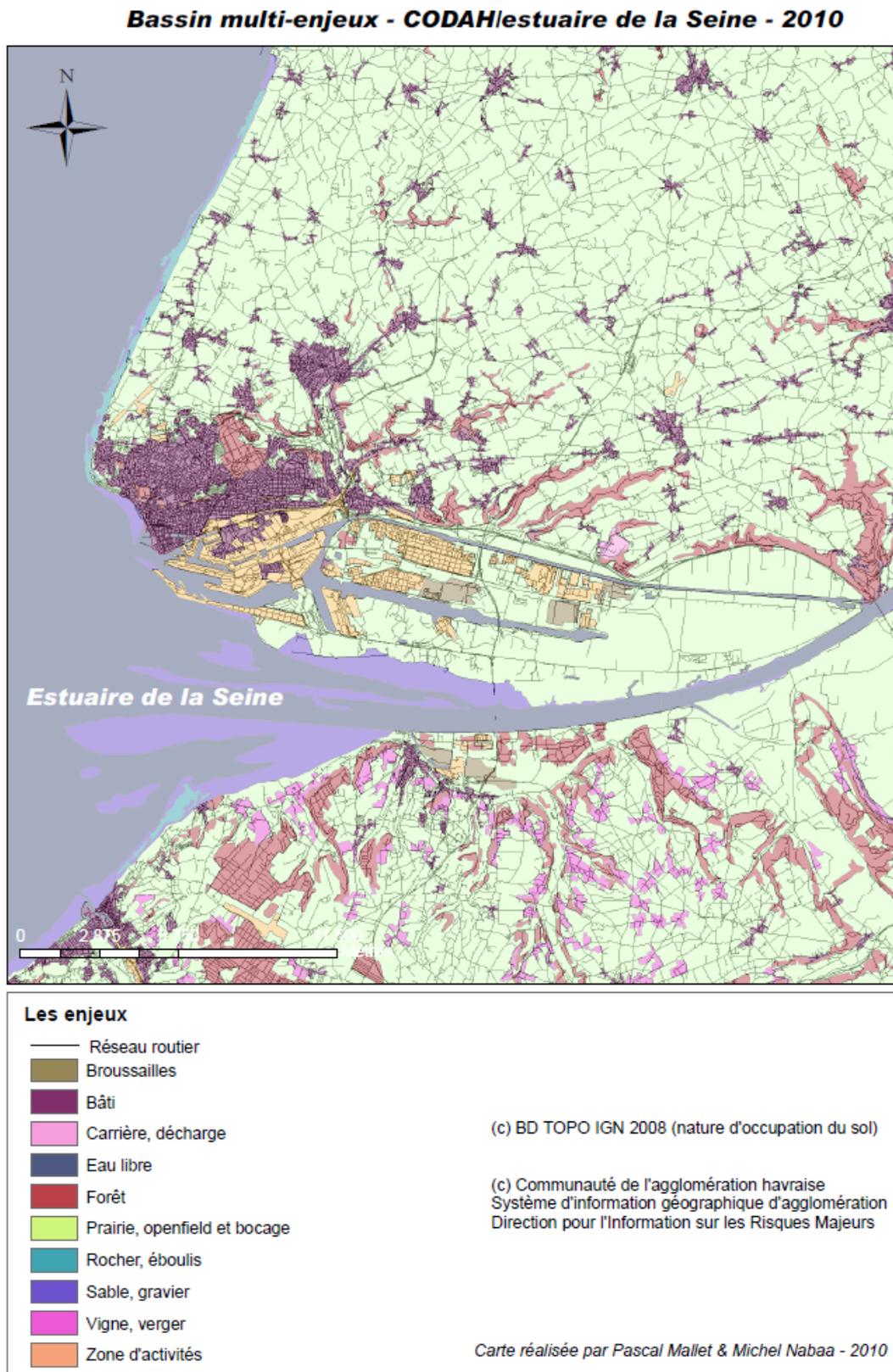


FIGURE 3.3: Carte multi enjeux de l'estuaire de la Seine.

3.1.3 Les enjeux dans l'estuaire de la seine

Depuis plus de deux siècles, les révolutions technologiques aidant, l'estuaire de la Seine s'est anthropisé soumettant l'homme et ses activités, constituant les enjeux principaux, aux aléas que nous venons de détailler. L'estuaire de la Seine en tant qu'anthroposystème est donc le lieu d'exposition des enjeux suivants :

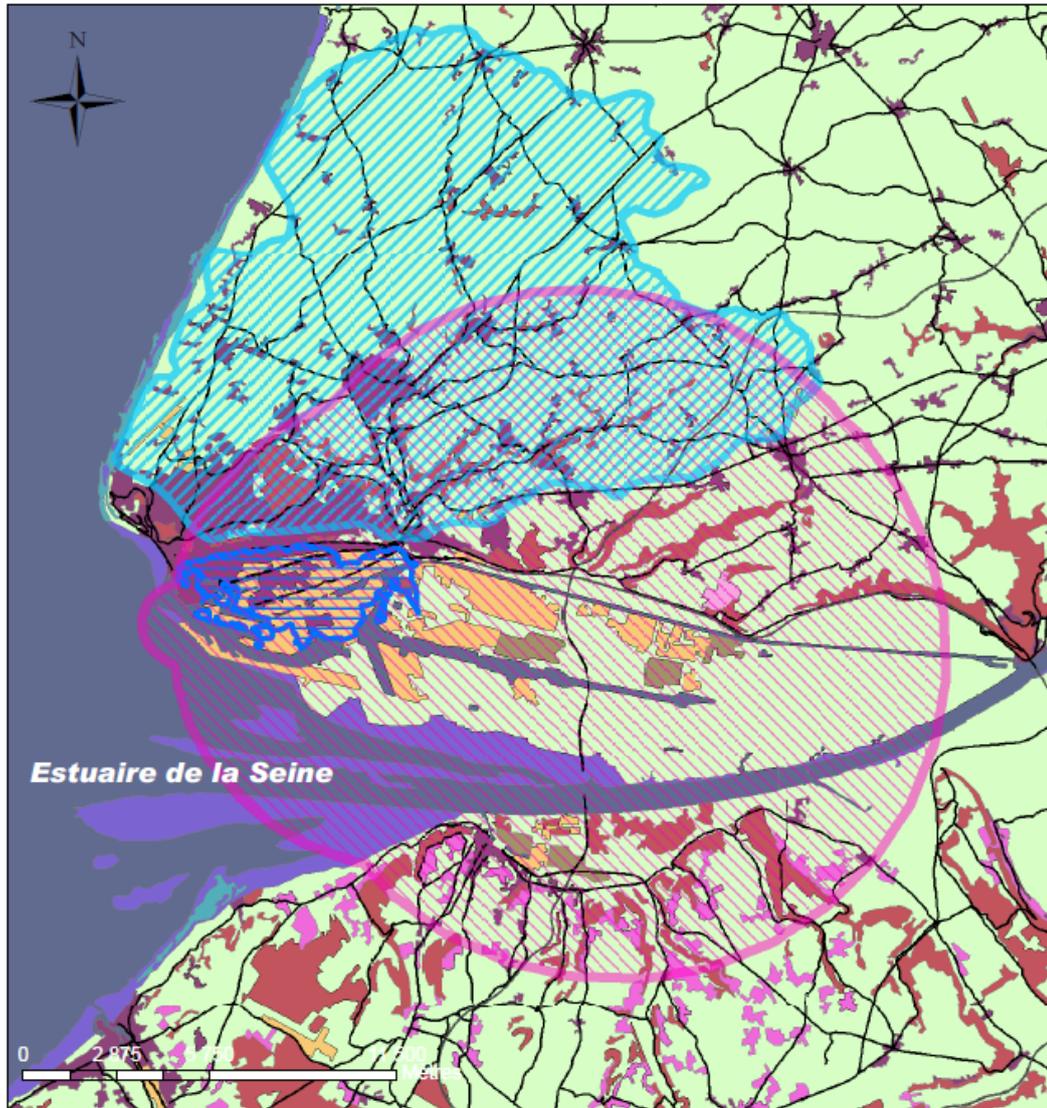
- les enjeux humains : décès, atteintes physiques ou psychologiques...
- les enjeux matériels : biens mobiliers et immobiliers (immeuble, maison, construction, terrain...);
- les enjeux économiques : secteurs primaires (exploitation des ressources naturelles : activité agricole importante, pêche professionnelle), secondaires (nombreux établissements industriels dont 18 classés Seveso) et tertiaires (2 grands ports);
- les enjeux liés à l'aménagement et l'urbanisme : occupation et usage du sol;
- les enjeux touristiques, patrimoniaux (habitats et espèces à haute valeur patrimoniale) et culturels (monuments historiques);
- les enjeux environnementaux (eau, air, sol, écosystème, réserves naturelles...);
- les enjeux socio-éco-techniques (transports : route, fer, voies navigables... et réseaux : eau, énergie, télécommunication);
- les enjeux politiques : État, collectivités, inter-communautés, gouvernances;
- les enjeux liés à l'image du territoire.

3.2 Système d'Information Géographique

L'information géographique symbolise des entités géographiques (objets, phénomènes) localisables à la surface de la terre. Cette information spatialisée est généralement représentée par des cartes, prenant en compte deux composantes dont l'une est graphique (la carte) et l'autre attributaire (légende). Les outils de dessin par ordinateur, les logiciels de cartographie ou de publication assistée par ordinateur présentent des avantages quant à l'exploitation de grosses quantités d'informations et la superposition de différentes couches (ou calques). Néanmoins, (i) les mises à jour sont parfois longues, (ii) le stockage de données attributaires, (iii) ainsi que les croisements de données par des requêtes ne sont pas toujours pris en compte.

Ces lacunes, entre autres, expliquent la naissance du Système d'Information Géographique (SIG). Ce dernier est avant tout un système d'information permettant de saisir, de gérer, d'analyser, d'élaborer, d'afficher, de représenter, d'organiser et de combiner des informations géoréférencées. Intégrées dans le SIG, ces informations forment une base de données géographiques; elles peuvent parvenir de différentes sources (cartes, photos aériennes, base de données, images satellitaires, ...). Le SIG est parfois décrit comme un Système de Gestion de Base de Données (SGBD) localisées. Un projet dans un SIG correspond à une ou plusieurs couches contenant chacune des objets

Bassin multi-risques CODAH Estuaire de la Seine - 2010



Principaux aléas (critère de surface)

-  Aléa industriel (périmètre PPI 2008)
-  Aléa naturel : Inondation par la mer - niveau 10 mètres CMH
-  Aléa naturel : inondations dans le Bassin versant de la Lézarde

Les aléas pris en compte dans la construction du bassin de risques exposent le territoire de la CODAH. Ces aléas peuvent avoir leur source dans la CODAH ou à son voisinage.

(c) BD TOPO IGN 2008 (nature d'occupation du sol)
 (c) Syndicat mixte de bassin versant - 2004 ; DRIRE - Périmètre PPI 2008 ;
 (c) Ville du Havre - Service sécurité - 1989
 (c) Communauté de l'agglomération havraise
 Système d'information géographique d'agglomération
 Direction pour l'Information sur les Risques Majeurs

Carte réalisée par Pascal Mallet & Michel Nabaa - 2010

Les enjeux

-  Réseau routier
-  Broussailles
-  Bâti
-  Carrière, décharge
-  Eau libre
-  Forêt
-  Prairie, openfield et bocage
-  Rocher, éboulis
-  Sable, gravier
-  Vigne, verger
-  Zone d'activités

FIGURE 3.4: Carte multi risques de l'estuaire de la Seine.

spécialisés de même nature (bâtiments, routes, ...), le logiciel permettant de les croiser, les interroger via des requêtes classiques (au sens des requêtes dans un SGBD classique comme Oracle ou SQL Server) ou spatiales et de générer de nouvelles couches de données à partir de ces croisements. Il s'avère important de signaler que les couches coexistantes dans un même projet doivent avoir le même système de projection afin qu'elles puissent être superposées. Les couches peuvent aussi avoir des attributs en commun dans la base de données, ce qui permet alors de les croiser et d'entretenir des relations entre elles comme pour les bases de données classiques.

Par ailleurs, quelques SIG gèrent la topologie, *i.e.* les relations inter-objets pouvant être calculées, permettant d'identifier des points d'intersection, visant à limiter la répétition d'objets superposés ; à titre d'exemple, un champ partageant une limite avec une route doit avoir les mêmes points définis par la route. Toutefois, quelques difficultés et limites sont rencontrées quant à l'utilisation des SIG. Parmi les difficultés, on peut citer :

- la nécessité d'un même système de projection afin de croiser les couches, ce qui n'est pas toujours évident pour des couches ayant un système de coordonnées différent ;
- la lisibilité : le croisement de multiples couches peut rapidement rendre une carte illisible, d'où le recours soit à la diminution de quantité d'informations, soit à la production de plusieurs cartes ;
- le coût élevé de certains SIG avancés ;
- la nécessité de ressources informatiques importantes : le traitement et l'analyse des données peut être couteux en temps et en mémoire ;
- les différentes couches sont parfois étanches et les liaisons parfois utiles ne se gèrent pas facilement. Le problème des mises à jour et de leurs coordinations sur plusieurs couches (mise en place d'une nouvelle voie conduisant à la destruction ou à l'aménagement des bâtiments) est parfois délicat ne serait-ce qu'en raison de la mise à disposition désynchronisée de ces changements ;
- une limite temporelle : le temps est encore difficile à intégrer : représenter un phénomène évoluant dans le temps est toujours un défi. Dans le cadre de notre travail, nous insistons sur cette limite. Afin de simuler le trafic routier, la création d'une couche de véhicules (par exemple) se déplaçant dans l'espace et le temps n'est pas toujours faisable. Pour pallier à cette difficulté, nous avons choisi d'extraire des informations à partir des couches existantes sur le réseau routier afin de construire un multigraphe et de simuler le déplacement des véhicules, ce qui va être présenté en détails dans les chapitres 5 et 9.

Importance des SIG pour les collectivités

Le SIG peut être vu comme un système d'information pouvant intervenir dans un processus d'aide à la décision afin de répondre à des problématiques d'études de phénomènes géographiques au sein d'un territoire. En France, les collectivités se dotent de cet

outil dans la gestion à court et long terme de leur territoire, la CODAH en est un exemple. Servant largement dans différents domaines, sans être exhaustif, il peut être utilisé pour l'urbanisme (permis de construire, cadastres), pour l'aménagement du territoire (occupation du sol), pour l'établissement des statistiques sur la population (exemple : modèle PRET-RESSE pour la CODAH), pour la gestion des réseaux (routier, eau et assainissement, électricité, ...), pour la prévention et la gestion des risques (exemple : SIGRIMAS de la CODAH).

3.3 Un ensemble cohérent d'outils : SIBARIMAS

Dans le cadre de la gestion des risques au niveau de l'estuaire de la Seine, la CODAH a développé le Système d'Information du Bassin de Risques MAjeurs de l'estuaire de la Seine (SIBARIMAS). Ce dernier est composé de plusieurs sous-systèmes dont le SIGRIMAS, la Documentation du système d'information géographique du bassin de Risques MAjeurs de l'estuaire de la Seine (DOCRIMAS) et les outils de MODELisation du bassin de Risques MAjeurs de l'estuaire de la Seine (MODELRIMAS) (voir figure 3.5).

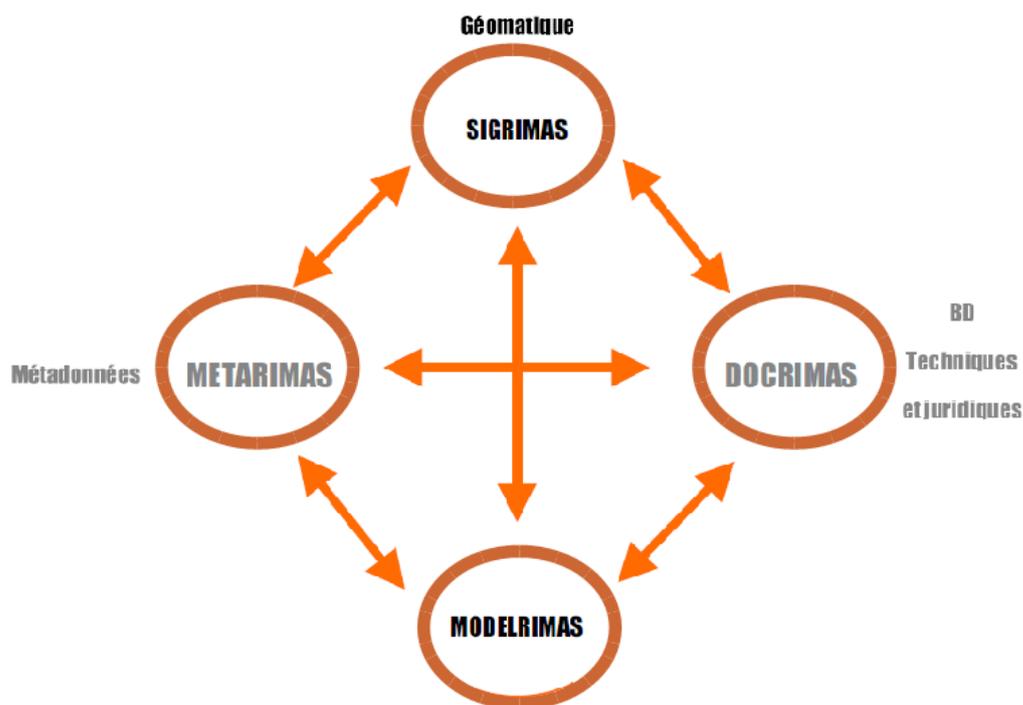


FIGURE 3.5: Architecture de SIBARIMAS.

SIGRIMAS

L'appellation **SIGRIMAS** désigne le Système d'Information Géographique du bassin de Risques MAjeurs de l'estuaire de la Seine développé par la **DIRM** de la **CODAH**. Il s'agit d'un ensemble cohérent d'outils géomatiques. **SIGRIMAS** a vu le jour en 2000 et de nombreuses fonctions lui ont été assignées :

- centraliser toutes les informations liées au risque majeur dans un même référentiel ;
- réaliser des études géocindyniques ;
- disposer d'un espace de travail commun avec les autres services de la collectivité, notamment ceux concernés par les risques majeurs (urbanisme, . . .).

SIGRIMAS est conçu autour de cinq modules interdépendants dont quatre apportent des fonctionnalités et des données de manière décentralisée et le cinquième est destiné à la consultation :

- la Base de données Géographiques du bassin de Risques MAjeurs de l'estuaire de la Seine (**BIGRIMAS**) : une base de données sur les risques majeurs de l'estuaire de la Seine ;
- PlaNet : un module **SIG** apportant des données de référence. Il met à disposition des données numériques de références communes (cadastre, BD TOPO, Orthophotoplan, . . .) ;
- GéoWeb : module de consultation géographique par Intranet et Extranet ;
- module de positionnement qui permet la mise à jour des données sur le terrain ;
- l'atelier « projet géomatique » : il est destiné aux développements et aux expérimentations de la **DIRM** et permet la manipulation de données externes à PlaNet (imagerie, modèle **PRET-RESSE**, . . .).

DOCRIMAS

Il s'agit de bases contenant de la documentation sur des données de matières dangereuses et des données réglementaires.

MODELRIMAS

C'est un ensemble d'outils regroupés permettant de modéliser des phénomènes physiques, mais aussi physico-chimiques pour l'évaluation des différents accidents technologiques et de leurs conséquences (exemple : logiciel de modélisation de propagation de nuages toxiques SAFER Hazmat Responder détaillé ci-après).

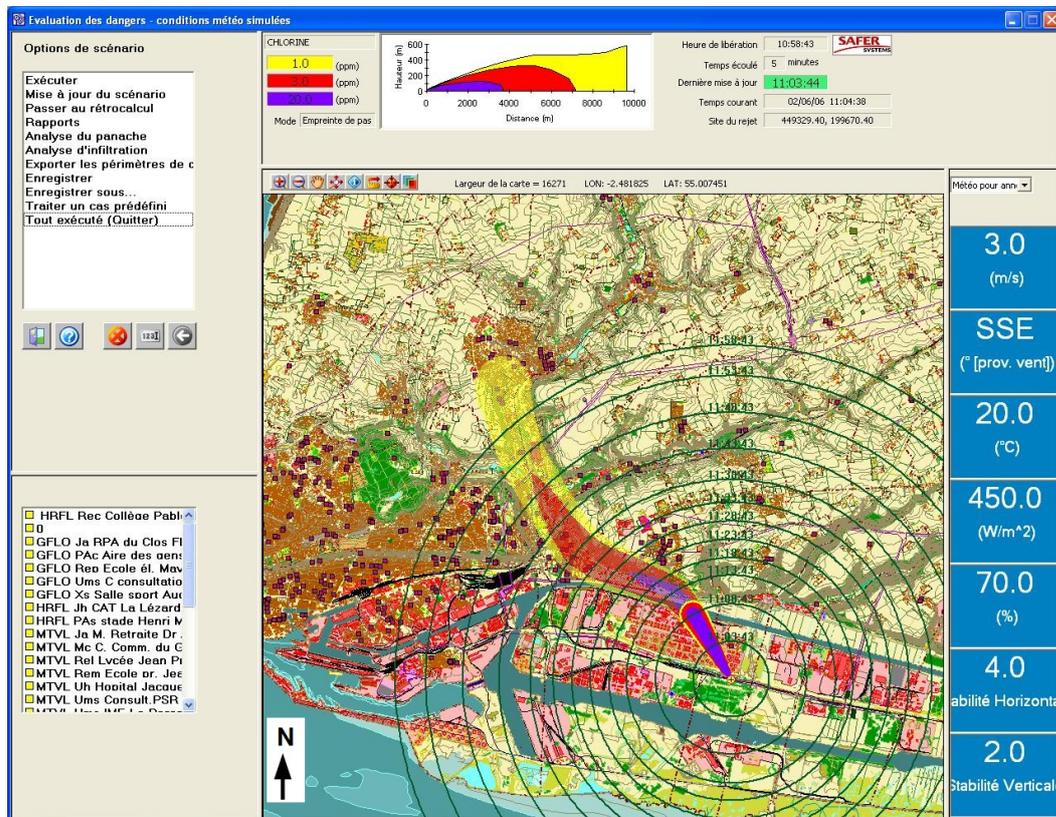


FIGURE 3.6: Propagation d'un nuage toxique avec 3 niveaux de danger dans l'estuaire de la Seine (modélisation SAFER).

SAFER Hazmat Responder : un outil pour la modélisation d'aléas technologiques

SAFER Hazmat Responder est un outil de modélisation des accidents industriels et de leurs conséquences. Il permet de simuler l'effet de propagation d'un nuage toxique dû à un accident produisant des émissions de produits chimiques dans l'atmosphère en environnement complexe, le relief en particulier.

Il est basé sur une plate-forme SIG. Il prend en compte la source du danger, la nature du produit toxique et sa concentration et peut intégrer des données météorologiques en temps réel (direction et vitesse du vent, température, humidité, ...) soit par saisie manuelle soit par un couplage avec des stations météorologiques (projet en cours)[166, 152], ce qui lui permet de recalculer l'impact et la nouvelle morphologie du nuage avec des niveaux de gravité selon la concentration du toxique. En effet, trois zones de couleurs

différentes sont identifiées, selon le niveau d'exposition, comme le montre la figure 3.6 :

- zone en violet : concentration forte nécessitant l'intervention des secours avec l'équipement de protection ;
- zone en rouge : concentration moyenne exigeant une mise à l'abri ou une évacuation ;
- zone en jaune : concentration faible requérant un choix de confinement et d'information pour les populations.

SAFER est utilisé dans l'ensemble **MODELRIMAS** et communique donc avec **SIGRIMAS** comme le montre la figure 3.5. Ce dernier lui fournit des données nécessaires à la modélisation d'un accident et de ses conséquences. En retour, SAFER produit le résultat de la modélisation servant à alimenter **SIGRIMAS**.

CIGNALE

De nombreuses catastrophes d'origine naturelle et technologique se sont passées dans l'histoire soit dans des endroits ne disposant pas de système d'alerte soit parce que le système a été déclenché tardivement ou que le système ne couvre pas tous les secteurs de l'endroit concerné. Le lecteur peut se référer pour cela au chapitre 2.

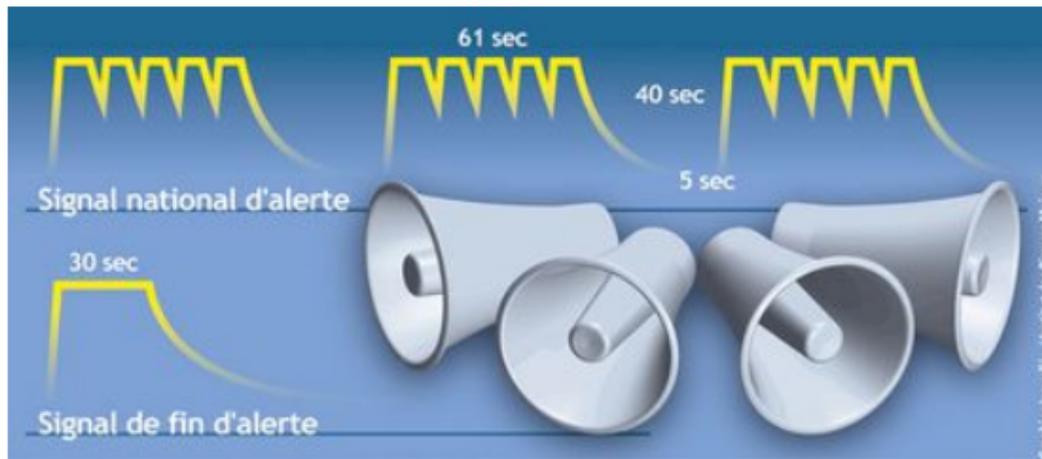
Le Centre Intégré de Gestion d'Alerte de l'Estuaire (**CIGNALE**) est un outil spécifique de gestion de l'alerte et de l'information de la population. Il met en cohérence un ensemble de sirènes couvrant l'ensemble du territoire. Un système de radio autonome assure la surveillance et la maintenance des installations et le déclenchement de l'alerte. Le choix d'emplacement des sirènes sur le territoire se fait grâce à un logiciel de modélisation acoustique qu'on présentera par la suite (**SIRENE**). L'alerte peut éventuellement être complétée si besoin par des véhicules mobiles haut-parleurs, des automates d'appel téléphonique, les services d'urgence ... Le système d'alerte faisant partie de **CIGNALE** permet de contrôler les automates installés à chaque point clé. Le principe de fonctionnement est d'être capable de dialoguer avec tout dispositif dédié à l'alerte des populations à partir d'un centre de commande voire d'un simple téléphone.

SIRENE

Le territoire n'est pas homogène aussi bien du point de vue géographique physique (relief, occupation du sol, bâti) que du côté des activités humaines changeant d'un secteur à un autre.

Les sirènes doivent néanmoins être situées sur l'ensemble du territoire de telle sorte que le signal d'alerte soit audible par la population à n'importe quel moment de la journée et à tout endroit. À titre d'exemple, le signal sonore est susceptible d'être moins audible dans une zone industrielle que dans un quartier résidentiel à cause du bruit

3. Disponible sur le site de l'**ORMES**.

FIGURE 3.7: Le signal national d'alerte³.

de fond généré par les processus industriels. Pour cela, la CODAH s'est dotée d'un outil d'étude de la couverture sonore nommé SIRENE afin d'optimiser l'emplacement des sirènes de façon à ce qu'elles soient entendues par la population.

Il prend en compte de nombreux paramètres comme le relief et les activités générant du bruit et utilise un algorithme génétique permettant de trouver les endroits stratégiques du territoire pour placer les sirènes. La figure 3.8 montre différents niveaux d'audibilité des sirènes au niveau du quartier des Neiges⁴ du Havre par les populations environnantes. Comme le montre la figure 3.7, l'alerte consiste en un signal prolongé répété 3 fois d'une minute 41 secondes chacune et espacé de 5 secondes⁵. La fin d'alerte consiste en un son continu une fois sur 30 secondes. Les consignes d'alerte sont disponibles sur le site de l'ORMES⁶.

Sword

Il s'agit d'un outil développé dans le cadre d'un projet de recherche Agence Nationale de la Recherche (ANR) nommé Technologie pour l'Apprentissage des Risques Majeurs pour l'Animation et la Simulation (TARANIS) avec l'entreprise Masa. À la base, ce projet vise à sensibiliser l'ensemble du territoire national à la gestion de crise. Actuellement, il contribue à la formation sur la gestion des crises et à terme, il constituera un outil de gestion des crises.

4. Quartier implanté en plein cœur de la zone industrialo-portuaire, il est isolé du reste de la ville.

5. arrêté interministériel de 23 mars 2007 relatif aux caractéristiques techniques du signal national d'alerte.

6. http://www.ormes.fr/dossier.asp?DOCS_CLE=253.

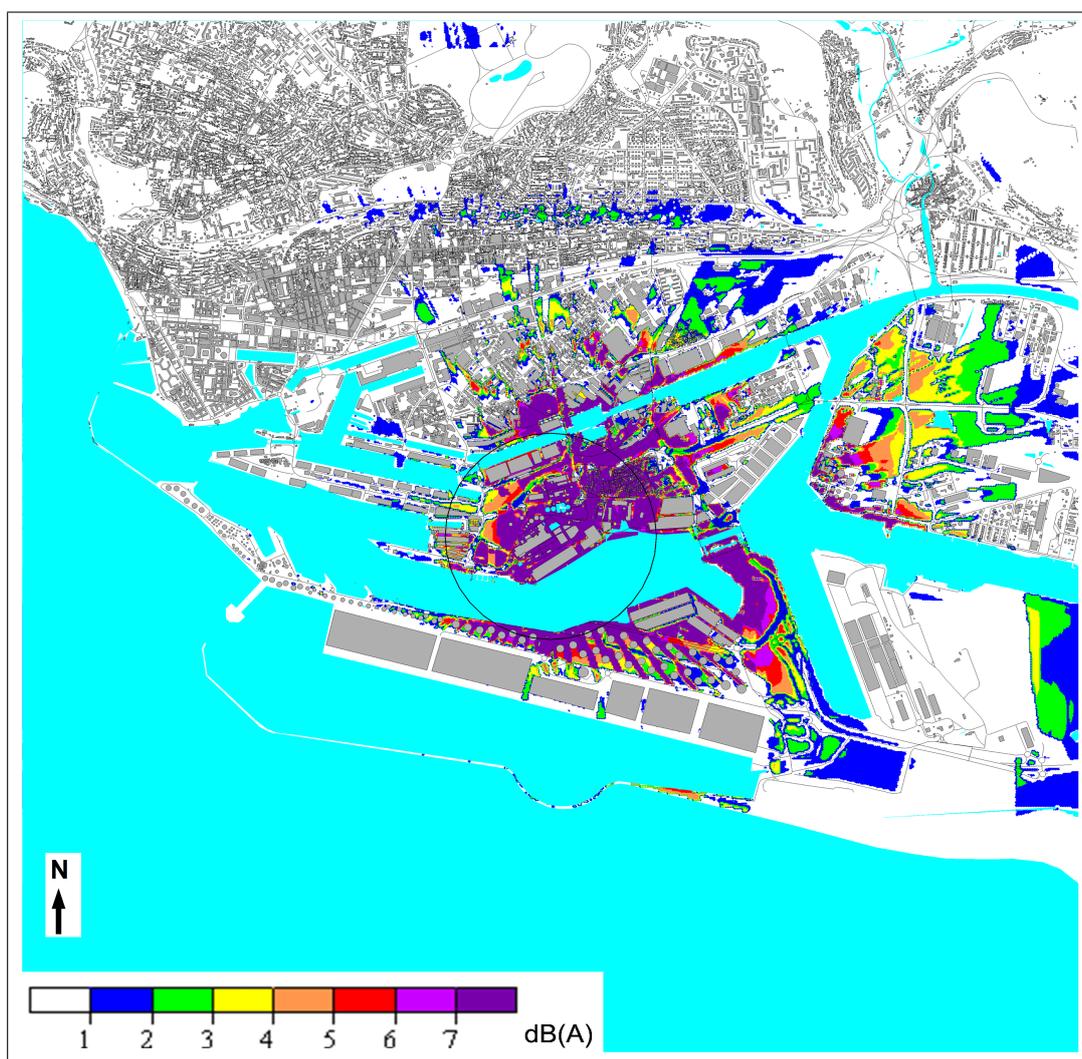


FIGURE 3.8: Un exemple de couverture sonore réalisée grâce au logiciel SIRENE dans la zone industrielle et portuaire du Havre.

Le système d'alerte Météo-France de la CODAH

Suite à une modélisation de la pluviométrie réalisée avec Météo France en 2006 – 2007, la CODAH a installé un réseau de 14 stations météorologiques pour avoir des mesures de pluies (réseau hydro-météorologique de la CODAH). Cela permet de densifier le réseau national Météo-France en vue d'observer la forte variabilité spatiale des pré-

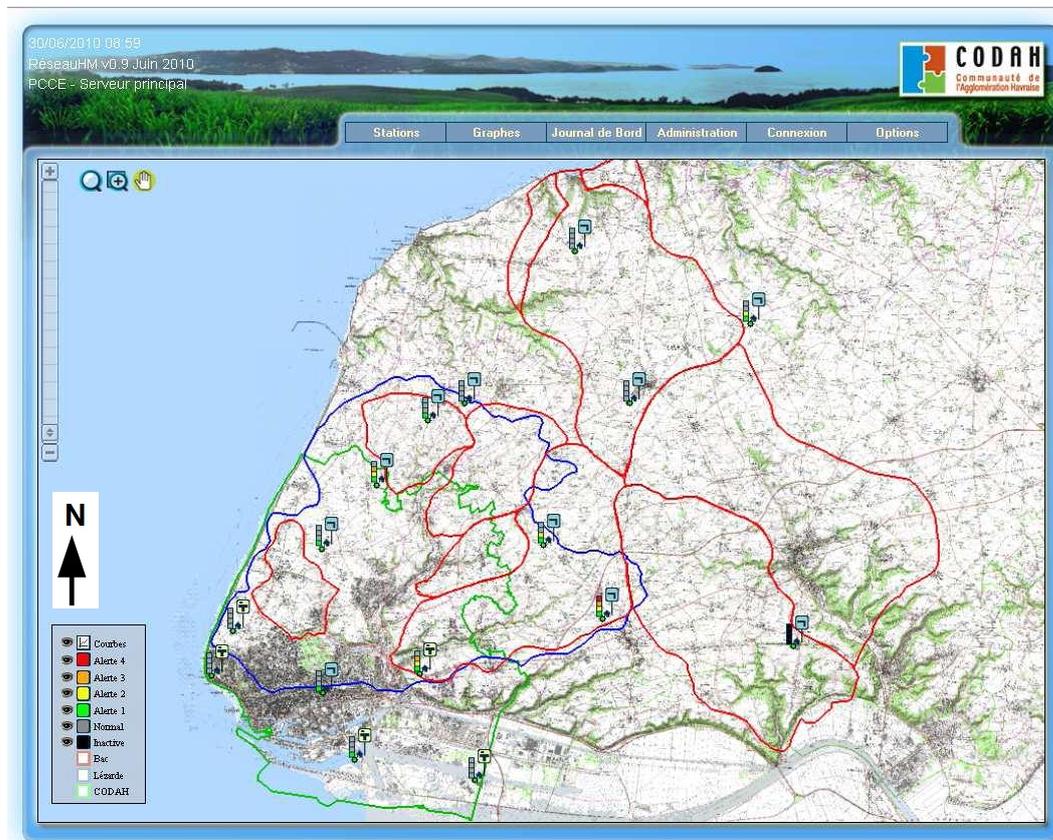


FIGURE 3.9: Copie d'écran de l'outil hydro-météo de la CODAH sur l'arrondissement du Havre.

cipitations dans notre secteur. Un outil nommé Hydro-Météo est à la disposition de la CODAH. Il permet d'accéder à des informations (la pluviométrie, la température de l'air (à 1.5 m), la température au sol, l'humidité, la direction et la vitesse du vent, l'ensoleillement) à partir des stations de mesure installées. Grâce à cet outil (voir figure 3.9), la visualisation de l'état de chaque station et du niveau de vigilance correspondant allant du normal jusqu'au rouge est possible.

La CODAH dispose aussi d'un abonnement « Météo Plus » qui permet une surveillance météorologique consultable par l'astreinte⁷ CODAH. La station Météo-France du Havre transmet au personnel de la DIRM des données concernant les niveaux pluviométriques et les forces du vent attendu, par fax, SMS, téléphone ou courrier électronique. Selon

7. L'astreinte CODAH renvoie tous les messages d'alerte vers les communes du territoire, selon un dispositif graduel, avec une mise en vigilance, une mise en pré-alerte, et une mise en alerte.

qu'il s'agit d'une mise en vigilance, de pré-alerte ou d'alerte, les personnels peuvent informer les maires des communes concernées et assurer le rôle d'intermédiaire et de transmetteur d'information.

MIKE

Il s'agit d'un système de modélisation numérique de réseaux d'eau (rivières, canaux, réseau d'assainissement, ...) ⁸ développé par la société « DHI ⁹ » qui mène des études dans le domaine de l'eau, l'environnement et la santé. Ensemble de modules permettant d'établir un diagnostic des désordres liés à des événements climatiques, il propose des scénarii d'aménagements afin de résoudre les dysfonctionnements actuels et futurs. Les différents événements considérés vont du réchauffement climatiques aux inondations et ruptures éventuelles de digues. Une cartographie de vulnérabilité liée aux inondations concernant le bassin versant de la Lézarde a ainsi été définie. Les données des réseaux d'eau sont gérées comme des couches stockées dans le SIG de la CODAH.

InfoWorks CS

Il s'agit d'un logiciel contenant plusieurs modules permettant de modifier le cycle urbain de l'eau. Parmi ses multiples fonctionnalités, il permet d'étudier l'alimentation et la distribution d'eau potable, les réseaux d'assainissement ¹⁰, ... Il est aussi utilisé au sein de la CODAH pour la modélisation des réseaux d'assainissement et pour la simulation de la submersion marine en milieu urbain. Cet outil est aussi capable d'importer et d'exporter des couches de données géographiques. Le logiciel peut aussi être utilisé pour l'étude des inondations en milieu urbain, la prévision de la pollution et la modélisation de la qualité de l'eau et le transport des sédiments dans le réseau. Il vient en complément de MIKE.

PRET-RESSE

Un modèle d'allocation spatio-temporelle de la population exposée au risque à l'échelle des bâtiments a été développé par la CODAH. Ce modèle nommé PRET-RESSE [20] a posé un certain nombre d'hypothèses sur le comportement des individus. La collecte d'information sur la population a été effectuée à partir de plusieurs bases de données (INSEE, entreprises ...). PRET-RESSE a permis à la CODAH de quantifier la population dans les bâtiments en distinguant leur occupation diurne et nocturne sans toutefois avoir une idée de leur distribution sur le réseau routier. Plus de détails techniques et de résultats sur PRET-RESSE seront détaillés dans le chapitre 6. Dans le cadre de cette thèse, nous avons développé un modèle dynamique permettant de déterminer et de quantifier

8. Site web du produit : <http://www.mike-by-dhi.com/>.

9. <http://www.dhi.fr/Aboutus.aspx>.

10. <http://www.geomod.fr/logiciels/hydro/reseaux/infoworks/cs/infoworks.cs.htm>.

l'évolution des flux sur le réseau routier (voir chapitres 5 et 9) en condition de trafic normale ou lors d'une situation de crise.

Unité de population

Dans un esprit proche de celui de [PRET-RESSE](#), la [DIRM](#) dispose d'une base de données liées au recensement de la population dans les bâtiments des [ERP](#) et des industries, ceci à n'importe quelle heure de la journée dans la limite de la disponibilité d'informations. La base de données contient aussi des informations sur les mesures de protection prises par ces organisations. Ces mesures dépendent de l'efficacité des bâtiments (étanchéité, ...) en cas de confinement et des plans de prévention et de protection du personnel (et des visiteurs). Dans certaines organisations, le personnel est parfois formé et sensibilisé au risque par des exercices de confinement.

D'autres types d'information sur les activités des industries sont parfois aussi renseignées. La base de données « Unité de population » sert en partie à alimenter le logiciel Safer. Ainsi, la hauteur du bâtiment sert à Safer pour désigner plusieurs niveaux de concentration d'un éventuel nuage toxique pouvant atteindre les individus dans le bâtiment. Safer permet donc de calculer une variable liée au temps de ventilation d'air à l'heure selon les mesures d'étanchéité et de ventilation d'un bâtiment. Cet outil est alimenté au fur et à mesure par la [DIRM](#).

Politique de recherche à la CODAH

La [CODAH](#) a la volonté permanente d'améliorer ses capacités de veille, de prévention et d'intervention. C'est pourquoi elle mène des projets de recherche (dont [PRET-RESSE](#)) et collabore avec le monde universitaire par des projets avec des laboratoires de recherche. Ainsi, elle encadre un certain nombre de stages et de thèses dont ce présent travail et une autre thèse sur les réseaux mobiles ad-hoc et leur utilisation en cas de risque pour propager des messages de proche en proche et ceci sans infrastructure. Une thèse [CIFRE](#) est aussi en cours sur le fonctionnement des cellules de crise et la manière d'améliorer la prise de décision en intégrant des outils de gestion des risques et de formation sur la gestion des crises.

3.4 Vue globale des outils de la CODAH

Nous avons décrit dans ce chapitre les principaux outils d'aide à la décision utilisés par la [CODAH](#). Ces outils tournent autour de trois fonctionnalités que sont la prévention du risque, le traitement de la crise et le retour d'expérience après la crise. Parmi ces outils, certains remplissent une ou plusieurs de ces fonctionnalités à la fois. Les outils ne collaborent pas nécessairement directement entre eux, mais peuvent servir d'entrée

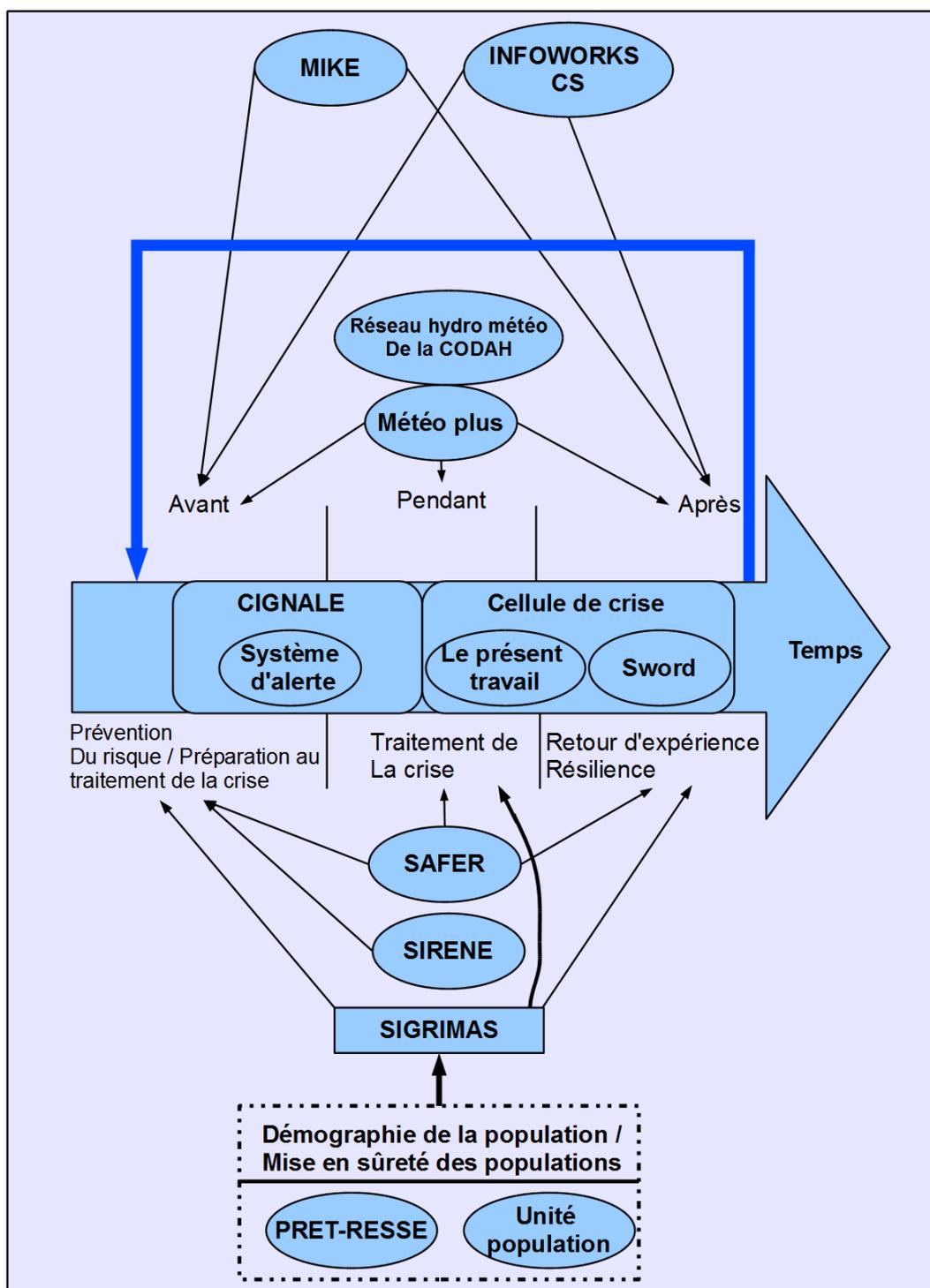


FIGURE 3.10: Vue d'ensemble des outils de modélisation de la CODAH par type d'utilisation.

pour un système plus global dans une cellule de crise permettant de recueillir les données traitées par ces outils afin de les combiner, les analyser et aider les décideurs dans leur stratégie, par exemple celle qui concerne le choix entre la mise à l'abri et l'évacuation selon le danger. C'est le but à long terme de l'outil « Sword » développé dans le cadre du projet « Taranis » qui doit pouvoir récupérer des informations nécessaires afin de simuler les effets des actions projetées pour aider à la décision.

La figure 3.10 représente une vue globale des outils utilisés au sein de la CODAH. La boucle sur la figure correspond à une boucle de rétroaction permettant le retour d'expérience des crises passées afin d'intégrer les leçons tirées pour la prévention du risque futur.

Deuxième partie

Complexe cité

Nous avons présenté dans la partie I la problématique de la thèse liée à la prévention des risques et à la gestion des crises en s'intéressant particulièrement aux réseaux d'interactions et la dynamique des processus les utilisant. Ainsi, le contexte et l'environnement de travail ont été définis dans le cadre de la CODAH en montrant les outils dont elle dispose et en définissant leur besoin en terme de dynamique de population. Nous avons aussi exposé des catastrophes ayant marqué l'histoire et les enseignements tirés. Dans cette partie, nous resituons notre problème dans le cadre des systèmes complexes et les réseaux d'interactions. L'analyse du risque passe par l'étude du territoire susceptible d'en subir les effets. Nous assimilons le territoire à un système complexe évolutif par les interactions des habitants y habitant. Nous nous interrogeons sur sa robustesse et sa résilience face aux risques pouvant l'influencer voire même le sortir de sa trajectoire. Nous montrons aussi que le réseau viaire, plus particulièrement celui de la CODAH en sa structure et son usage peut être assimilé à un système complexe. La structure du réseau est étudiée en le modélisant par un multigraphe, permettant d'appliquer des algorithmes de la théorie des graphes afin d'analyser le lien fort entre sa structure et son usage, en situation normale comme en situation de crise.

TERRITOIRE, VILLE ET RISQUE, UNE AFFAIRE COMPLEXE

4.1	Du système aux systèmes complexes	77
4.2	Complexe cité et modélisation	83
4.3	Territoire et risque des liaisons dangereuses	84
4.3.1	Modèle structurel et organisationnel du territoire	85
4.3.2	Robustesse et résilience du territoire face au risque	86
4.4	Le réseau viaire : un système complexe	90
4.5	Vision systémique complexe du risque	91

Avertissement Ce chapitre reprend des passages de [14] et le complète.

La physique, la biologie, l'informatique ou encore les sciences humaines nous offrent de nombreux exemples de systèmes dont le comportement global résulte des interactions entre des entités homogènes ou hétérogènes mais aussi entre ces mêmes entités et leurs environnements. Nous pouvons citer sans être exhaustif : les bancs de poissons, les nuées d'oiseaux [38], les colonies de bactéries [11] (*cf.* figure 4.1), les tas de sable [6], les automates cellulaires [174], les réseaux d'interaction et de régulation dans le domaine de la protéomique [2], les sociétés d'insectes [16], le système immunitaire [93], les langues naturelles [169] sans oublier bien évidemment les villes [48, 142, 148, 37, 10].

Les photographies aériennes présentées figure 4.2 traduisent le dernier exemple de manière imparfaite car elles sont figées dans le temps, néanmoins la première (*cf.* fi-

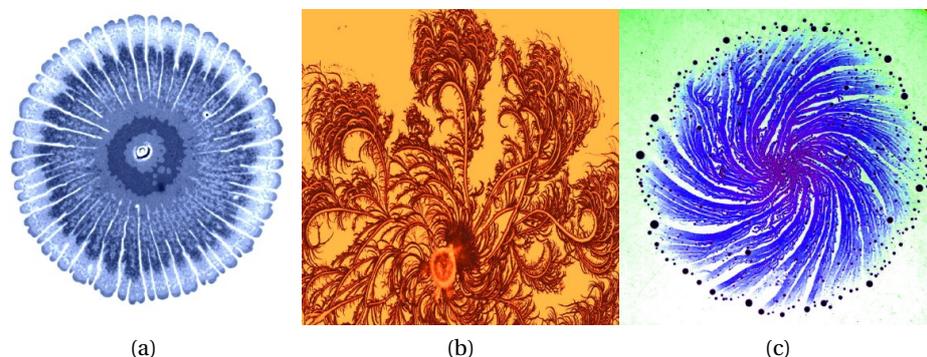


FIGURE 4.1: Interaction et auto-organisation au sein d'une colonie de bactéries. Photographies de boîte de Pétri sur lesquelles on constate que les colonies de l'ordre d'une dizaine de milliards d'individus se structurent en réponse à une stimulation externe. Ces images proviennent du laboratoire de Pr. Eshel Ben-Jacob, de l'université de Tel Aviv.

gure 4.2a) nous montre une occupation d'un territoire constituant un espace nourricier, un refuge, mais aussi un espace existentiel, social, industriel, économique et politique. Cette occupation constitue l'un des aspects du comportement global du système résultat d'implications complexes : des implexes¹. Michel Roux dans [157] relève que le rapport à l'espace-temps tient tout à la fois du projet finalisé, finalisant et se finalisant dans un environnement actif local-global, intime-universel, naturel-culturel. L'orientation téléologique proposée est sans doute trop forte. Les photographies 4.2b et 4.3 tentent de mettre en évidence des interactions locales à la fois entre les entités, les individus ici et leur environnement mais aussi l'influence de l'environnement. On est plus proche de l'habitus que de l'intentionnalité et du projet. L'habitus désigne un ensemble de dispositions à agir, à penser, à percevoir, à sentir d'une manière déterminée [21]. Il n'est pas inné, mais acquis. C'est le résultat de l'intériorisation des traces cumulées, combinées et se fortifiant, que laissent les expériences concrètes, ponctuelles et répétées et qui se transforment en dispositions générales, il devient en quelque manière une seconde nature [162]. Il est intéressant de faire un parallèle avec l'expérience de Deneubourg² [17] et le fourrageage des fourmis. Les auteurs de [29] ont présenté un phénomène identique à celui observé sur 4.2b et ont proposé l'expression *pelouse fourmilière*. Ils ont sans doute vu la même analogie. Ils proposent d'ailleurs une discussion intéressante autour de co-action et de la co-opération en s'appuyant en particulier sur l'intentionnalité. La dernière photographie 4.2c montre l'un des stigmates apparents suite à l'accident d'AZF

1. Concept proposé par P. Valéry lui permettant de désigner tous les pouvoirs potentiels de l'être humain [115].

2. Illustration à consulter sur <http://www-lih.univ-lehavre.fr/~dutot/MiscResearch.html>.

à Toulouse illustrant le risque mais surtout comment un système peut sortir de sa trajectoire et les effets dominos pouvant en découler. Une vision dans le temps concernant les dégâts de la Nouvelle-Orléans aux USA et plus particulièrement le quartier pauvre de Lower Ninth Ward nous est proposé sur les photographies de la figure 4.4.

Nous nous proposons dans ce chapitre d'aborder la ville et ses relations avec le risque sous l'angle des systèmes complexes. Après nous être situés dans les chapitres précédents, notre thèse sera éclairée concernant la recherche de forme dans le réseau d'interaction que constitue en particulier le système viaire.

4.1 Du système aux systèmes complexes

Les notions d'interaction et de système sont centrales, permettant de dégager des propriétés locales et globales. Les interactions s'expriment entre entités au sein d'un réseau en perpétuelle reconfiguration.

Saussure [54] définit un système comme une « *totalité organisée, faite d'éléments solidaires ne pouvant être définis que les uns par rapport aux autres en fonction de leur place dans cette totalité* ». Cette définition semble particulièrement pertinente du fait de sa mise en avant du concept d'organisation qu'elle lie à celui de totalité et d'interrelation/d'interaction. Autrement dit, les interactions entre entités, éléments, événements ou individus, dès lors qu'elles ont un caractère régulier ou stable, deviennent organisationnelles et constituent une matrice créatrice, attractive et éventuellement stable et durable. Le Moigne [101] pour sa part, propose : « *un système général est une intervention finalisante dans un environnement* », il introduit les notions d'action et d'environnement. Certains comme De Rosnay [53] ajoutent un aspect téléologique : « *un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisés en fonction d'un but* ».

Le système peut éventuellement être complexe ou non, mais en tout état de cause les systèmes étudiés présentent une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

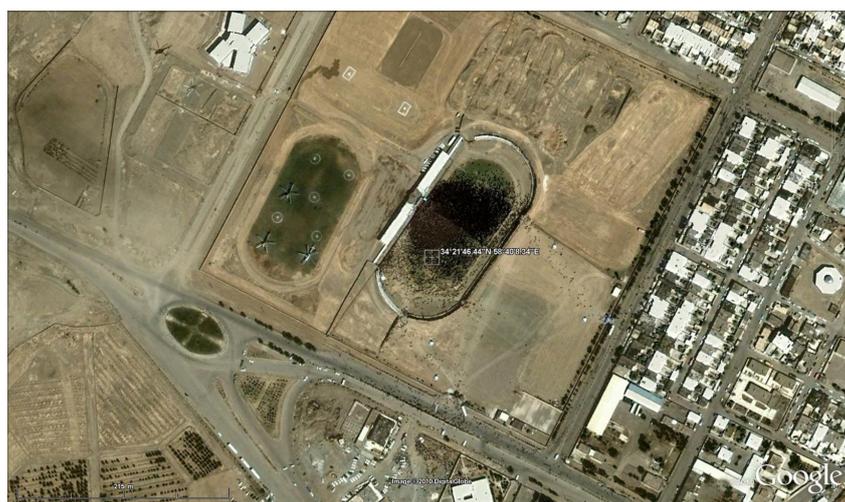
- Le graphe/réseau d'interaction est non trivial, des interactions se créent, disparaissent, évoluent et il existe éventuellement des interactions de différentes natures.
- Le système n'est pas centralisé, les interactions sont locales.
- Les informations sont locales en général.
- Il existe des boucles de rétroaction via d'autres entités ou par l'intermédiaire de l'environnement.
- Le système est ouvert, structuré par les flux d'énergie, de matière et d'information.

Ainsi que nous l'avons déjà dit, un système (voir figure 4.5) est un ensemble constitutif formé d'entités en interactions mutuelles et en interaction avec un milieu extérieur ou environnement. Le système et ses constituants répondent aux trois propriétés holistiques irréductibles suivantes :

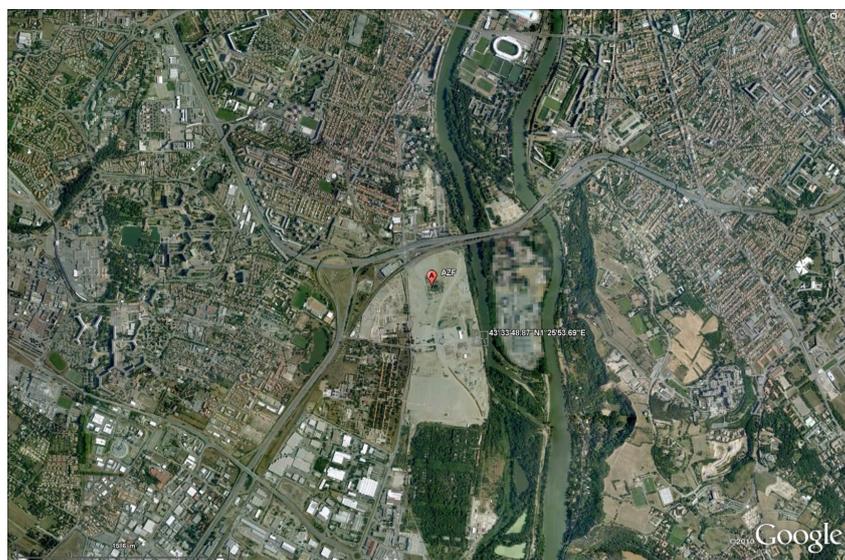
4. TERRITOIRE, VILLE ET RISQUE, UNE AFFAIRE COMPLEXE



(a) Harfleur - France - $48^{\circ}59'60.00''\text{N } 0^{\circ} 0'0.00''\text{E}$ - 11/09/2010.



(b) Iran - Pelouse fourmilière - $34^{\circ}21'46.44''\text{N } 58^{\circ}40'8.34''\text{E}$ - 11/09/2010.



(c) Toulouse (AZF) - France - $43^{\circ}33'48.87''\text{N } 1^{\circ}25'53.69''\text{E}$ - 14/04/2002.

FIGURE 4.2: La complexité vue du ciel.

Source : Google earth.

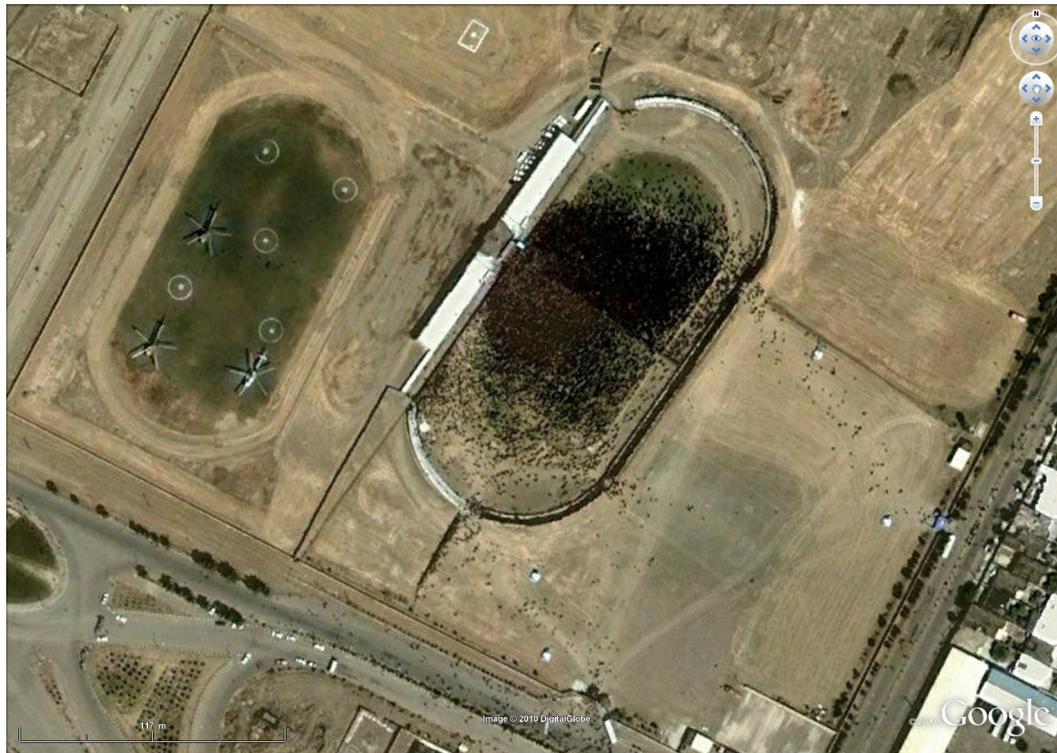


FIGURE 4.3: Zoom sur 4.2b se focalisant sur la pelouse fourmilière. Les points noirs sont des individus que l'on voit dans le stade et sur les accès du stade formant des chemins comme ceux observés dans le fourragement chez les fourmis. Les interactions se font à la fois au travers de l'environnement par les traces au sol et par un mécanisme "panurgien". Mise en perspective avec l'analogie animale. Iran - Pelouse fourmilière -34°21'46.44"N 58°40'8.34"E - 11/09/2010.

4. TERRITOIRE, VILLE ET RISQUE, UNE AFFAIRE COMPLEXE



FIGURE 4.4: Nouvelle Orléans (USA) : un territoire soumis à une catastrophe (cyclone Katrina 28/08/2005) et sa résilience. Quartier de Lower Ninth Ward 29°58'16.06"N 90° 1'12.27"W.

Source : Google earth.

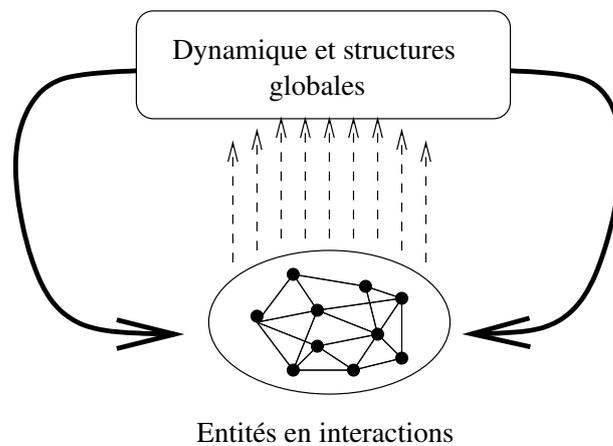


FIGURE 4.5: Vue schématique d'un système.

1. Dépendance interactive : les structures et les dynamiques des entités du système dépendent les unes des autres. Par conséquent, l'isolement d'une entité peut la modifier et l'action sur certaines peut engendrer des conséquences sur d'autres.
2. Existence ou émergence d'une entité globale : de l'ensemble des unités fonctionnelles et de l'ensemble de leurs interactions, émerge une entité nouvelle montrant une structure, des propriétés et une dynamique nouvelles par rapport à celles de ses composantes. Cette entité globale interagit avec son environnement. « *Le tout est plus que la somme des parties* »³.
3. Phénomène de rétroaction de l'organisation globale sur ses parties constitutives : « *le tout est moins que la somme des parties* » [118, 119].

Si la systémique offre un cadre d'analyse très riche, par exemple, pour de nombreuses constructions mécaniques, physiques le plus souvent reproductibles constituant des systèmes isolés ou pouvant être isolés, elle est cependant mise en défaut lors de la prise en considération des systèmes ouverts traversés par des flux d'énergie, de matière ou d'informations ; c'est le cas en particulier des systèmes vivants ou des systèmes sociaux. La systémique nécessite alors d'être complétée par une approche de la complexité. Les flux maintiennent et structurent ces systèmes complexes qui peuvent stocker éventuellement une partie des apports de matière et/ou d'énergie, leur permettant parfois d'entretenir une stabilité dans le temps. Néanmoins de petites perturbations peuvent conduire le système à se transformer, à s'organiser différemment, ou même à disparaître. Des propriétés globales émergent, résultat de la richesse des interactions qui créent des organisations utilisant l'énergie, la matière ou l'information apportés par les flux et dissipant les perturbations engendrées par ces mêmes flux.

3. **Aristote.**

Le système peut être plus ou moins sensible aux conditions initiales [140, 139]. La trajectoire d'un système se développe dans l'espace des phases constituées de tous les états possibles, certains états pouvant se comporter comme des attracteurs. Il s'agit d'auto-organisation et cette capacité (d'organisation) conduit les systèmes complexes les plus évolués à être adaptatifs.

Concernant les systèmes complexes, Arthur, Durlauf et Lane [4] énumèrent six propriétés :

1. Il existe un grand nombre d'entités hétérogènes qui interagissent uniquement avec un certain nombre d'autres (interactions dispersées) .
2. Il n'y a pas de centralisme.
3. Il existe des organisations hiérarchiques transversales avec un grand nombre d'interactions enchevêtrées .
4. Les entités peuvent s'adapter, apprendre et donc évoluer.
5. Le système évolue en permanence avec l'apparition et la disparition d'(auto)-organisations.
6. Le système n'est jamais à l'optimum global, la dynamique est toujours hors de l'équilibre (il n'existe pas d'équilibre ou on passe d'un équilibre à un autre) .

Dans le cadre de la mise en relation du risque et du territoire, il nous semble nécessaire d'ajouter également la notion de système autonome. Un tel système est opérationnellement clos [111], son organisation est caractérisée par des processus :

- dépendant récursivement les uns des autres pour la génération et la réalisation des processus eux-mêmes ;
- constituant le système comme une unité reconnaissable dans l'espace (le domaine) où les processus existent.

Cette notion de clôture se distingue de celle de fermeture qui traduirait l'absence d'interaction avec l'environnement. Ces dernières dans le cadre d'un système autonome sont réalisées de façon à conserver sa structure (identité) et sa clôture.

Pour étudier les transformations de tout système, il est nécessaire de prendre en compte le temps. Dans les systèmes dynamiques des échelles temporelles différentes, qui correspondent à des vitesses d'occurrence d'événements subis par le système, peuvent exister. Les variables⁴ du système évoluent dans l'une des échelles et interagissent ou sont influencées par d'autres variables qui elles mêmes évoluent éventuellement dans une autre échelle de temps. La temporalité est de ce fait imbriquée. Dans un esprit de simplification, on considère souvent trois échelles, la première rapide, la deuxième lente et enfin la dernière fixe. Les variables rapides correspondent généralement aux interactions quasi-instantanées présentes aux niveaux dits microscopiques,

4. Dans le sens qui varie et/ou fait varier, cette notion désigne aussi bien les entités, les organisations, les grandeurs, les paramètres ...

alors que les variables lentes sont associées aux niveaux macroscopiques engagés dans la voie de l'adaptation. Pour prendre un exemple, la pente du lit d'un fleuve crée l'écoulement qui s'effectue dans ce lit et le creuse.

Un phénomène émergent synchronique suppose que les niveaux microscopique et macroscopique soient présents simultanément. On considère que les échelles temporelles sont du même ordre, aussi bien, dans le sens causal ascendant que dans celui descendant. La boucle se fait autour d'un point d'équilibre, autrement dit en l'absence de perturbation, le processus semble présenter un état de stabilité, l'émergence ayant tendance à renforcer le phénomène. Un processus d'émergence synchronique s'inscrit dans l'instant.

Le phénomène émergent diachronique explique la genèse et l'évolution du processus [95]. Il met en évidence comment le niveau macroscopique est progressivement issu du niveau microscopique, autrement dit, il suppose que l'émergence dans ce cadre est évolutionnairement explicable. Il correspond à un processus séquentiel d'adaptation entre les niveaux macroscopique et microscopique. Alors qu'un phénomène émergent synchronique est le résultat des interactions instantanées entre les entités du niveau microscopique, un phénomène émergent diachronique s'exprime dans des temporalités différentes, à court terme dans le sens de la causalité ascendante, à long terme dans le sens de la causalité descendante. Des états transitoires sont alors générés à court terme pour éventuellement provoquer, à long terme, des états (pseudo-)asymptotiques.

4.2 Complexe cité et modélisation

Une des premières références à notre connaissance à la notion de complexité et d'(auto)-organisation dans la littérature concernant la cité est sans doute l'ouvrage écrit il y a maintenant 50 ans par Jane Jacobs [90, 91], s'appuyant sur [171] de Weaver qui proposait de classer les problèmes en science selon deux catégories : les problèmes simples et les problèmes complexes désorganisés ou organisés, considérait la cité comme un système complexe organisé. Elle ouvrait une voie que d'autres empruntèrent en particulier Forrester [71] avec son approche en dynamique des systèmes et l'introduction de boucles cybernétiques. Il constatait que ses modèles montraient des « comportements déviants ». Les modèles de Forrester n'intégraient pas l'espace, Wilson et Batty dans leurs travaux [173, 9] ont introduit cette dimension. La démarche de modélisation à l'aide de systèmes dynamiques n'a pas dans un premier temps considéré l'espace, *a contrario* de ceux qui se sont orientés vers les automates cellulaires. Schelling [160] avec son modèle de ségrégation est l'un des précurseurs de cette exploration du champ de la géographie humaine. Cette orientation a bien sûr été poursuivie [100] en réponse à certaines critiques formulées à ce type de modélisation rendant difficilement compte des dynamiques structurelles liées à des effets d'un niveau d'organisation supérieur sur un niveau inférieur et modélisant mal les dynamiques non liées à un voisinage spatial. Depuis maintenant plus de 15 ans les sciences humaines utilisent pour répondre aux

problèmes évoqués des modèles agents [32] leur permettant de mieux représenter les interactions et surtout les éventuels niveaux d'échelle [158].

Dans le cadre de cette thèse, le problème sera abordé par le biais du parti-pris des réseaux et des graphes. Ces derniers définissent les inter-relations et en particulier se prêtent à la représentation des relations topologiques d'un espace. Même s'il reste un modèle simple : les nœuds/points et les relations, l'algorithmie des graphes et la métrologie sur les grands graphes permettent de mettre en évidence d'éventuelles propriétés structurelles et fonctionnelles liées aux interactions. Nous retrouvons en cela la définition de Saussure précédemment énoncée. Les graphes sont une formalisation des réseaux d'interactions dont ils révèlent la syntaxe mais ne capturent pas la sémantique, pour pouvoir aller dans cette direction, il est nécessaire d'ajouter des processus dans ces mêmes graphes.

En retenant le dernier modèle, nous ne l'opposons pas avec les précédents, ils nous semblent être complémentaires et pouvoir répondre, le plus souvent, à des problématiques différentes.

4.3 Territoire et risque des liaisons dangereuses

Dans le cadre de la gestion du risque, il existe un lien très étroit entre l'espace et les enjeux. La vulnérabilité a donc une dimension spatiale et c'est dans ce contexte qu'elle doit être appréhendée. Néanmoins, cette vision est très réductrice car elle n'englobe pas la dynamique entre les multiples composantes, habitant, occupant, utilisant, ..., l'espace.

Il est donc nécessaire de considérer les interactions entre les différentes organisations, au sens large. Il faut considérer la vulnérabilité au regard du territoire ce qui nous conduit à en donner une définition en reprenant celle proposée par Bernard Elissalde⁵.

Définition 1 *Le territoire est une portion d'espace terrestre envisagée dans ses rapports avec des groupes humains qui l'occupent et l'aménagent en vue d'assurer la satisfaction de leurs besoins. Ce n'est pas une substitution du mot espace. Notion autonome, le territoire, en géographie n'est ni un synonyme, ni un substitut du mot espace. S'il y a bien entendu de l'espace dans le territoire, celui-ci n'est pas considéré comme un support neutre et isotrope. De multiples composantes (environnementale, sociale, économique, institutionnelle, ...) donnent de la spécificité et de l'identité à la configuration et au fonctionnement de cet ensemble. Comprendre un territoire c'est mettre en évidence les interactions entre ses différentes composantes et non pas les considérer comme des couches successives dont la totalité constituerait un ensemble appelé territoire. L'occupation humaine, des projets multiples, et des capacités variables à mener à bien des objectifs vont façonner et selon les échelles variables aménager les territoires. Les multiples interactions entre les acteurs*

5. <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article285>.

différents poursuivant des stratégies différentes et éventuellement contradictoires font de l'arrangement territorial à un moment donné le résultat de ces processus.

Un territoire est donc un système complexe (écosystème) dont l'évolution dans le temps est le résultat des pro-actions et des rétro-actions qui lient un ensemble d'entités vivantes et l'espace géographique qu'elles occupent, utilisent et gèrent.

De nombreux travaux dans le cadre du risque ont déjà proposé des modèles, en particulier les différents ouvrages d'André Dauphiné [48, 49], offrant un éclairage autour de la complexité, ou encore [31] s'appuyant sur une démarche holistique et introduisant dans leurs analyses les aspects législatifs. Plus proche de notre discipline de départ l'informatique dans [145, 147], les auteurs proposent une ontologie conceptuelle du domaine des risques et des catastrophes permettant de mettre en perspective les différents points de vue des acteurs mais aussi de prendre en compte les différentes échelles en ayant pour ambition d'aider à la comparaison d'événements ne présentant, en première analyse, que peu de caractéristiques communes.

4.3.1 Modèle structurel et organisationnel du territoire

Dans le cadre du risque, il est nécessaire de considérer l'organisation du territoire sous l'éclairage systémique de la complexité. Cela conduit en premier lieu à réfléchir à un modèle organique (figure 4.6) identifiant les différents systèmes sujets à la vulnérabilité face à un aléa.

Le premier système à prendre en considération est bien évidemment le système social constitué de la population qui en est actrice par l'intermédiaire des rapports sociaux, économiques et politiques, l'homme y occupe un rôle essentiel au travers d'interactions entre individus, entre individus et organisations et entre les organisations elles-mêmes. La protection de l'individu constitue la priorité. Le deuxième système est l'espace géographique anthropisé où l'homme développe ses cultures, habite et construit. Cet espace est structuré par des flux trouvant leurs supports matériels ou immatériels dans des réseaux où la mobilité s'y exerce. Le dernier système est lié à la représentation, il se situe dans la flèche du temps [113, 61] et traduit la dialectique de l'espace et du temps en histoire (passé et présent) et projets (présent et futur).

Les fonctionnalités sont le résultat de processus territorialisés donc contraints par cette structure mais rétro-agissant également sur elle. Elles ont comme objectif :

1. permettre les activités humaines : industrie, agriculture, éducation, loisirs ...
2. permettre les échanges par l'intermédiaire des infrastructures et des différents réseaux ;
3. protéger la population par une régulation des comportements (lois, réglementation, force de l'ordre ...) et en assurant sa sécurité (hôpitaux, force d'intervention).

Ces objectifs constituent les cibles potentielles : dommage à la population, atteinte partielle ou totale des activités, échanges perturbés, interrompus ou détruits.

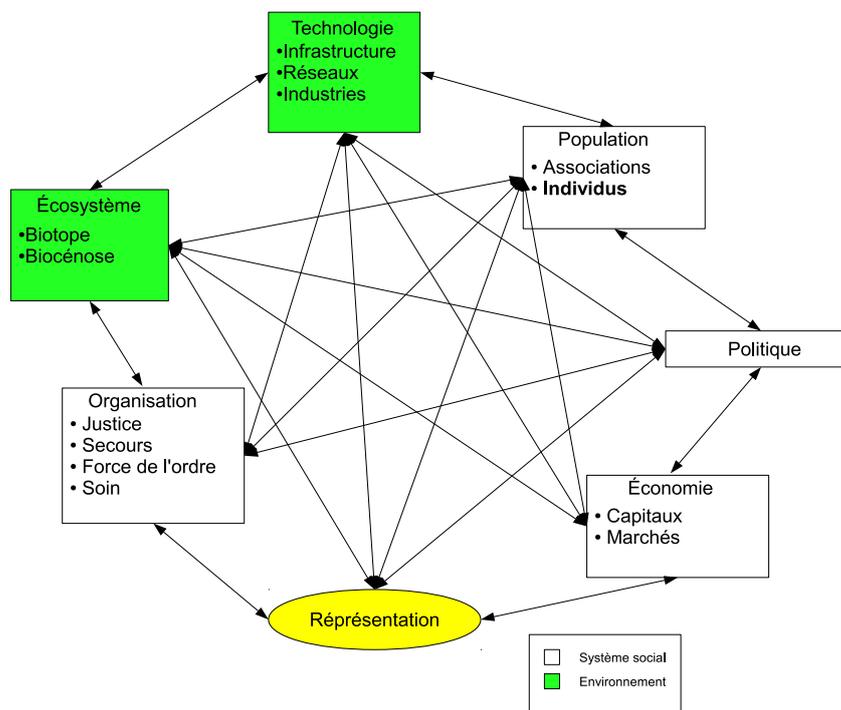


FIGURE 4.6: Le territoire : un anthropo-système.

4.3.2 Robustesse et résilience du territoire face au risque

Mettre le territoire en perspective avec le risque, c'est également s'interroger sur sa vulnérabilité, sa robustesse et ses capacités de résilience. En effet, l'aléa survenant crée des perturbations souvent majeures et en chaîne. Le système ou les sous-systèmes considérés changeront ou non de comportement et présenteront donc éventuellement des caractéristiques de robustesse face à l'aléa considéré. C'est la question de changement qui est posée dans le cadre de la robustesse, au risque de caricaturer notre propos : la trajectoire du système a-t-elle changé ? Si oui, le système n'est pas robuste face à la perturbation ; sinon, le système est robuste face à la perturbation.

La résilience, quant à elle, s'intéresse plus à la dynamique de l'évolution et à sa stabilité et se mesure. C'est dans la littérature en écologie que l'on trouve le plus de développements sur cette notion. Elle est définie de deux façons différentes, Holling [85] nomme la première « résilience d'ingénierie⁶ » et la seconde « résilience écologique⁷ ». La première proposée initialement par Pimm [135] définit la résilience comme étant le temps mis par un système pour retourner dans un voisinage de l'équilibre après qu'il en

6. engineering resilience.

7. ecological resilience.

ait été écarté par une perturbation. La mesure de la résilience est alors l'inverse de ce temps.

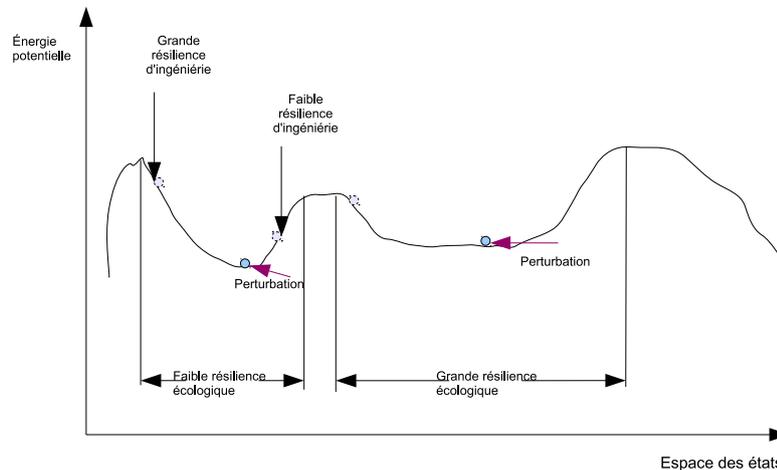


FIGURE 4.7: Résilience d'ingénierie *vs* résilience écologique.

La deuxième définition [86] contrairement à la première qui se focalise sur l'efficacité, le contrôle, la non variabilité et la prévisibilité aborde le problème sous l'angle de la persistance, l'adaptabilité, la variabilité et l'imprévisibilité. La mesure de la résilience est alors quantifiée par l'intensité maximale de la force de perturbation que le système peut absorber sans changer de comportement, de fonction, de processus de régulation. Cette dernière définition met en lumière la possibilité pour un système de se retrouver dans un nouveau bassin d'attraction définissant un nouveau domaine de stabilité correspondant à un nouveau comportement, définissant de nouvelles fonctions et aussi de nouvelles pro-actions et rétroactions.

Il est intéressant de constater que dans le cadre du territoire et du risque ces deux définitions se complètent, la question de l'intensité de la perturbation s'appliquant par exemple à l'accident d'AZF à Toulouse et la question du temps à l'accident de Tchernobyl pour les zones non limitrophes. Néanmoins au niveau des caractéristiques d'un territoire, il nous semble plus intéressant de développer la largeur du bassin d'attraction plutôt que sa profondeur.

La présence d'auto-organisations ainsi que leurs formations mais aussi la profondeur de la hiérarchie des systèmes sont une des clefs de la résilience d'un système en particulier dans le cadre du risque. La perturbation est-elle capable de déstabiliser les auto-organisations? Dans ce contexte, la perturbation est vue à notre sens comme un flux d'énergie et de matière. Ainsi comme l'évoquait Prigogine [140, 139], les systèmes peuvent stocker éventuellement une partie des apports de matière et/ou d'énergie, leur permettant parfois d'entretenir une stabilité dans le temps, caractéristique pouvant of-

frir des propriétés de résilience. Mais le flux peut également potentiellement détruire les entités constitutives de l'organisation en particulier celles constituant la frontière déstabilisant/détruisant le processus producteur.

Ainsi comment les organisations et les formes apparaissent-elles ? Elles sont dues aux interactions très nombreuses se produisant au sein du système, qui se font entre les entités elles-mêmes, mais aussi avec l'environnement. On peut distinguer quatre facteurs fondamentales :

- des rétroactions positives ;
- des rétroactions négatives ;
- la présence d'un nombre critique d'entités en interaction ;
- l'amplification des fluctuations.

On parle ainsi de rétroaction positive lorsqu'en réponse à une modification d'un paramètre d'un système, le système « répond » en changeant ce paramètre à nouveau *dans le même sens*. C'est le cas par exemple, si en réponse à l'augmentation de la taille d'une organisation, cette organisation grandit encore plus. On considère généralement les rétroactions positives comme un mécanisme « explosif » dans le sens où si rien ne le stoppe, le phénomène s'amplifie continuellement.

Un exemple simple de rétroaction positive peut être donné en sociologie : plus un groupe social est gros, plus il devient attractif ou puissant, et plus il attire d'individus en son sein. Cependant, s'il n'est pas contrôlé, ce processus mène à l'explosion du groupe devenu trop important.

Quant aux rétroactions négatives, comme leur nom l'indique, elles prennent le contre-pied des rétroactions positives. On parle de rétroaction négative lorsqu'en réponse à un changement d'un paramètre du système, le système répond en changeant ce paramètre dans le sens contraire. Les rétroactions négatives ont un effet stabilisateur, elles maintiennent les structures et organisations créées par rétroactions positives. Les termes « négatif » et « positif » ne doivent pas être compris dans l'acception « bénéfique » et « néfaste », simplement une rétroaction négative stabilise, et une rétroaction positive amplifie le phénomène.

On parle de morphogénèse lorsque les rétroactions positives amplifient la création d'un groupe, d'une structure ou d'une organisation, en un mot d'une forme, morphogénèse signifiant littéralement création de forme. On parle aussi de processus autocatalytique en référence à la physique.

Il y a morphostase lorsque le processus est contrôlé par des rétroactions négatives qui le ramènent sans cesse vers l'équilibre, limitant les amplifications, morphostase signifiant conservation de forme.

Ainsi, si les rétroactions positives créent des organisations et ont un facteur générateur nommé morphogénèse, les rétroactions négatives les maintiennent dans une « forme stable » en tant que telle nommée morphostase. Cependant, des interactions extérieures (aléa lié au risque par exemple) peuvent à tout moment déstabiliser les organisations de telle façon que :

- les rétroactions positives font exploser l'organisation ;
- les rétroactions négatives font disparaître l'organisation ;
- un facteur extérieur essentiel n'est plus disponible, faisant disparaître l'organisation.

L'auto-organisation crée donc des formes qui se développent en trois phases :

1. La phase juvénile, dans laquelle les interactions positives sont les plus fortes et où les interactions négatives n'ont pas lieu, car aucun seuil de déclenchement n'a été rencontré. C'est la morphogénèse, l'apparition de la forme.
2. La phase adulte, dans laquelle les interactions positives et négatives jouent de concert, maintenant implicitement la forme en état. À ce stade, on a souvent le développement de hiérarchies sur une profondeur importante. C'est la morphostase.
3. La phase sénescence, dans laquelle un facteur déstabilisant détruit la forme. Le système se « simplifie ».

Les rétroactions négatives et positives, bien que nécessaires à l'auto-organisation, et en étant en quelque sorte la signature, ne sont pas forcément signe d'auto-organisation. Il est bien entendu possible d'observer des systèmes dans lesquels ces deux formes de rétroactions sont présentes sans pour autant qu'il y ait auto-organisation (le thermostat, la régulation en automatique). En effet, d'autres critères sont essentiels à l'auto-organisation : un nombre critique d'entités en interaction et la capacité de créer ses propres boucles homéostatiques.

Les systèmes présentant des caractéristiques d'auto-organisation sont régulés par un cycle de quatre phases (voir figure 4.8) :

1. Une phase de dérive tropique due aux flux d'énergie, de matière et d'information provenant de l'environnement. Si ces flux entretiennent le système, ils peuvent également le déstabiliser, le désorganiser et être à l'origine de rupture du comportement.
2. L'aléa, le hasard, le système dévie de sa trajectoire, un point de bifurcation apparaît dû aux tensions provoquées par la phase précédente. Si le système est soumis principalement aux rétroactions positives, il régresse ou même disparaît, il peut revenir à l'état initial, ou encore atteindre la phase suivante.
3. Une phase de transformation importante, de métamorphose, elle est le résultat soit d'une adaptation au contexte, soit une morphogénèse résultat de l'auto-organisation. Le système a atteint un nouveau stade d'organisation.
4. Le retour à la stabilité, des boucles de régulation homéostatiques sont à nouveau en place et assurent la stabilité de l'état du système jusqu'à une prochaine dérive tropique conduisant à une bifurcation

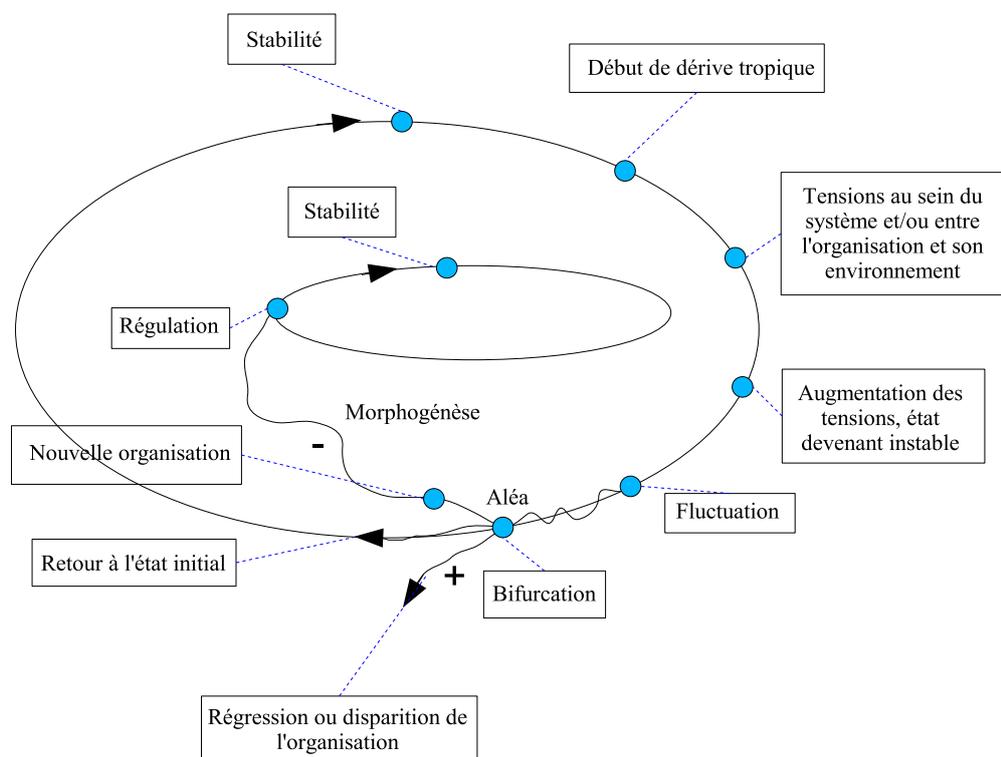


FIGURE 4.8: Dynamique de l'auto-organisation.

4.4 Le réseau viaire : un système complexe

Nous pensons avoir démontré au fil de ce chapitre que le territoire de la CODAH constituait un système complexe certains diraient un système de systèmes, concept qui décrit un ensemble de systèmes en interaction et dotés d'ontologies différentes. Le réseau viaire en constitue un des éléments, mais est-il pour autant un système complexe ? Cette question peut paraître anodine mais sa réponse légitime ou non que l'on cherche de l'auto-organisation génératrice de forme dans le graphe (multigraphe dans ce travail) représentant le réseau viaire. Elle permet également de s'interroger éventuellement sur la résilience.

En reprenant la définition concernant les systèmes complexes de Arthur, Durlauf et Lane [4], on constate que le réseau et les véhicules réunissent les propriétés énoncées (tableau 4.1).

On constate donc que le réseau viaire constitue une composante essentielle du système complexe mais que l'on ne peut pas l'isoler des processus. Le réseau viaire est contraint par la dynamique et la contrainte. Il constitue la structure dans laquelle les

Système complexe	L'agglomération
Grand nombre d'entités hétérogènes en interaction uniquement avec un certain nombre d'autres.	Des véhicules sur la même route interagissent entre elles, mais pas nécessairement avec les véhicules se trouvant sur d'autres routes.
Absence d'un contrôle global.	Quelques règles locales (feux de circulation, priorités sur les intersections) mais pas de contrôle global.
Existence d'organisations hiérarchiques transversales avec un grand nombre d'interactions enchevêtrées.	Une organisation du service de secours interagit avec des véhicules se trouvant dans une zone dangereuse.
Adaptation continue, apprentissage et évolution.	Des véhicules apprennent davantage sur les congestions sur d'éventuelles voies de circulation aux heures de pointe et tentent de les esquiver.
Perpétuelle évolution avec l'apparition et de disparition d'organisations.	Des bouchons peuvent apparaître (feu rouge, évacuation...) ou disparaître (feu vert par exemple) dans différents endroits du réseau routier.
Le système n'est jamais à l'optimum global et est loin de la dynamique de l'équilibre (pas d'équilibre ou transition d'un équilibre à un autre).	Passage d'une situation fluide de trafic à une congestion et vice versa.

TABLE 4.1: Le cas des véhicules circulant en situation normale comme en situation de crise sur le réseau routier de la CODAH réunit les propriétés d'un système complexe définie par Arthur *et al.* [4].

formes apparaissent et est le lieu de production des auto-organisations.

4.5 Vision systémique complexe du risque

Trop souvent, dans le cadre du risque, les analyses reposent sur les éléments composant les systèmes en délaissant les interactions. D'ailleurs, la définition traditionnelle du risque comme étant le produit d'un aléa et d'une vulnérabilité en témoigne, les interactions en sont absentes ainsi que plus généralement le temps et l'espace. Nous rejoignons Damienne Provitolo qui considère que le risque est un ensemble complexe d'aléa(s) et de vulnérabilité(s) et qu'une catastrophe est un phénomène émergent résultant des aléas et des vulnérabilités[143]. Une définition du risque pourrait être $Risque = f(A(R), V(R))$, où A décrit l'aléa, V la vulnérabilité et R le réseau d'interaction entre les

entités considérées. Ce réseau d'interaction est constitué d'un ensemble d'entités spatialisées $E(s, t)$ variant dans le temps et $I(t)$ l'ensemble des interactions entre les entités, $R = (E(s, t), I(t))$.

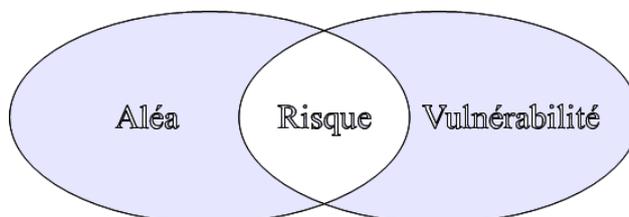


FIGURE 4.9: Le risque résulte du croisement d'un aléa et d'enjeux vulnérables.

Cette approche n'isolant plus les systèmes et considérant les liens et les dépendances permet d'aborder les problèmes de sur-catastrophes ou encore les effets dominos. Il s'agit de la complexité structurelle le plus souvent issue non pas uniquement des entités mises en jeu mais surtout des relations entre elles. Ces éléments se dégagent en particulier à partir de la structure du réseau d'interaction.

Un dernier élément doit être considéré, il s'agit de la complexité liée à la dynamique ainsi que nous l'avons présentée dans la figure 4.8, le système peut connaître des changements de phase, ces changements peuvent s'avérer primordiaux à détecter car ils conditionnent l'évolution du système qui connaît alors un changement de comportement. L'évolution du trafic est un exemple significatif à cet égard (cf. 8.1).

Des méthodes d'évaluation des risques existent et sont éprouvées dans le milieu industriel (industrie nucléaire, aéronautique, ...), on peut citer HAZOP⁸ par exemple ; c'est un outil permettant d'analyser les risques potentiels associés à l'exploitation d'une installation industrielle. Elles ont pour vocation d'assurer la sûreté de fonctionnement. Une ontologie du domaine des risques et des catastrophes a été développée dans [146] à partir d'un digramme de classes Unified Modeling Language (UML). Le modèle s'appuie sur une approche systémique permettant d'identifier les éléments du système susceptibles d'être atteints par des événements potentiellement dangereux, la dynamique liée aux événements et les acteurs (individus, organisations). Ainsi, ce modèle permet aux différents acteurs de caractériser la structure du système, mais aussi sa dynamique. Dans le même contexte, une Méthodologie générale conceptuelle d'Analyse des Dysfonctionnements dans les Systèmes (MADS) a été développée par une équipe de recherche de l'Université de Bordeaux I en collaboration avec des ingénieurs du CEA⁹ afin d'appréhender les Événements Non Souhaités (ENS), *i.e.* des dysfonctionnements

8. Hazard and Operability Analysis.

9. Commissariat à l'Énergie Atomique.

susceptibles de mettre en péril l'individu, la population, l'environnement et l'installation.

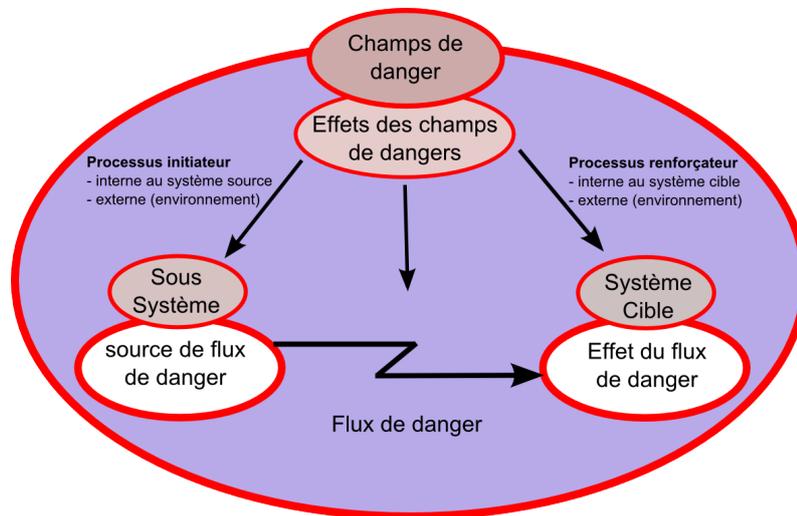


FIGURE 4.10: Modèle du processus de danger selon la méthode MOSAR [141] : analyse de dysfonctionnement d'un système.

Cette méthode tente d'aborder le problème par l'angle de la systémique et de la modélisation des interactions même si cette dernière tend à globaliser les éléments sources de danger.

L'outil associé à cette approche a été développé par Pierre Périlhon (voir [141] pour plus de détails), connu sous le nom de MOSAR, il s'appuie sur une vision systémique afin d'identifier, d'analyser, de maîtriser et de gérer les ENS. MOSAR est basé sur le modèle de processus de danger illustré dans la figure 4.10. Ce modèle décrit l'enchaînement des événements menant à une situation dangereuse. Cette approche consiste à représenter les systèmes sources et cibles desquels sont issus les ENS ; leur mise en relation modélisant le processus de danger. Cette liaison s'effectue par l'intermédiaire d'un flux de danger (matière, énergie, information) partant de la source vers la cible. Les systèmes sources et cibles, ainsi que les flux se situent donc dans un champ de danger pouvant influencer ces systèmes. L'événement initiateur déclenchant un danger peut être issu des systèmes sources mais aussi de l'environnement. Le risque ne sera présent que par l'existence de cible dans le champ de danger, une cible pouvant, à son tour, être une source de danger pour d'autres cibles (effets dominos par exemple).

Dans ce travail de thèse, nous ne nous soucions pas des causes humaines, techniques ou organisationnelles au niveau d'une organisation déclenchant un événement initiateur de danger. Cependant, nous suivons une démarche de gestion des risques en dévelop-

pant une méthode de prévention et une méthode de réduction des conséquences. L'aspect préventif est lié à la structure et au fonctionnement du réseau viaire qui sera étudié davantage dans le chapitre 7. L'étude de la structure du réseau se fait grâce à une méthode de détection de communautés du réseau permettant d'identifier les liens faibles ou des liens de passage incontournable du réseau, à surveiller par les autorités. L'étude du fonctionnement du réseau est réalisée par l'application d'une marche aléatoire sur le réseau afin de détecter les routes du réseau susceptibles d'être plus empruntées que d'autres. Afin de réduire les conséquences des risques, nous présenterons un modèle de mobilité dans le chapitre 8 et un modèle d'évacuation dans le chapitre 9 pour aider les décideurs à évacuer efficacement une zone dangereuse.

Bien qu'on ne prenne pas en compte les causes d'un éventuel accident au niveau d'une installation par exemple, des points en commun avec la méthode **MOSAR** peuvent être dégagés ; le réseau viaire de la **CODAH** étant reconnu comme un système complexe en sa structure et son fonctionnement, au sein duquel existent plusieurs cibles de danger. Suite à un processus initiateur de danger (explosion au niveau d'une installation par exemple), un flux de danger (nuage toxique par exemple) partant du système source affecte un système cible que constitue, entre autres, le réseau et la population l'empruntant. Des processus internes au système cible (accident de la route lors d'une évacuation par exemple) ou externes (environnement) peuvent par conséquent renforcer le risque et constituer une source de danger pouvant affecter d'autres cibles se trouvant dans les champs de danger.

Le chapitre 5 s'intéresse à la représentation de la complexité des villes par la structure de leurs réseaux d'interactions et des dynamiques liées à leurs usages.

RISQUE ET RÉSEAUX

5.1	Vulnérabilité et dimension spatiale	99
5.2	Réseau routier	101
5.3	Recherche d'organisations dans un graphe	103
5.3.1	Modélisation par graphe	104
5.3.2	Grands graphes	105
5.4	Modèle	107
5.4.1	Modélisation de l'environnement	107
5.4.2	Vulnérabilité structurelle : micro, méso, macro	108
5.4.3	Vulnérabilité fonctionnelle : marche aléatoire et enquête ménage	109
5.4.4	Mobilité	109
5.5	Vulnérabilité et morphodynamique	110

Nous avons vu précédemment que le risque dépend d'un aléa et d'une vulnérabilité. Nous avons aussi souligné le fait que les experts et les autorités étaient concentrés depuis longtemps sur le contrôle des aléas, mais que la politique actuelle de la gestion des risques s'oriente de plus en plus vers des tentatives de réduction de la vulnérabilité sans oublier bien sûr de s'efforcer de diminuer l'aléa à la source.

Nous avons vu dans le chapitre 4 que le territoire peut être vu comme un système complexe évolutif [116] dans lequel des entités de différentes natures sont en interaction s'inscrivant dans un réseau généralement de grande taille et possédant éventuellement des propriétés caractéristiques.

Définition 2 *Le terme générique « réseau » se définit donc comme un ensemble d'entités (objets, personnes, ...) interconnectées les unes avec les autres. Un réseau permet ainsi de faire circuler des flux de matière, d'énergie et d'information entre chacune de ces entités selon des règles bien définies.*

Vu sous cet angle, nous pouvons parler de réseau dès que plusieurs entités sont en interaction. Le territoire associant des entités en forte interaction fonctionne par un ensemble de réseaux au travers desquels circulent des flux d'individus, d'information, d'énergie, ... Ainsi, parle-t-on du réseau de transport (viaire : bus, vélo, marche, voiture ; transport fluvial, aérien, ferroviaire ...), réseau de ressources (électricité, eau, gaz ...), réseau d'information (télécommunications, réseau informatique, réseau téléphonique ...), réseau social (relations entre personnes) ...

Le territoire en son intégralité est vulnérable. Il n'est jamais à l'abri du risque quotidien ou du risque majeur. Les différents réseaux du système partagent un espace commun et sont dépendants les uns des autres. Un problème sur l'un des réseaux peut avoir des répercussions sur l'ensemble des autres réseaux : la localisation d'un certain dysfonctionnement de l'un des réseaux souterrains peut impacter d'autres réseaux [15]. La ville du Havre a par exemple connu des inondations partielles de son réseau viaire via le réseau d'assainissement le 4 juillet 2000¹. Ceci ne veut pas dire que l'impact d'un risque au niveau d'un territoire ne touche que le territoire en question. De par les multiples réseaux s'étendant vers l'extérieur, un risque peut dépasser la frontière du territoire par leur intermédiaire. Ainsi, en cas de catastrophe, la vulnérabilité se propage des régions sinistrées à celles qui en dépendent par l'intermédiaire des réseaux ; à titre d'exemple, la « mégapanne » du réseau électrique nord-américain du 14 août 2003, qui a touché en cascade le Mid West et le nord-est des États-Unis ainsi que la région d'Ontario (Canada) où des dizaines de millions de personnes se sont vues privées d'électricité [55].

L'un des réseaux les plus complexes est le réseau viaire. Il est constitué de l'ensemble des circulations piétonnes, cyclistes, automobiles et autres (rollers, transports alternatifs, ...). Sa complexité vient de sa hiérarchisation, de sa structure et de son usage. Le réseau viaire est en général hiérarchisé pour pouvoir d'un côté permettre de partager un unique espace par plusieurs usagers avec différents modes de déplacement et d'un autre côté différencier les voies par niveau (voies de transit, voies structurantes, voies secondaires d'accès à habitation et flux résidentiels, sens de circulation ...). La structure du réseau découpe également l'espace en régions cohérentes formant au niveau de la ville des blocs urbains. Cet effet structurant génère des formes plus ou moins régulières comme on peut le constater sur les photographies 5.1a, 5.1b et 5.2.

La photographie 5.1a représente la ville du Havre comme partie intégrante du territoire de la CODAH. La structure du réseau routier de son centre-ville constituant un plan hippodamien est régulière et ressemble à une grille, s'expliquant par une réalisa-

1. site web de l'Équipe Risques Majeurs (RME) de l'académie de Rouen : http://rme.ac-rouen.fr/r_me3.htm#lehavre1.



(a) La ville du Havre, principale ville du territoire de la CODAH (extrait de *Google Earth*).



(b) La commune de Palmanova, une position centrale dans la région Frioul-Vénétie julienne en Italie - $45^{\circ} 0'0.00''\text{N } 12^{\circ}59'60.00''\text{E}$ (extrait de *Google Earth*).

FIGURE 5.1: Photographies de villes à structure régulière.



FIGURE 5.2: La ville de Carcassonne , située dans la région Languedoc-Roussillon à 80km de Toulouse (extrait de *Google Earth*).

tion relativement récente puisque reconstruite après la seconde guerre mondiale. La commune italienne Palmanova (figure 5.1b) fondée en 1593 a également une structure régulière, celle d'une étoile à 9 branches.

Contrairement aux réseaux routiers du Havre et de Palmanova de structure régulière, le réseau routier de la ville de Carcassonne a une structure beaucoup moins régulière, en particulier son centre historique, comme le montre la photographie 5.2.

Structure et hiérarchie du réseau contraignent l'usage de ce dernier, quelque soit le mode de déplacement, et peuvent modifier les pratiques d'usage des moyens de transport : la création d'un tramway dans une ville peut réduire le nombre de personnes utilisant des véhicules dans leurs déplacements, à la fois par la présence d'une nouvelle offre, mais également par la nouvelle occupation de l'espace qui crée des perturbations. L'usage se fait contraint par des règles définies et peut évoluer au fil du temps, de même des règles qui le régissent. À son tour, l'usage du réseau viaire par la population influence la structure et la hiérarchisation de ce réseau à court ou à long terme. Ainsi, un grave accident de la route peut conduire à bloquer une route (court terme) ou à changer les limitations de vitesse (moyen ou long terme), voire modifier un carrefour.

5.1 Vulnérabilité et dimension spatiale

Ainsi que nous l'avons exprimé précédemment, la vulnérabilité a une dimension spatiale. Son niveau est étroitement lié à l'aménagement du territoire, à la densité de la population ainsi qu'aux activités humaines. Le territoire fonctionne via un ensemble de réseaux d'infrastructure compliqués, ancrés matériellement, partageant un même espace et possédant des interrelations entre eux et avec d'autres réseaux appartenant à des territoires limitrophes ou distants. Si nous n'oublions pas les autres réseaux, nous ne les considérerons pas dans la suite de notre propos car ils n'interviennent que très marginalement dans le contexte de notre étude.

Les réseaux d'infrastructure peuvent connaître deux types de dommage souvent dépendants :

- matériels, qui dégradent par voie de conséquence la structure ;
- fonctionnels : les services rendus par le réseau sont « moins bons ».

Suite à une catastrophe touchant l'infrastructure du réseau, le changement structurel influe sur les entités utilisant ce réseau. Nous franchissons la vision statique de l'espace et de l'occupation des sols pour nous intéresser à la dynamique. En effet, la population est très dépendante de cet ensemble de réseaux, ce qui augmente son exposition à d'éventuels dysfonctionnements de leur part. La figure 5.3 illustre le cas d'une catastrophe qui touche une partie du territoire et crée un endommagement matériel. Le réseau routier subit alors un changement structurel. Le modèle (virtuel) représentant le réseau qu'est le graphe trouve sa structure changée après la suppression de sommets et d'arcs. Ceci provoque un changement fonctionnel lié aux modifications des chemins sur le graphe. Par conséquent, les véhicules utilisant le réseau sont obligés de faire des détours et changent leurs itinéraires du fait de la perte d'une partie du graphe.

Parmi les catastrophes ayant touché des réseaux en France, nous pouvons citer les tempêtes de fin décembre 1999 qui ont traversé la France de l'ouest à l'est, la tempête de janvier 2009 qui a frappé le sud-ouest de la France et la tempête Xynthia fin février 2010 privant de courant des millions de foyers sur plusieurs jours avec des répercussions sur d'autres réseaux comme le réseau téléphonique. Les catastrophes passées nous confirment la forte interaction inter-réseaux du territoire pouvant provoquer des dommages locaux et globaux : une crise économique liée au réseau d'une ville « importante » peut influencer le réseau économique régional, national, voire international.

Importance du réseau viaire

Les différents réseaux d'un territoire sont importants pour le bon fonctionnement de celui-ci. Quant au réseau viaire, il représente un intérêt particulièrement vif pour la population et l'économie. Pour cela, une étude approfondie de ce réseau par l'intermédiaire de sa structure et de son fonctionnement est indispensable, aussi bien dans les situations normales que dans les situations de crise.

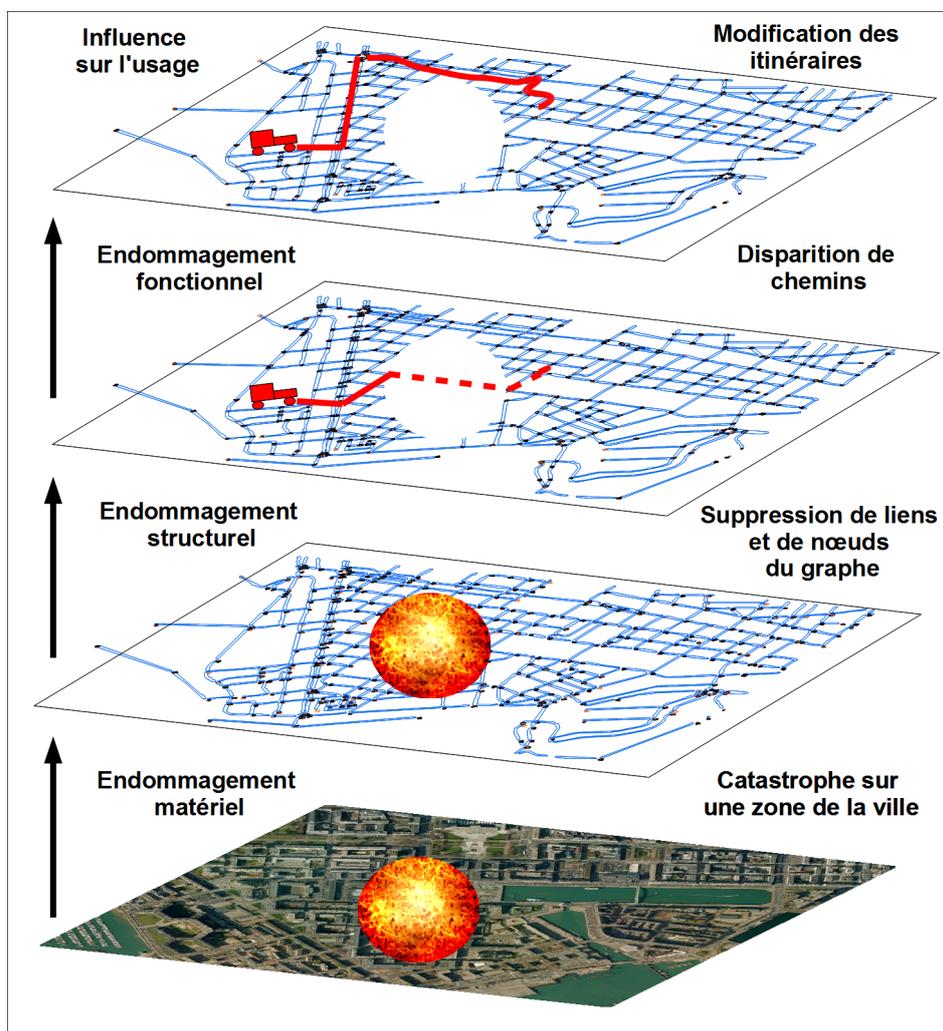


FIGURE 5.3: Liens entre endommagement matériel et fonctionnel.

- Le réseau viaire est emprunté par la population et par voie de conséquence, un endommagement matériel ou structurel influence directement les enjeux liés à la population.
- Un accident provoqué par l'erreur humaine (fonctionnel : ex. un accident de TMD) peut endommager matériellement et structurellement le réseau viaire et avoir des conséquences locales et globales sur l'ensemble du réseau et la population.
- En cas d'accident de petite ou grande ampleur nécessitant une évacuation ou une mise à l'abri, le réseau viaire reste le plus emprunté par la population.

- Le réseau viaire constitue l'un des principaux réseaux au travers desquels circulent des flux économiques importants : des dysfonctionnements peuvent avoir des répercussions économiques à l'échelle microscopique, mésoscopique voire macroscopique parfois. Des études dans ce sens ont été développées par le ministère de l'Environnement et du Cadre de vie [51] pour chiffrer le déficit financier lié à la perte de temps, suite à un endommagement de route dû aux effets de crues. Dans une étude plus récente, une méthode a été développée pour évaluer les perturbations routières dans la région Ile-de-France suite à une inondation. Elle repose sur une simulation du trafic routier et un calcul du coût des pertes lié au nombre d'heures perdues [89].
- Les désordres causés par le dysfonctionnement du réseau viaire peuvent être graves. Les délais d'intervention des secours dépendent en partie de la qualité fonctionnelle de ce réseau.
- Contrairement à d'autres réseaux, le réseau viaire est emprunté régulièrement par la population. Par conséquent, un dysfonctionnement est plus facilement détectable par cette même population qui peut réagir afin de faire remédier à l'endommagement. Suite à un tel dysfonctionnement, les services de l'État se manifestent assez rapidement pour revenir à un état normal. Dans ce sens, les autorités ont tout intérêt à renforcer la résilience du réseau suite à des dysfonctionnements.

5.2 Réseau routier

La majorité des évacuations à moyenne (ex : quartier) ou grande échelle (ex : secteur d'une ville ou ville entière) se fait en véhicules automobiles et également en partie à l'aide du transport en commun et donc via le réseau routier.

De ce fait, l'étude du réseau routier est une priorité. Nous cherchons donc à établir dans cette thèse des outils permettant d'estimer l'impact du réseau routier sur la mobilité, les éléments à prendre en considération étant à la fois structurels et fonctionnels.

L'étude de la vulnérabilité du réseau routier doit analyser sa résistance matérielle et également étudier la résistance de sa structure face aux aléas qui l'entourent. Les atteintes potentielles de la structure peuvent aussi conduire à des dysfonctionnements jusqu'à des pertes fonctionnelles du réseau.

L'analyse de la structure du réseau va donc nous permettre d'identifier des tronçons de routes qui sont plus fragiles que d'autres, *i.e.* des lieux de passage incontournables. Ces tronçons méritent une attention particulière de la part des autorités pour faire face aux phénomènes de saturation surtout lors d'une évacuation. Hormis les dégâts matériels et structurels directs, les dommages indirects dûs à la perte d'un ou de plusieurs liens fragiles rendent des parties du réseau indisponibles, ce qui compromet son fonctionnement en diminuant son efficacité dans la mise en relation entre les différentes parties du territoire. Une structure maillée comme celle du réseau routier de type Manhattan permet de trouver des chemins alternatifs en cas de dysfonctionnement d'une partie

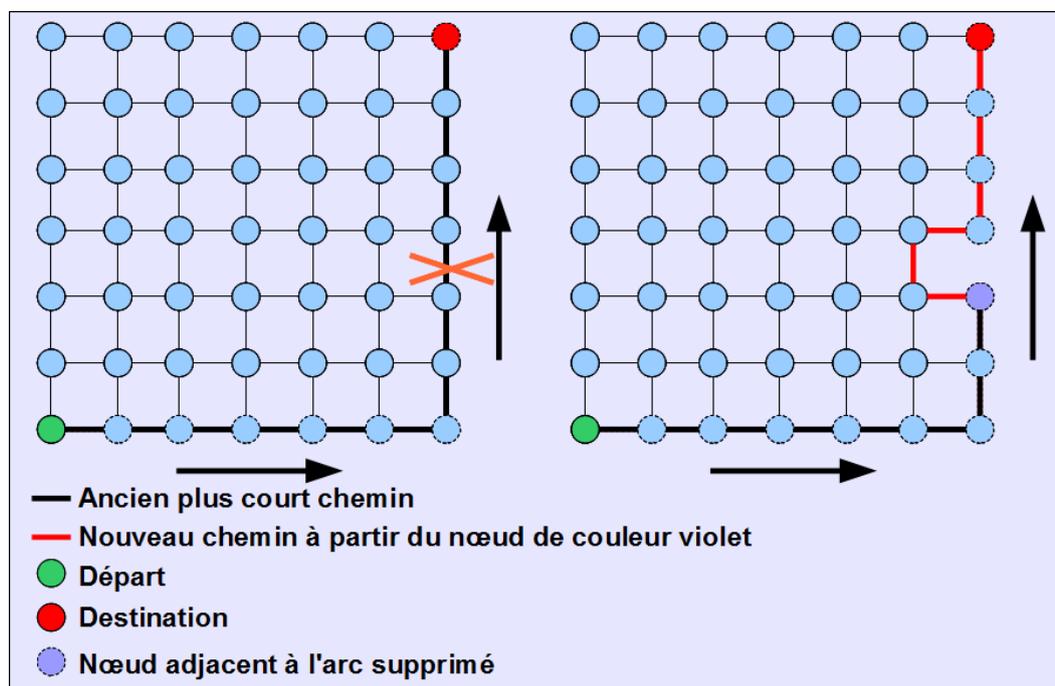


FIGURE 5.4: Influence de la perte d'un arc sur un graphe représentant un réseau routier en forme de grille de $7 * 7$ sommets.

du réseau. Un exemple de graphe en forme de grille est donné dans la figure 5.4. Dans cet exemple, le plus court chemin est calculé entre le sommet coloré en vert et le sommet coloré en rouge. La perte d'un arc de ce chemin n'a pas beaucoup d'impact sur les véhicules l'empruntant car la structure maillée du réseau compense la perte de l'arc supprimé et les véhicules peuvent éviter d'y passer sans être obligés de faire un détour considérable ; la perte de cet arc ne crée pas deux composantes connexes² du graphe.

A contrario, le même phénomène qui touche un lien faible d'un réseau de même taille que celui de la figure 5.4 à structure moins régulière peut obliger les véhicules à faire un détour important pour arriver à destination (voir figure 5.5). Pour ce qui concerne le fonctionnement et l'usage du réseau routier par les véhicules, des méthodes de marche aléatoire dans le réseau ou des méthodes basées sur des EMD permettent d'identifier des routes susceptibles d'être plus empruntées que d'autres par les véhicules. Les autorités doivent veiller à ce que la circulation sur ces routes soit toujours fluide.

Ces deux méthodes (analyse de structure et d'usage) sont en fait complémentaires. L'analyse de la structure est une méthode pessimiste par précaution, mettant en évidence des liens faibles du réseau, même si ces liens peuvent être peu ou jamais em-

2. Deux parties non connectées.

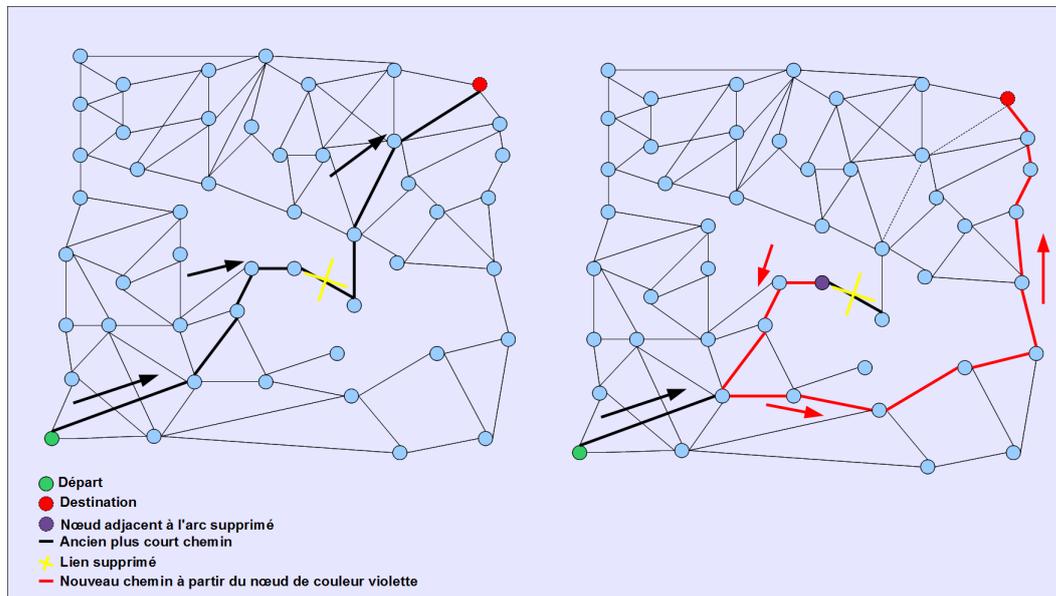


FIGURE 5.5: Influence de la perte d'un arc sur un graphe représentant un réseau routier de même taille que la celui de la figure 5.4.

pruntés par la population. L'analyse de la structure doit donc toujours être complétée par des méthodes d'usage du réseau routier mettant en évidence les routes susceptibles d'être les plus empruntées.

5.3 Recherche d'organisations dans un graphe

Avant d'introduire la modélisation par graphe et la recherche d'organisations au sein d'un graphe, il nous semble nécessaire de définir ce qu'est une organisation. Il est difficile de donner une définition universelle de l'organisation du fait que plusieurs types d'organisations peuvent coexister dans un même système. Deux types peuvent être dégagés :

- Des organisations prédéfinies par l'observateur : une organisation de ce type peut être hiérarchique et plutôt statique (ex. une entreprise) ou créée par plusieurs décideurs gérant la forme de l'organisation.
- Des organisations rétroagissant sur le système auquel elles appartiennent : un exemple peut être celui des cellules du corps humain ou des groupes sociaux humains qui s'identifient en tant que communautés à partir de la prise de conscience d'eux-mêmes.

Dans tous les cas, on remarquera qu'il y a un « dedans » et un « dehors » ; une entité donnée appartient ou n'appartient pas à l'organisation. De même, il y a deux catégories d'entités au sein d'une organisation, (i) celles interagissant uniquement avec d'autres appartenant elles-mêmes à l'organisation (ii) et celles interagissant également avec d'autres entités n'appartenant pas à l'organisation, constituant alors la frontière, l'enveloppe, la membrane de l'organisation.

L'organisation relie donc des entités homogènes ou hétérogènes qui constituent alors les composants d'un tout. Elle assure à l'ensemble une destinée / trajectoire commune et donc elle offre de la stabilité face à des perturbations aléatoires éventuelles. L'organisation relie, maintient, produit et transforme.

L'organisation s'insère et engendre un réseau d'interactions qui peut être étudié par l'intermédiaire de la théorie des graphes et plus particulièrement par le biais de son nouveau développement s'intéressant à leurs propriétés statistiques.

5.3.1 Modélisation par graphe

Le but de ce paragraphe n'est pas de faire un état de l'art sur la théorie des graphes, on pourra pour cela consulter [58], mais il nous semble intéressant d'introduire quelques notions qui justifient certains de nos choix de modélisation dans le cadre de cette thèse.

La théorie des graphes a débuté avec les travaux d'Euler au *XVIII*^e siècle et trouve ses origines dans l'étude d'un réseau viaire puisque ces travaux débutent avec le problème des 7 ponts de Königsberg. En effet, on prétend que les habitants de la ville russe de Königsberg se demandaient s'ils pouvaient traverser les 7 ponts de la ville sans passer 2 fois par le même pont et en finissant le parcours par le point de départ. La théorie des graphes a de nos jours envahi de nombreux champs scientifiques puisqu'elle est formalisée en informatique, en mathématiques et grandement utilisée en biologie, chimie, sciences sociales, linguistique, épidémiologie et physique ... La modélisation par graphe cherche d'abord, face à un problème, à choisir les entités de ce problème et à identifier les éléments du modèle correspondant. Une fois les éléments identifiés, ils seront modélisés par des sommets. Une deuxième étape cherche à identifier les relations inter entités qui nous intéressent (selon le problème à modéliser) pour les modéliser en tant qu'arêtes (ou arcs si le graphe est orienté) dans le modèle.

D'une manière générale, le graphe représente la structure d'un réseau. Comme d'autres types de réseaux, le réseau routier est généralement modélisé par un graphe où les tronçons de route sont représentés par des arêtes (ou arcs si graphe orienté) et les nœuds par des sommets. Le graphe est non orienté et les connexions seront nommées des arêtes dans le cas inverse (connexions non orientées). Un graphe est normalement noté par $G = (V, E)$ où V représente l'ensemble des sommets et E l'ensemble des arêtes (ou arcs). Le graphe peut également être pondéré. La pondération sur une arête peut

3. voir http://fr.wikipedia.org/wiki/Problème_des_sept_ponts_de_Königsberg.

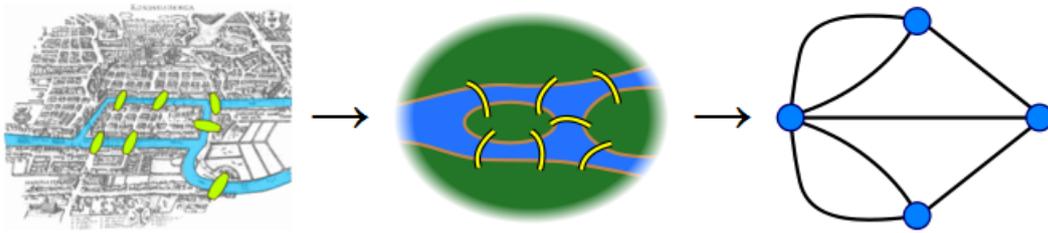


FIGURE 5.6: La ville de Königsberg (aujourd'hui Kaliningrad) est construite autour de deux îles³.

représenter, entre autres, la longueur ou le temps mis pour franchir cette arête selon le problème modélisé.

Un multigraphe est un graphe pour lequel peuvent coexister plusieurs arêtes (ou arcs s'il est orienté) entre deux sommets. Ces arêtes (resp. arcs) sont appelés liens (resp. arcs) parallèles ou liens (resp. arcs) multiples. Dans de nombreux problèmes où plusieurs relations peuvent exister entre un même couple d'entités, la modélisation par multigraphe est souvent utilisée. Le réseau routier à plusieurs tronçons entre deux points adjacents ou à plusieurs voies de circulation est parfois représenté par un multigraphe.

Le graphe peut être statique s'il ne subit pas de changement de structure. Il est dynamique si des sommets et des arêtes (resp. arcs) peuvent être ajoutés ou supprimés. Il est également dynamique si la valuation sur les arêtes (resp. arcs) change au cours du temps. Ainsi, le réseau ferroviaire peut éventuellement être modélisé comme un graphe statique car n'ayant pas une grande variabilité dans le temps.

En revanche, un réseau social comme « Facebook » pourrait être modélisé par un graphe dynamique dans lequel de nombreux sommets se créent (création d'un nouveau compte d'utilisateur) et disparaissent (suppression de compte) et des arêtes représentant les relations changent (nouvelle amitié ou suppression d'amis).

5.3.2 Grands graphes

Nous entendons dans ce travail par grand graphe un graphe qui a un nombre important de sommets liés entre eux, correspondant au modèle de représentation que les anglo-saxons appellent « Complex networks ». Ces graphes peuvent être issus d'une base de données réelles comme pour un réseau routier, ou de données simulées. En quoi diffère un grand graphe d'un graphe « normal » ? La réponse réside non seulement dans la taille des instances considérées, plusieurs milliers de sommets, mais aussi dans les techniques d'analyse. Il s'agit en effet d'étudier des propriétés macroscopiques émergentes à partir des interactions microscopiques (inter-sommets) et l'influence, par exemple, de la perte en « moyenne » d'un ou de plusieurs sommets au niveau global du graphe, aussi bien dans sa structure que dans son usage. Ces propriétés émergentes ne sont pas liées



FIGURE 5.7: Multigraphe correspondant au centre ville du Havre. Non orienté pour des raisons de représentation.

à un sommet donné comme pour les graphes de petite taille où par exemple la perte d'un sommet de type point d'articulation génère deux composantes connexes. Si l'on considère des *grands graphes*, la probabilité de créer des composantes connexes suite à la perte d'un sommet est faible, bien qu'elle ne soit pas nulle.

Communautés dans un graphe

Le développement de méthodes d'analyse de structure dans les grands graphes est un domaine très actif qui intéresse des chercheurs venant de domaines variés et se situe à l'interface de plusieurs disciplines (mathématiques, informatique, statistiques...). Nous esquisserons dans ce chapitre les différentes approches liées à la détection de communautés afin que l'on puisse comprendre l'intérêt de cette démarche. Le chapitre 7 portant sur la mise en œuvre abordera plus en profondeur ce thème.

S'il n'existe pas de définition formelle unique pour une communauté dans un graphe, il est possible d'en donner une définition intuitive : une communauté appartenant à un graphe G est un ensemble de sommets de G plus fortement connectés entre eux (à

l'intérieur de la communauté) qu'avec les autres sommets appartenant au graphe. Tous les graphes ne présentent pas de communautés. La détection de communautés dans un graphe permet d'identifier des zones d'un graphe fortement denses et peu connectées entre elles permettant de mieux comprendre la structure du graphe et de dégager des propriétés macroscopiques non triviales au niveau microscopique. Les différentes approches de détection de communautés s'appuient sur deux grands domaines : le partitionnement de graphes et le clustering de données. Ces approches ainsi que leurs principales méthodes de résolution seront étudiées davantage dans le chapitre 7.

L'étude de la mise en place d'un processus dans un graphe sera aussi étudié dans le même chapitre grâce à un algorithme de marche aléatoire.

5.4 Modèle

Dans cette section, nous présentons notre modèle d'aide à la décision dans le cadre de la prévention et de la gestion des risques. Nous nous intéressons particulièrement aux problèmes nécessitant une évacuation. Dans le cadre de la prévention des risques, nous analysons le réseau routier, représenté par un multigraphe pondéré, dans sa structure et dans son fonctionnement avant même l'occurrence d'un risque. Pour l'aspect structurel, nous étudions l'influence que représente la structure du réseau sur la fluidité des flux, et ceci à trois niveaux d'échelle : microscopique, mésoscopique et macroscopique. Concernant le fonctionnement du réseau routier, le but est d'identifier des routes du réseau qui sont susceptibles d'être utilisées plus que d'autres à tout moment de la journée. Plusieurs méthodes complémentaires peuvent être utilisées pour recueillir des données sur l'usage des routes par les véhicules. Nous pensons notamment aux méthodes de comptage de trafic, des méthodes d'EMD ou des méthodes de simulation du trafic routier ou de marche aléatoire.

Nous avons aussi développé un modèle de mobilité consistant à mettre en place un modèle simple de trafic routier et une méthode de blocage d'une éventuelle zone sinistrée. Les aspects « prévention des risques » et « gestion des risques » sont couplés afin de pouvoir mieux gérer une situation d'urgence.

5.4.1 Modélisation de l'environnement

Notre étude est limitée à l'analyse du rôle du réseau routier dans sa structure et son fonctionnement, en mode normal (sans accident) et en cas d'accident, voire de catastrophe. Le réseau routier est représenté par deux couches dans un SIG : une couche de nœuds connectant les routes ou correspondant à leurs extrémités et, une couche de connexions correspondant aux routes. Les deux couches contiennent des attributs riches en information permettant d'expliquer des caractéristiques importantes facilitant la navigation sur le réseau routier. La couche des connexions donne des informations sur chaque route : sa longueur, la vitesse moyenne pour la franchir (nous pouvons

donc déduire le temps moyen pour la franchir), la vitesse maximale, le sens de circulation, la largeur, le nombre de voies et bien d'autres caractéristiques importantes. Les informations à dégager des nœuds (à part leurs coordonnées) sont nettement moins nombreuses que celles des connexions mais peuvent servir à savoir s'il s'agit d'un nœud extrémité, d'un rond-point ...

Nous ne détaillerons pas dans ce manuscrit les aspects techniques d'extraction d'informations de la base de données géographiques, bien que cela ait donné lieu à un développement lourd car relèvent des aspects technologiques de notre travail. En revanche, il nous semble nécessaire d'exposer notre approche de modélisation du réseau. Ce dernier est représenté par un multigraphe orienté, pondéré et dynamique $G(t) = (V(t), E(t), W(t))$ où $V(t)$ est l'ensemble de sommets, $E(t)$ l'ensemble des arcs et $W(t)$ l'ensemble des poids sur les arcs à l'instant t :

- Les nœuds de la base de données géographique sont modélisés par des sommets dans le multigraphe.
- Une connexion de la base de données géographique est modélisée par un ou plusieurs arcs selon ses caractéristiques :
 - Une connexion à sens unique est représentée par n arcs de même sens (si n est le nombre de voies de la ligne).
 - Une connexion à double sens est représentée par n_1 arcs dans un sens et n_2 arcs dans le sens inverse (n_1 et n_2 représentent le nombre de voies par sens).
 - La capacité maximale C_m en nombre de véhicules par arc est égale à L/l où L est la longueur de l'arc (de la route correspondante) et l est la somme de la longueur moyenne d'un véhicule et de la distance frontale inter-véhicules.
- La valuation sur chaque arc à l'instant t représente le temps nécessaire pour le franchir selon la charge actuelle du trafic.
- La dynamique porte sur la valuation des arcs, qui est susceptible d'évoluer dans le temps, en fonction de l'évolution de la fluidité de la circulation par exemple. La dynamique peut également s'étendre à l'existence des sommets et des arcs : des sommets et des arcs peuvent être créés ou retirés suite à un accident de la route ou une catastrophe touchant une partie du réseau routier, des travaux, une ouverture ou une fermeture d'un pont, mais aussi à long terme, une modification dans l'aménagement du réseau routier.

5.4.2 Vulnérabilité structurelle : micro, méso, macro

Nous étudions l'importance de la structure du réseau routier sur la fluidité du trafic routier. Pour cela, nous analysons la structure du réseau routier à trois niveaux d'échelle : microscopique, mésoscopique et macroscopique.

Au niveau microscopique, nous développons deux méthodes pour étudier l'influence de la perte locale d'un arc, suite à un éventuel accident, sur le fonctionnement du réseau routier. Nous savons qu'en général, les connexions d'un réseau n'ont pas le même ordre

d'importance. Parfois, la perte d'une connexion peut être compensée dans une zone fortement connectée mais dans certains cas, une telle perte induit des détours considérables, surtout quand cette connexion représente un lieu de passage incontournable. Au niveau mésoscopique, nous avons recours au calcul de la centralité d'intermédiarité adaptée au multigraphe [75, 76]. Cette méthode calcule l'importance de chaque arc et de chaque sommet au sein du multigraphe au sens du nombre de plus courts chemins y passant.

Au niveau macroscopique, nous avons développé une méthode de clustering hiérarchique. Il s'agit d'analyser l'effet de la perte d'un ou de plusieurs arcs au niveau global du multigraphe. Ces arcs faibles correspondent aux liaisons inter-communautés. Les autorités doivent donc veiller en permanence, surtout lors de dysfonctionnement, à ce que les liens faibles soient toujours fluides.

5.4.3 Vulnérabilité fonctionnelle : marche aléatoire et enquête ménage

L'identification des arcs faibles dans un multigraphe (ou un graphe) est une approche intéressante sur les trois niveaux d'échelle (micro, méso et macro). Néanmoins, la perte d'un arc faible dans une zone très peu empruntée par les véhicules aura probablement moins de conséquences que la perte d'un arc moins faible mais dans une zone très empruntée. Pour cela, il faut compléter les méthodes d'analyse de la structure du multigraphe par des éléments décrivant l'usage des routes afin d'identifier celles qui seraient susceptibles d'être empruntées plus que d'autres. Nous avons donc développé :

- Une méthode basée sur un recueil de données provenant d'une EMD qui prend en compte les déplacements sur le territoire de l'estuaire de la Seine englobant la CODAH. Les déplacements considérés se font à l'aide de véhicules individuels. Plus de détails seront expliqués plus amplement dans le chapitre 6.
- Une méthode de marche aléatoire biaisée sur le multigraphe. Cette méthode consiste à positionner des marcheurs se déplaçant aléatoirement sur le multigraphe et, arrivant au bout d'un arc, choisissent un arc adjacent avec une probabilité dépendant de son poids. À la fin de la simulation, le nombre de passages par chaque arc est calculé et de cette façon, les routes sont classées par ordre d'usage. Cette méthode sera présentée en détails dans le chapitre 7.

5.4.4 Mobilité

Un modèle de mobilité est indispensable afin de comprendre l'usage du réseau routier par les véhicules, en situation normale comme en situation de crise. Ce modèle doit prendre en compte certaines règles d'usage du réseau routier (priorités, limitation de vitesse, ...) et des règles de comportement des entités utilisant le réseau.

Plus formellement, nous avons développé un modèle de trafic routier inspiré du Code de la route français. Il est basé, entre autres, sur une distance de sécurité à respecter entre deux véhicules qui se suivent, une distance de freinage à respecter, une accélération

maximale, une décélération maximale et le respect des limitations de vitesse. Chaque véhicule dans le modèle a un certain comportement selon la situation dans laquelle il se trouve :

- En mode normal, chaque individu choisit ses itinéraires en fonction de ses besoins.
- En situation de crise, les itinéraires planifiés de l'individu peuvent changer au moment où il perçoit le danger ou reçoit un ordre d'évacuation.

Notre modèle est capable, à la demande de l'utilisateur, de créer une zone sinistrée quelconque, de demander à l'utilisateur de sélectionner manuellement une zone ou de lire des fichiers géographiques (des couches venant d'un SIG) générés par des outils de modélisation d'aléas comme le logiciel « SAFER Hazmat Responder » présenté dans le chapitre 3 permettant de générer une zone d'affectation par un nuage toxique. Pour cela, notre système recueille les informations nécessaires pour pouvoir projeter la zone d'affectation sur le réseau routier et construire la zone affectée sur ce réseau. Dans une situation de crise, le rôle des autorités dans notre modèle est de :

- Délimiter la zone sinistrée par un algorithme détaillé dans le chapitre 9. Cet algorithme a l'avantage d'entourer la zone de danger et de choisir les sommets stratégiques sur lesquels il faut placer les forces de l'ordre afin de bloquer toute entrée vers la zone sinistrée.
- Bloquer les flux entrants vers la zone sinistrée et les réorienter vers l'extérieur.
- Diriger les individus qui étaient à l'intérieur de la zone vers l'extérieur.

5.5 Vulnérabilité et morphodynamique

Un territoire s'inscrit dans l'espace, il s'identifie et se caractérise en particulier par sa forme qui évolue au gré des transformations, il laisse une trace (dans l'espace) de sa morphodynamique. Cette morphodynamique est fortement liée aux évolutions structurelle et fonctionnelle des réseaux et en particulier du réseau viaire. Avant d'aborder ce dernier point, nous nous proposons de revenir sur les notions de structure et de forme. Ainsi, la structure peut se définir d'une manière générale par la façon dont les éléments participants d'un système sont organisés entre eux. C'est une notion plus statique que l'organisation qui trace un contour par l'intermédiaire des dépendances qu'elle regroupe. La forme, quant à elle, s'inscrit dans l'espace et le temps. Elle offre une représentation spatiale de l'organisation et de la structure. Elle crée une continuité mettant en évidence le destin commun d'un groupe d'entités éléments de la forme, qui co-évoluent. La morphodynamique traduit les interrelations entre la forme et un processus dynamique sur cette forme.

Au cours du temps, les territoires ne cessent de se modifier. Leurs évolutions sont liées à des phénomènes naturels et anthropiques. Les activités humaines ne cessent d'évoluer et par conséquent, la morphologie urbaine change continuellement. La morphodynamique du territoire est liée en partie à ses réseaux et particulièrement à l'utilisation du

réseau viaire qui ne cesse de croître, se structurer et se restructurer à court et à long terme, au niveau microscopique comme au niveau macroscopique.

Ainsi, on trouve des phénomènes répétitifs habituels qui changent la morphologie régulièrement. La population se déplace via le réseau viaire d'une manière répétitive. Ainsi, à un niveau microscopique, chaque personne a des stratégies de choix de ses modes de déplacement et des itinéraires liés à ses besoins (travail, shopping, loisirs ...). Le choix des itinéraires peut être lié à l'optimisation du temps de parcours ou de la distance ou au fait d'éviter de prendre des routes susceptibles d'être moins fluides à certaines heures de la journée. À un niveau global, les pratiques de la population et les interactions entre les différentes personnes sur le réseau viaire font émerger un comportement global qui contraint chacun de ces individus et contraint l'environnement. En effet, la morphologie liée à ces activités subit des changements considérables au cours de la journée. Ainsi, des pics de trafic se forment correspondant aux heures dites de pointe le matin et à la fin de la journée où se créent des bouchons dans des parties importantes du réseau.

À long terme, la croissance de la population par effet mécanique et l'évolution des technologies et des lois d'aménagement, entre autres, peuvent conduire à des changements du réseau dont la structure se modifie pour s'adapter aux changements liés aux activités humaines et à la croissance de la population. Les transformations progressives subies par le réseau et plus globalement par le territoire peuvent être lentes comme lors de l'installation d'un tramway dans une agglomération ou un peu plus rapide à l'occasion d'une réhabilitation d'un quartier par exemple. Inversement, une transformation peut avoir lieu sur une échelle de temps courte en cas d'une rupture liée à un phénomène créant une perturbation forte provoquant un changement brusque de la forme du réseau et de son territoire.

La figure 5.8 illustre dans sa partie gauche un cas fréquent dans le monde réel de deux routes qui se croisent en un point d'intersection. Les véhicules arrivant à ce point se trouvent dans un cas de conflit où chacun hésite à attendre le passage de celui qui est plus prioritaire que lui ; il s'agit dans ce cas de figure de la priorité à droite. Le fait d'ajouter un rond-point au lieu du point d'intersection occupe peut être plus d'espace mais règle en partie la circulation et contribue à la minimisation du nombre d'accidents. Dans la partie droite de la figure 5.8, le nombre de sommets a augmenté ; le degré de ces derniers n'étant pas très élevé, le conflit sur ces sommets a donc diminué. L'ajout des rond-points a montré son efficacité ces dernières décennies en France en terme de régulation de la circulation et de diminution d'accidents.

Une des techniques pour comprendre la morphologie liée à la structure est d'analyser la façon dont le territoire est structuré et organisé. Plus formellement, les méthodes de détection de communautés que nous avons exposées auparavant dans ce chapitre constituent des méthodes indispensables à la compréhension de la manière selon laquelle le territoire est organisé et structuré. Ainsi, chaque communauté identifiée a une certaine forme délimitée par une membrane qui est formée des sommets de la communauté ayant des liens avec les autres communautés. L'analyse de la morphologie globale du

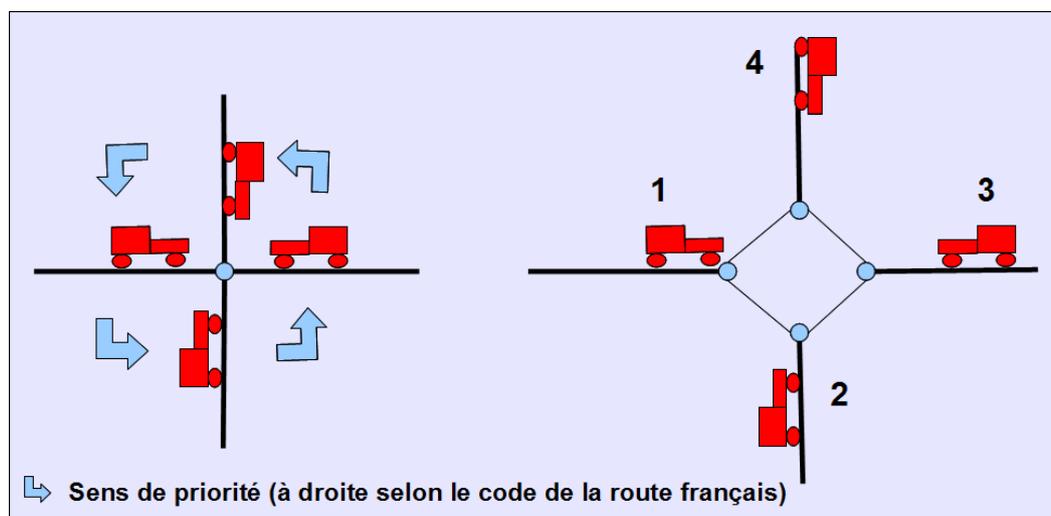


FIGURE 5.8: Exemple d'impact d'ajout d'un rond-point sur la circulation.

territoire et plus précisément du réseau viaire passe par l'analyse des organisations et des formes liées à ces organisations.

Dans le cadre du risque, la morphodynamique du territoire est liée aux changements à court et à long terme que peut provoquer une catastrophe, au niveau microscopique comme au niveau macroscopique. Ainsi, au niveau microscopique, un accident de la route peut provoquer :

- à court terme, des bouchons liés à la perte d'une ou de plusieurs routes ;
- à long terme, un changement structurel ou organisationnel lié à l'ajout de routes, de rond-points ou au changement de limitation de vitesse ...

Si l'on se place à une échelle macroscopique, l'occurrence d'une catastrophe, touchant une partie du territoire, peut provoquer :

- à court terme, une saturation du réseau suite à la perte d'une partie de ce réseau. Les itinéraires des véhicules changent suite aux détours liés à la suppression éventuelle d'arcs et de sommets ;
- à long terme, des changements considérables dans la structure du réseau et dans son usage (élargissement de routes, ajout de ponts, de rond-points, de feux de circulation, changement de limitation de vitesse, interdiction de circulation ...).

Troisième partie

Prévention et évacuation

Le risque peut toucher un territoire contenant plusieurs enjeux vulnérables. L'étude du risque passe donc évidemment par l'étude du territoire pouvant subir ses effets. Dans la partie II, nous avons développé notre vision du territoire dans ses rapports avec des groupes humains qui l'occupent et l'aménagent. Nous avons aussi montré que le territoire peut être assimilé à un système complexe évolutif par les pro-actions et les rétro-actions liant un ensemble d'entités l'occupant et le gérant. Nous nous sommes également interrogé sur la vulnérabilité du territoire, sa robustesse et ses capacités de résilience face au risque et avons montré que les agglomérations dont la CODAH en son réseau viaire réunissent les propriétés remplies par un système complexe. Le réseau viaire en sa structure et son fonctionnement a été étudié dans le chapitre 5. Le réseau routier a particulièrement de l'importance dans notre travail puisque nous nous intéressons aux risques nécessitant une évacuation et que cette dernière s'effectue principalement via le réseau routier. Nous nous intéressons à l'influence de ce dernier, modélisé par un multigraphe, sur l'écoulement en étudiant sa structure à différents niveaux d'échelle. Comme pour l'étude de la structure d'un réseau, l'étude de la mobilité des véhicules l'empruntant en situation normale comme en situation a aussi été introduite avant que ces deux aspects soient développés davantage dans cette la partie III.

La partie III est consacrée à notre contribution dans le cadre de prévention et de gestion des risques passant par la quantification des enjeux exposés du territoire, l'analyse de la vulnérabilité des réseaux et à la mobilité dans une situation normale comme dans une situation de crise.

Nous proposons donc dans le chapitre 6 une méthode d'estimation de distribution de la population se trouvant dans les bâtiments mais aussi ceux empruntant le réseau routier en exploitant une EMD. L'analyse de la vulnérabilité du réseau routier est étudiée grâce à un algorithme de détection de communautés (clustering hiérarchique) appliqué sur le multigraphe représenté dans le chapitre 7. L'usage du trafic routier est décrit dans le chapitre 8 par un modèle microscopique représentant l'écoulement.

Les chapitres 6, 7 et 8 alimentent le chapitre 9 constituant un outil d'aide à la décision cohérent permettant d'organiser une évacuation, se servant des méthodes de détection de vulnérabilité liée à la structure du réseau routier mais aussi du modèle de trafic routier. Ce dernier chapitre de cette partie permet également de montrer de nombreuses expérimentations caractérisant les indicateurs essentiels d'une gestion de risques multi-échelle.

DONNÉES RELATIVES À LA POPULATION EXPOSÉE AUX RISQUES

6.1	Vision statique : modèle PRET-RESSE	118
6.1.1	Modèle PRET : hypothèses et démarche	118
6.1.2	PRET-RESSE : résultats et scénario de danger	120
6.1.3	Exemple opérationnel	120
6.2	Vision dynamique : Enquête Ménage Déplacements	121
6.2.1	Méthodologie générale de l'enquête ménage	123
6.2.2	Modèle de déplacements	124
6.2.3	Simulation des déplacements sur le réseau routier	127
6.2.4	Population exposée sur le réseau routier	129
6.2.5	Quelques limites de l'enquête ménage	131

Pour une meilleure gestion des risques, les autorités publiques sont amenées à bien identifier les enjeux exposés, le plus important de ces enjeux restant la population et sa localisation spatiale à tout instant ; ce qui revient à définir où, quand et combien d'individus se trouvent à un endroit donné. L'INSEE a construit une base de données de recensement des populations à l'échelle de l'îlot. Cette méthode de recensement ne donne pas d'informations sur la population dans les bâtiments. Pour combler cette lacune, l'équipe DIRM de la CODAH a développé un modèle nommé PRET-RESSE¹ qui

1. Population Réaliste dans l'Espace et le Temps sur le bassin de Risques majeurs de l'Estuaire de Seine [20].

détermine l'allocation spatio-temporelle (diurne / nocturne) de la population à l'échelle du bâtiment [20]. Si ce modèle permet de localiser les individus pendant la journée aussi bien sur leur lieu de travail qu'à leur domicile par exemple, il ne prend pas en compte la mobilité, *i.e.* leurs déplacements sur le réseau routier pendant la journée. Afin de compléter **PRET-RESSE**, la **CODAH** a exprimé le besoin de disposer d'un modèle de déplacement des populations. Nous avons donc exploité une **EMD** permettant de mieux localiser la population en déplacement. En effet, une **EMD** consiste à recueillir les pratiques de déplacements d'une population urbaine afin de recenser les habitudes et les besoins en matière de déplacement dans le but d'adapter en conséquence les politiques publiques liées à la mobilité. Par extension, à l'aide de ces informations, il est alors possible d'élaborer un modèle de mobilité utilisant le réseau viaire. Ce chapitre vise à détailler ces deux modèles d'allocation de la population.

6.1 Vision statique : modèle **PRET-RESSE**

Les méthodes traditionnelles de quantification de la population reposent sur des supports matriciels (grilles géométriques régulières : photographies aériennes, images satellitaires, ...) ou vectoriels (occupation du sol, données topographiques, ...) et ce, sur des bases de données démographiques (recensement de population) [35]. La figure 6.1 représente le recensement général de la population de l'agglomération havraise au lieu de résidence de 1999 en fonction de leur lieu de résidence.

Ces méthodes présentent les limites suivantes :

- La dimension des îlots n'est pas homogène ; en effet, ces derniers peuvent être très différents tant au niveau de la superficie qu'au niveau du nombre d'individus. Un exemple est donné dans la figure 6.1. Elle représente les îlots des communes de la **CODAH** définis par l'**INSEE**. La couleur des îlots varient entre le plus clair et le plus foncé selon le nombre d'individus y habitant.
- La dimension temporelle : une base de données qui permet de suivre les déplacements des personnes n'existe pas. L'**INSEE** dispose des informations sur l'îlot d'habitat et la commune de travail de la population active pour lesquelles des erreurs de double comptage sont parfois à déplorer.

Ces carences se traduisent en matière de connaissance des enjeux pour ce qui concerne un aléa à une dynamique rapide. Le modèle **PRET-RESSE** tente de répondre partiellement à ces lacunes.

6.1.1 Modèle **PRET** : hypothèses et démarche

L'objectif du modèle Population Réaliste dans l'Espace et le Temps (**PRET**) est de définir un modèle de représentation de la localisation de la population à l'échelle du bâtiment en prenant en compte en particulier la troisième dimension, que constitue le relief du territoire, et d'intégrer les variations diurnes / nocturnes [20].

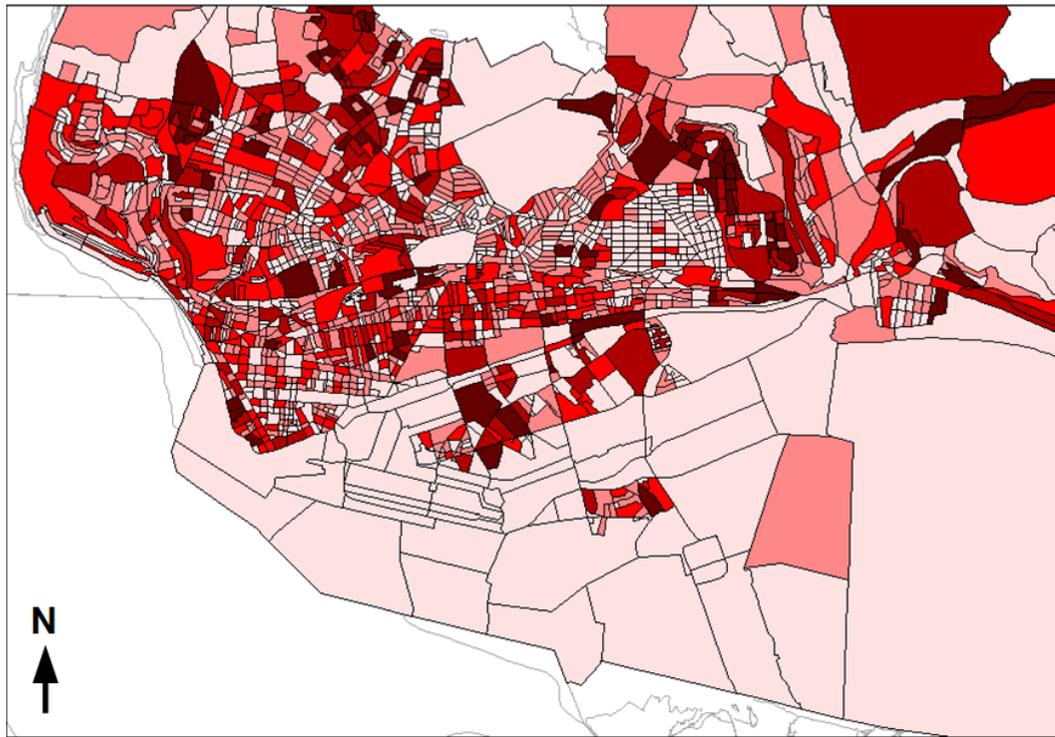


FIGURE 6.1: Allocation spatiale de la population dans l'agglomération à l'échelle de l'îlot INSEE (copie d'écran SIGRIMAS).

Les données représentatives sont ensuite stockées dans SIGRIMAS, présenté dans le chapitre 3, afin de pouvoir estimer la population éventuellement exposée lors d'un phénomène dont l'impact spatial est connu. Pour cela, de multiples sources d'informations et de bases de données ont été exploitées (IGN² base îlots, données de populations actives, IGN BD TOPO ...) sous la forme de traitements au niveau SIG, dont deux principalement : la ventilation de la population INSEE de l'îlot au bâtiment et le géocodage au bâtiment via des données liées aux établissements économiques du fichier Système Informatique pour le Répertoire des Entreprises et de leurs Établissements (SIRENE), aux ERP et aux établissements d'enseignement. Ces traitements sont faits sous les hypothèses suivantes :

- La plupart des personnes sont considérées dans les bâtiments de l'agglomération pendant la journée ; celles qui sont à l'extérieur ne sont pas prises en compte, ce

2. L'IGN a pour missions principales d'assurer la production, l'entretien et la diffusion de l'information géographique de référence en France. Héritier d'une longue lignée de cartographes, l'IGN intervient depuis 1940 sur toutes les opérations concernant la cartographie du territoire français.

qui constitue une limite du modèle. Dans la section 6.2, nous présenterons une méthode qui étend le modèle en s'appuyant sur l'EMD.

- Les personnes sont considérées chez elles entre 02h00 et 06h00 du matin.
- La population active occupant un emploi ainsi que la population en âge scolaire s'absentent de leur résidence le jour.
- La population inactive ou active sans emploi est considérée dans son lieu de résidence la journée.
- La population qui fréquente des ERP (établissements commerciaux, sociaux, culturels, ...) est quantifiée selon une approche maximaliste (sur la base de la capacité maximale des ERP).

Suite aux traitements, on a établi :

- la population résidentielle au lieu de résidence, ceci la journée et la nuit ;
- la population diurne au lieu de travail, sachant que les données nocturnes sur le lieu de travail ont été « négligées » par manque d'informations ;
- la population diurne et nocturne totale au lieu de résidence.

6.1.2 PRET-RESSE : résultats et scénario de danger

PRET-RESSE a permis le passage de l'échelle spatiale de l'îlot vers un niveau plus fin de représentation que constitue le bâtiment. La méthode d'estimation de la population dans les bâtiments consiste en partie à projeter, sans double comptage, les données des îlots sur les bâtiments selon leur surface et leur nombre d'étages et permettant de localiser la population touchée par un aléa dans chaque bâtiment. Ainsi, le fait de connaître le nombre d'individus habitant dans un bâtiment au sommet d'une colline permet d'éviter une évacuation lors d'un aléa comme une inondation alors qu'en utilisant l'îlot comme seul niveau de représentation, le décideur sera tenté d'évacuer tout l'îlot.

La figure 6.2 montre le résultat de cet outil. Il est à noter que la commune de Gonfreville-l'Orcher est plus peuplée le jour que la nuit car s'agissant d'une zone industrielle, le nombre de salariés y est important.

6.1.3 Exemple opérationnel

Un scénario de propagation d'un nuage toxique, dans le cas d'un accident éventuel de TMD (wagon de chlore), a été modélisé grâce au logiciel SAFER décrit dans le chapitre 3. Trois niveaux d'exposition ont été fixés (exposition forte, moyenne et faible) comme le montre la figure 6.3. L'effectif de la population exposée est lié à la mobilité pendulaire pour un même scénario tel que présenté dans le tableau 6.1).

Le modèle permet donc de localiser la population dans les bâtiments de jour comme de nuit. Cependant, la population utilisant le réseau routier n'est pas prise en compte. Pour cela, nous avons exploité les résultats de l'enquête ménage en reconstruisant les déplacements afin de quantifier la population utilisant le réseau routier à n'importe quelle heure de la journée ainsi que développé dans la section 6.2.

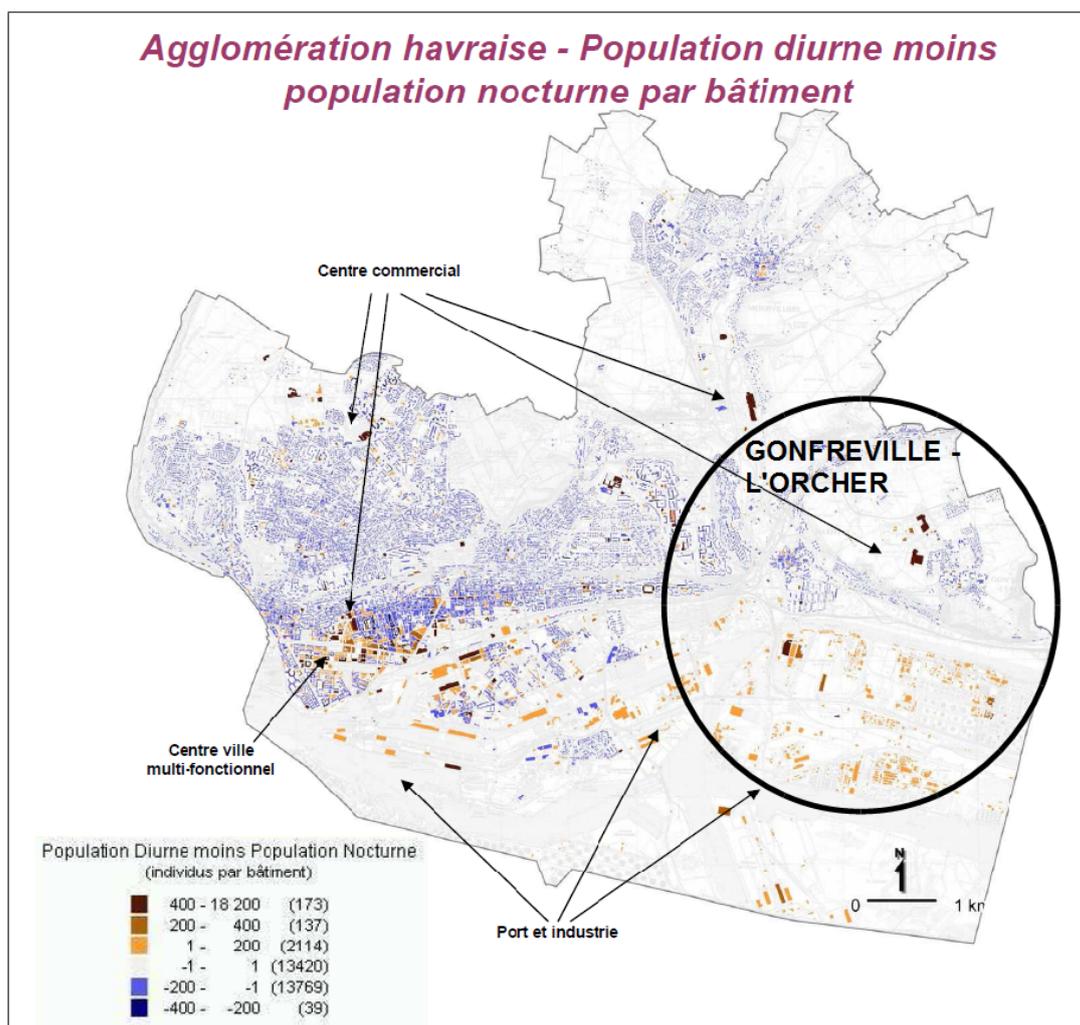


FIGURE 6.2: La distribution diurne et nocturne de la population développée dans [20].

6.2 Vision dynamique : Enquête Ménage Déplacements

Les approches habituelles définissent la notion d'estimation de vulnérabilité par la distance métrique liée à la proximité d'un aléa. Ainsi que l'indique E. Bonnet dans [18], les aspects spatio-temporels doivent être étudiés et pris en compte. En France, les scénarii les plus catastrophiques (approche dite « pessimiste » dans le domaine des risques industriels - PPI) sont pris en compte pour calculer la vulnérabilité. Il s'agit d'une approche maximaliste. Cependant, la quantification de la population vulnérable dans un

6. DONNÉES RELATIVES À LA POPULATION EXPOSÉE AUX RISQUES

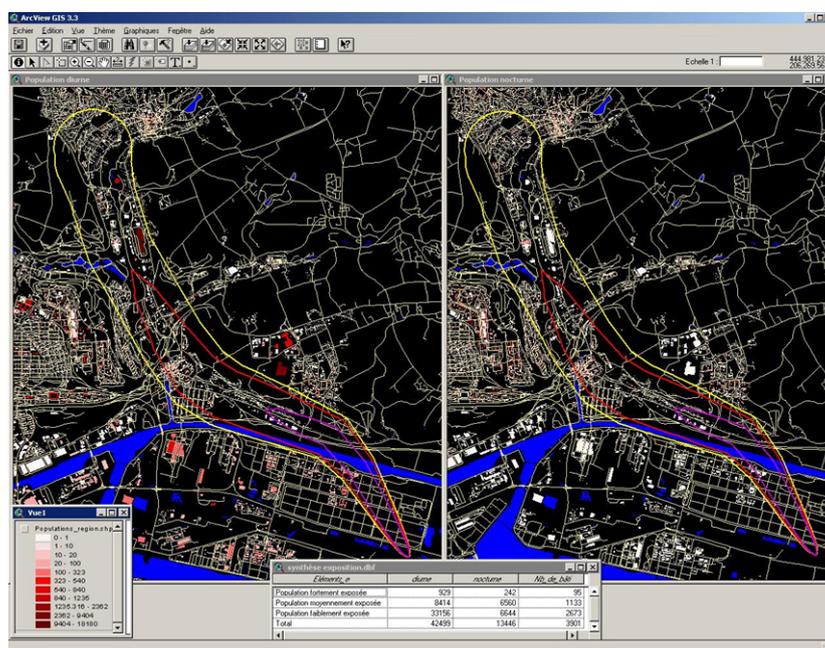


FIGURE 6.3: Scénario de population exposée à un nuage toxique.

Population exposée	Diurne	Nocturne	Différence	Nb de bâtiments
fortement	929	242	687	95
moyennement	8414	6560	1854	1133
faiblement	33 156	6644	26 512	2673
Total	42 499	13 446	29 053	3901
% de la population totale	13.28%	4.2%	9.07%	

TABLE 6.1: Statistiques d'exposition de la population au nuage.

certain espace ne doit pas se limiter aux personnes dont l'habitat est proche des sources de danger : toute la population n'est pas sur le lieu de résidence ou de travail pendant la journée, d'où l'intérêt de prendre en compte la population à l'extérieur, notamment les individus empruntant les réseaux routiers.

Lors de la prise en considération de la dynamique au niveau d'une communauté d'agglomération, cela pose nécessairement le problème de la mobilité et des transports est nécessairement posé.

Le Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques (CERTU) assure un rôle incontournable en conduisant plus particulièrement

quatre types d'enquêtes :

- les **EMD** ;
- les enquêtes annuelles sur les transports collectifs urbains ;
- les enquêtes annuelles sur les transports collectifs départementaux ;
- les enquêtes sur le stationnement.

L'**EMD** est un outil de connaissance des pratiques de déplacements d'une population urbaine résidant à l'intérieur d'un territoire d'étude contenant au minimum le périmètre des transports urbains. Elle est basée sur une méthodologie standardisée dont le protocole fixe les éléments suivants :

- L'enquête est généralement réalisée au domicile des ménages en face à face auprès de toutes les personnes résidentes âgées de plus de cinq ans.
- L'enquête se déroule du mardi au samedi sur les déplacements de la veille, sur une période (excluant les jours fériés et les vacances) de dix semaines entre le 15/10 et le 30/04.

Les données recueillies sont de deux natures :

- les caractéristiques du ménage ;
- les habitudes d'utilisation des modes de transport intégrant plus particulièrement la description des déplacements de la veille (motif, mode, heure, ...).

Elles sont complétées par une enquête d'opinion sur la mobilité.

En 2007, la **CODAH** a lancé une **EMD** sur son territoire, mais également la Communauté de Communes de Saint Romain de Colbosc (**CCSRC**) et la commune de Tancarville.

6.2.1 Méthodologie générale de l'enquête ménage

Deux méthodologies d'enquête sont généralement suivies. Dans les secteurs denses des agglomérations de plus de 100 000 habitants, les personnes sont interrogées en « face à face », alors que dans les territoires périurbains moins denses et éloignés des centres des agglomérations, elles le sont par téléphone [57]. Selon la méthode **CERTU**, l'aire de l'enquête est divisée en secteurs de tirage géographiques devant être compatibles avec le découpage en îlots **INSEE** et doivent respecter différents aspects dont la population, la surface, la structure urbaine, le transport en commun ... Ainsi, une commune peut être découpée en plusieurs secteurs, elle peut parfois correspondre à un unique secteur, ou plusieurs communes peuvent appartenir à un seul et même secteur. À leur tour, les secteurs de tirage sont divisés en zones fines pour localiser les origines et destinations des déplacements et pour identifier des générateurs de trafic qualifiés d'attractifs comme les centres commerciaux, les universités et écoles, les zones industrielles, les établissements administratifs ou culturels ...

Découpage de l'aire d'étude de l'enquête **CODAH**

Dans le cas de l'enquête de la **CODAH**, les personnes résidant dans des communes proches du Havre ont été consultées en « face-à-face » et celles qui résident plus loin

ont été interviewées par téléphone. En complément de l'EMD, le comptage du trafic sur les autoroutes, ponts et grandes routes pour prendre en compte les flux d'échange avec l'extérieur de l'aire d'étude a également été utilisé. Le territoire de l'enquête a été divisé en 31 secteurs de tirage, soit 102 zones fines de tirage comme illustré dans la figure 6.4.

La figure 6.4 montre le secteur numéro 001 du Havre divisé en 5 zones fines de tirage. Chacune de ces zones contient des générateurs attractifs de trafic (une zone contenant l'hôtel de ville, une autre contenant des commerces, ...). Un échantillon de 2224 ménages pour 5194 personnes (de 5 ans et plus) a été interrogé, sur les déplacements de la veille du jour de l'enquête. Dans le cadre de la présente thèse, nous sommes intéressés à pouvoir localiser les véhicules sur les routes à tout moment de la journée. Nous n'avons extrait que les trajets des personnes effectués en véhicule particulier ou de société, par manque d'informations sur les trajets effectués en transport en commun et sur les flux de poids lourds. Pour un déplacement, les informations qui nous sont utiles sont l'origine, la destination, le temps de départ, le temps d'arrivée et le mode utilisé. Après extraction de l'enquête, nous avons déduit 425 182 déplacements (données d'enquête et de comptage) dont l'origine et la destination appartiennent à l'aire d'étude. Pour les flux d'échange avec l'aire de l'étude, les données s'appuient sur des comptages du trafic routier. Le modèle utilisé est illustré dans la figure 6.5.

Des travaux antérieurs ont été réalisés sur l'exploitation d'une EMD au niveau de l'agglomération de Lille [7]. Les déplacements par véhicules ont été pris en compte. Ce travail a permis de faire une micro simulation de ces déplacements afin d'établir des cartes montrant l'évolution du trafic pendant la journée sur les routes de l'agglomération lilloise. Notre travail d'exploitation de l'EMD se rapproche de cette étude réalisée et pourra être utilisé dans l'estimation de la distribution de la population sur le réseau routier en situation normale ou de crise.

6.2.2 Modèle de déplacements

Nous avons vu précédemment que l'aire de l'étude a été décomposée en secteurs qui, à leur tour, se décomposent en zones. Chaque personne enquêtée déclare un déplacement d'une zone Z_i vers une zone Z_j sans plus de précisions sur le point exact de la zone Z_i ni de la zone Z_j . Pour cela, nous sommes amenés à choisir un lieu exact de départ et de destination pour chaque déplacement. Dans la figure 6.5, l'attribut *redress_coef* de la classe *Displacement* représente le coefficient de redressement du ménage de chaque personne. Ainsi, pour une personne p appartenant au ménage m de coefficient c_m ayant effectué 1 déplacement de la zone a à l'instant t_a vers la zone b à l'instant t_b , nous devons généraliser cette action en faisant déplacer c_m personnes de a vers b aux mêmes moments. Nous devons donc introduire un mécanisme de fluctuation par rapport à ces hypothèses fortes afin de créer de la diversification, ce que nous exposerons par la suite.

Si nous choisissons un point stratégique par zone représentant le point de départ ou

6.2. Vision dynamique : Enquête Ménage Déplacements

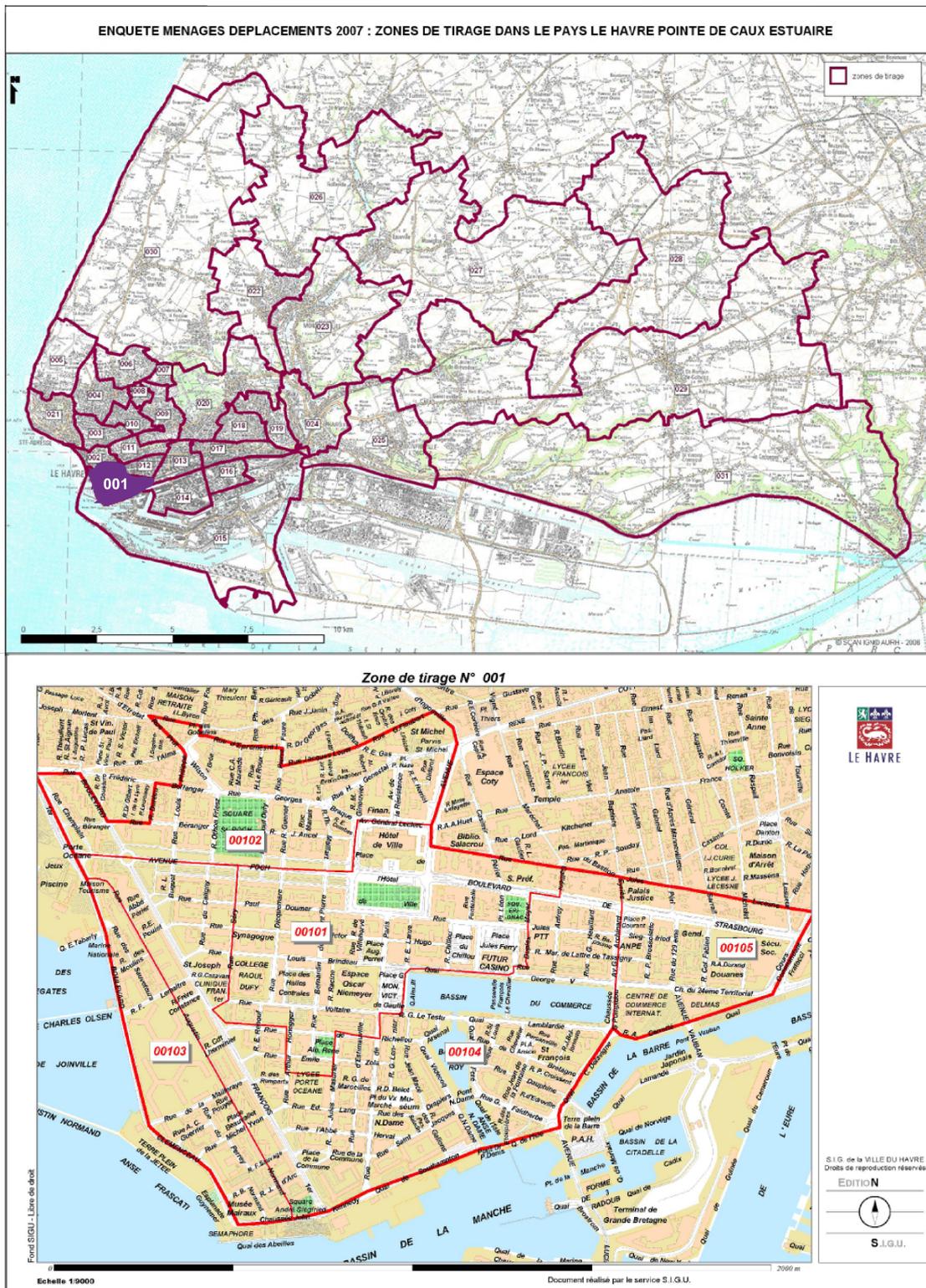


FIGURE 6.4: En haut, division de l'aire d'études en 31 secteurs. En bas, division du 1er secteur (coloré en mauve) en 5 zones.

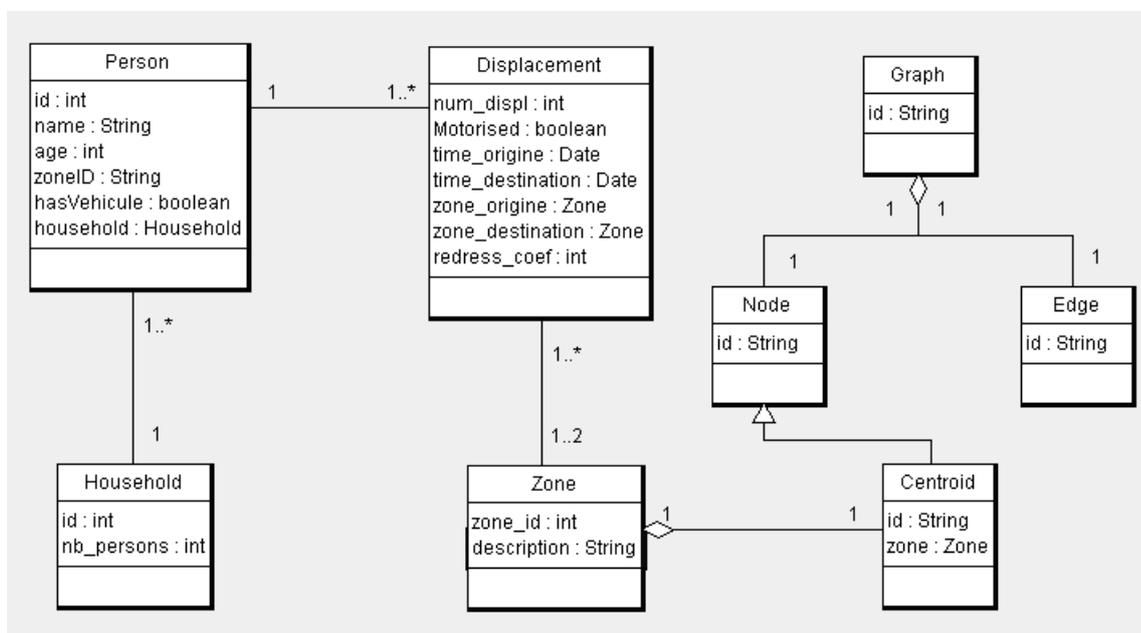


FIGURE 6.5: Schéma UML correspondant à l'enquête ménage de la CODAH.

d'arrivée à cette zone, deux problèmes se présentent. Le premier réside dans le fait de déplacer c_m personnes du même point de départ au même point d'arrivée alors qu'elles peuvent effectivement se diriger vers une même zone mais, à titre d'exemple, ne pas travailler dans le même lieu de la zone. Le lieu stratégique ou le centroïde choisi pour une zone correspond dans notre travail au sommet le plus connecté, au sens du graphe, de cette zone. Le second problème est lié à l'inadéquation des temps de départ et/ou d'arrivée déclarés : une personne déclare être partie de chez elle à 08h00 mais jamais à 07h56. Ces deux problèmes provoquent très rapidement des saturations sur certaines routes du réseau et les autres routes restent rarement empruntées. Pour faire face au premier problème, nous créons plusieurs centroïdes (les sommets les plus connectés de la zone) par zone et chaque déplacement à partir ou vers cette zone correspond au tirage d'un centroïde aléatoire de cette zone. Une solution au second problème est de lisser les temps de départ et d'arrivée. Ainsi un départ déclaré à un temps t sera modifié, selon une loi normale, pour avoir une valeur dans l'intervalle $[t - a, t + a]$, où a est un entier ($a = 5mn$ par exemple). De cette façon, nous avons pu diversifier les routes empruntées par les personnes.

La figure 6.6 illustre le modèle utilisé correspondant à l'exploitation de l'enquête et pouvant s'appliquer sur d'autres enquêtes qui respectent la méthode CERTU. Ce modèle prend en compte les données qui nous intéressent sur les automobilistes, après les avoir

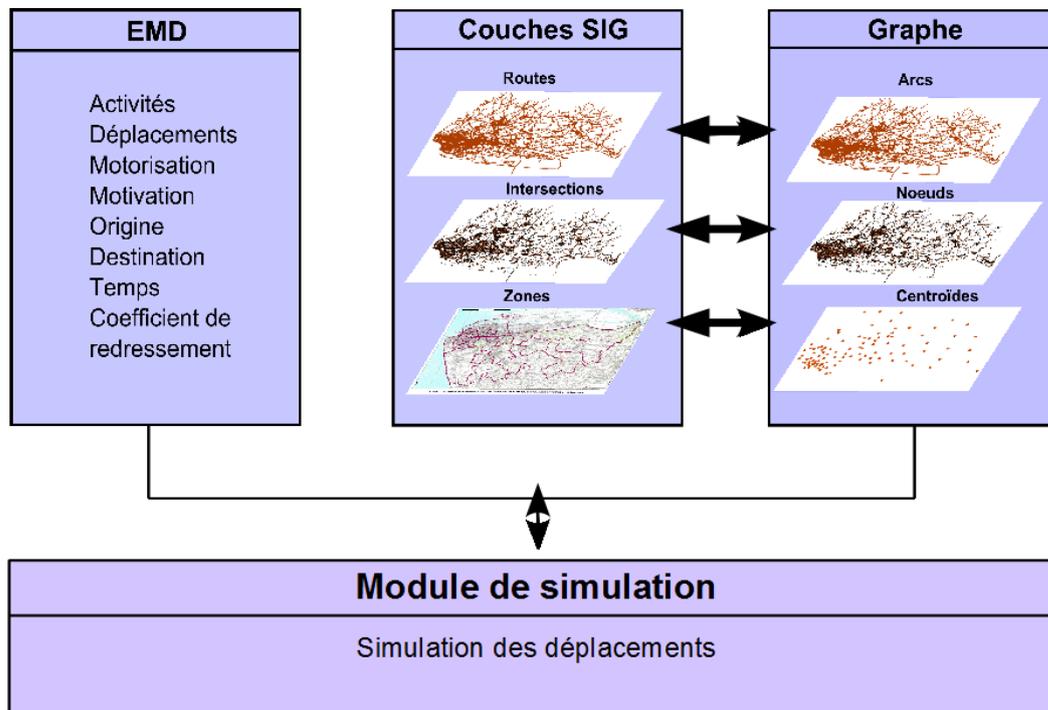


FIGURE 6.6: Extraction du multigraphe et planification des trajets des véhicules.

généralisées, grâce au coefficient de redressement (*cf.* colonne **EMD** de la figure) et, sur l'environnement (*cf.* colonne au milieu de la figure) correspondant à un multigraphe (pour plus de détails, voir section 5.4.1).

6.2.3 Simulation des déplacements sur le réseau routier

Les véhicules peuvent faire un ou plusieurs déplacements dans la journée. Dans notre travail, l'itinéraire de chaque trajet est choisi selon le plus court chemin sur le multigraphe, adapté du calcul de plus court chemin dans le graphe. Ce choix peut parfois paraître peu réaliste, mais on le retrouve dans les modèles de déplacement développés dans la plupart des travaux réalisés depuis les années 60 [7] car s'il ne génère pas toujours le bon itinéraire, les itinéraires produits sont toujours voisins des itinéraires réels. Pour le calcul du plus court chemin, l'algorithme A^* est adopté. Il a l'avantage d'être parfois plus rapide que l'algorithme de Dijkstra selon l'heuristique choisie (distance à vol d'oiseau dans ce travail).

Le déplacement des véhicules est très simple, chaque véhicule avance en gardant une distance de sécurité avec le véhicule le précédant. Le but de cette représentation

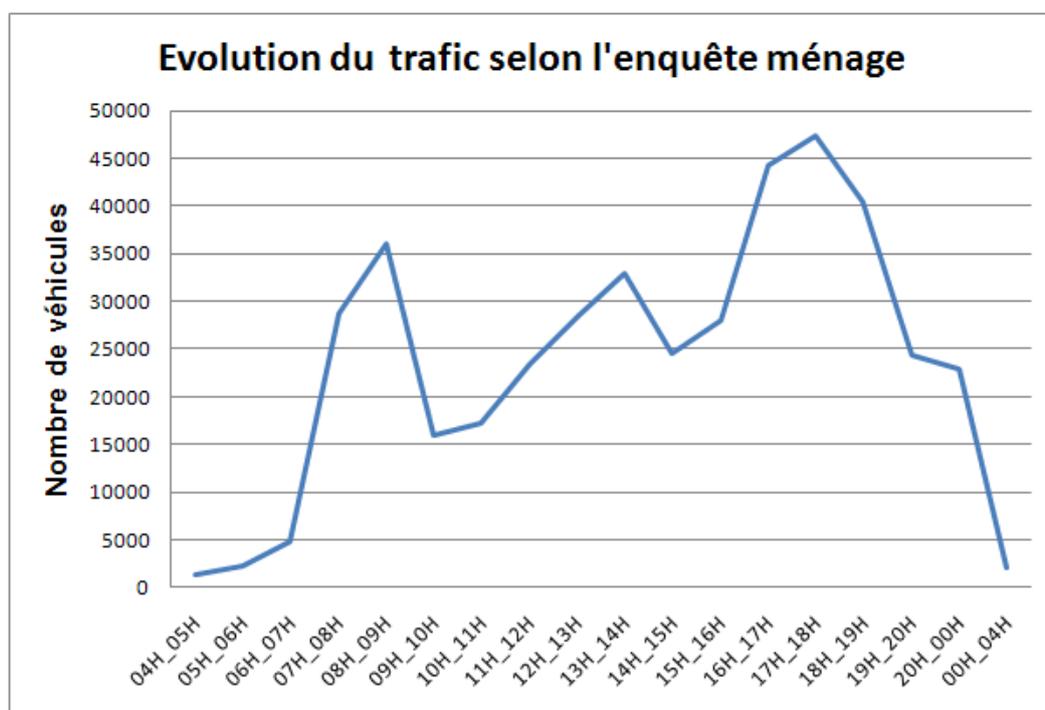


FIGURE 6.7: Courbe d'évolution du trafic global (l'ensemble du territoire) sur 24 heures selon l'enquête ménage dans l'agglomération havraise en 2007.

n'est pas de créer un micro simulateur de trafic avec des règles compliquées, mais de pouvoir quantifier à chaque moment la distribution des véhicules sur le réseau routier. Ceci nous aide à estimer le nombre de véhicules dans une zone à risque afin d'établir un plan d'évacuation en choisissant les routes à capacité suffisante pour absorber le trafic des véhicules sortants. Arrivant à un sommet saturé, un véhicule a un champ de vision lui permettant de changer son itinéraire pour recalculer son chemin à partir de sa position actuelle vers sa destination.

La courbe de la figure 6.7 correspond à l'évolution du trafic global sur l'ensemble du territoire par heure de la journée. À tout instant, nous comptons les véhicules se déplaçant sur l'ensemble du réseau. Nous remarquons l'existence de trois moments de pics pendant la journée. La courbe commence à 04h00 du matin et elle croît pour atteindre le premier pic de la journée correspondant à la plage horaire entre 07h00 et 09h00. Le premier pic est dû en grande partie aux déplacements vers les écoles et les lieux de travail. Ensuite, la courbe décroît une fois les personnes arrivées à leurs lieux de travail. Le deuxième pic a lieu sur la période de midi où les individus cessent ou interrompent leur

activité matinale. L'heure de pic la plus importante entre 16h00 et 18h00 correspond aux sorties du travail et des écoles, qui saturent le réseau sur plusieurs secteurs du territoire.

Dans la figure 6.8, nous colorions le multigraphe lié au réseau routier par fréquence de passage des véhicules pendant 24 heures. Ainsi, le nombre global de véhicules ayant emprunté chaque arc pendant toute la journée est calculé. Les couleurs varient entre le bleu clair pour les routes très peu fréquentées et le rouge (routes de passage important) en passant par le vert, jaune et orange. Ainsi, nous remarquons une forte utilisation des autoroutes A29 et A131 à travers lesquelles passent les principaux flux d'échange entre le territoire et l'extérieur, mais aussi une forte utilisation des autres entrées de la ville du Havre et des routes de son centre-ville. Les routes des petites communes du territoire sont clairement moins fréquentées.

6.2.4 Population exposée sur le réseau routier

Les résultats de l'enquête ménage peuvent compléter ceux de [PRET-RESSE](#) pour donner une approximation sur la répartition de la population dans les bâtiments mais aussi sur le réseau routier, permettant aux décideurs de quantifier la population dans des situations de trafic normal et en cas d'accidents.

Population exposée	Diurne	Nocturne	Différence
fortement	106	10	96
moyennement	420	38	382
faiblement	771	123	648
Total	1297	171	1126

TABLE 6.2: Nombre d'individus exposés sur le réseau routier au regard du scénario décrit dans la section 6.1.3.

Dans le tableau 6.2, nous appliquons le même scénario de propagation de nuage toxique présenté dans la section 6.1.3. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer à [122]. Techniquement, nous importons dans notre modèle le fichier géographique correspondant au nuage toxique et nous le combinons avec le multigraphe extrait du réseau routier pour quantifier la population exposée sur les routes. Comme pour le scénario précédent, nous remarquons une différence considérable entre la population exposée sur le réseau le jour et la nuit. En agrégeant les valeurs des populations exposées dans les bâtiments (*cf.* tableau 6.1) et des populations exposées sur le réseau (*cf.* tableau 6.2), nous obtenons le nombre total des populations exposées pour un même scénario de danger (nuage toxique dans cet exemple) comme le montre le tableau 6.3.

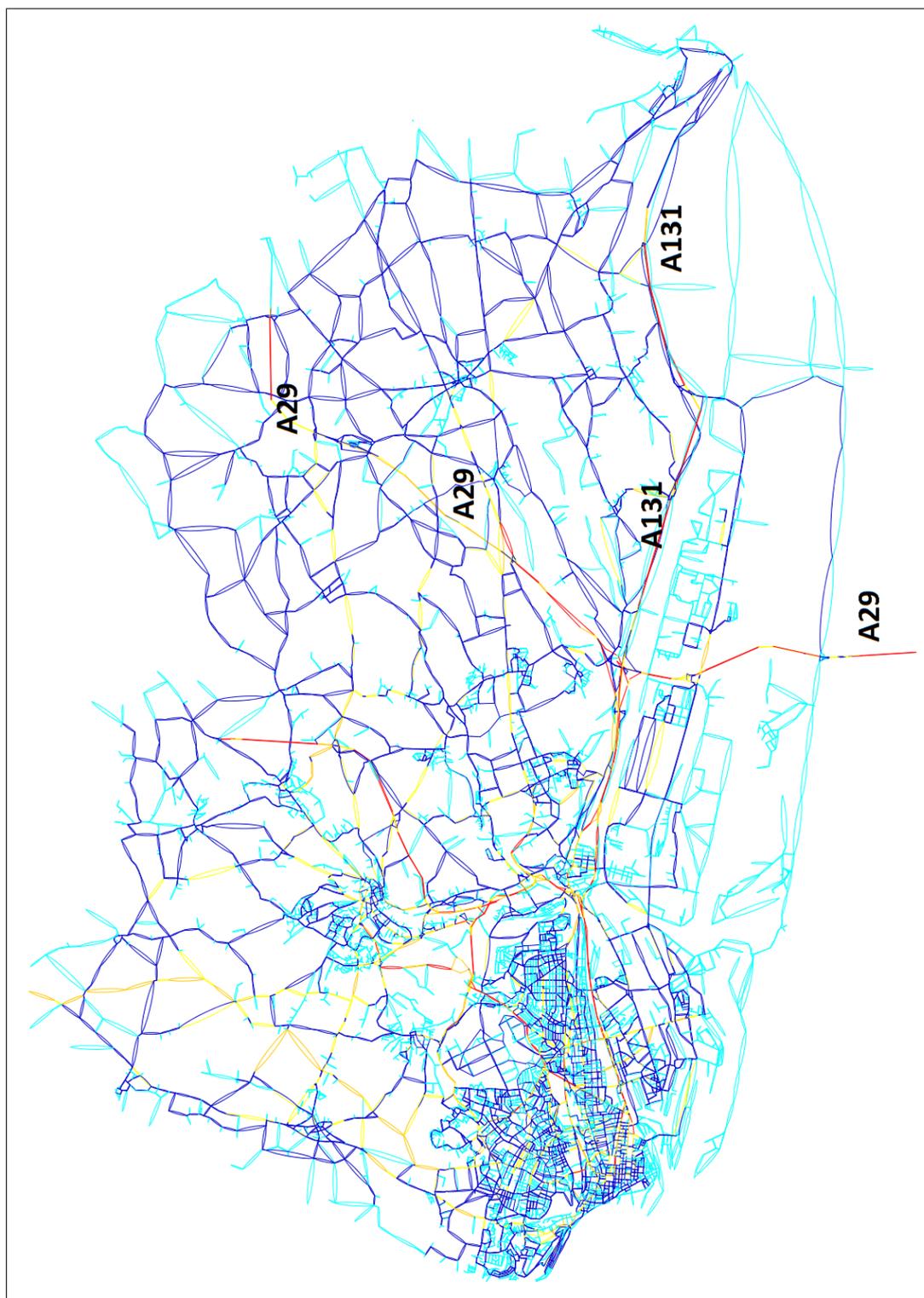


FIGURE 6.8: Utilisation des routes (du très fluide en bleu clair jusqu'au plus emprunté en rouge) dans l'agglomération havraise - EMD 2007.

Population exposée	Diurne	Nocturne	Différence
fortement	1035	252	783
moyennement	8834	6598	2236
faiblement	33927	6767	27160
Total	43796	13617	30179
% de la population de la CODAH totale	13.52%	4.255%	9.43%

TABLE 6.3: Statistiques d'exposition au nuage toxique de la population globale dans les bâtiments et sur le réseau routier dans le cadre du scénario de la section 6.1.3.

6.2.5 Quelques limites de l'enquête ménage

L'exploitation de l'enquête ménage nous a permis de mieux comprendre la mobilité sur le réseau routier du territoire d'étude. Elle constitue un moyen de quantification de la population sur le réseau routier. Dans le cadre de la gestion du risque, elle s'avère utile pour aider les décideurs à gérer des évacuations. Néanmoins, l'exploitation de ce genre d'enquête présente certaines limites :

- Les trajets sont calculés selon le plus court chemin en temps faute d'informations supplémentaires.
- Des problèmes de double comptage peuvent avoir lieu puisque **PRET-RESSE** ne traite que la population dans les bâtiments alors que l'exploitation de l'enquête ne prend en compte que la population en déplacement.
- Il y a un manque de données sur le flux des poids lourds et sur le transport en commun.
- Le temps de départ déclaré des enquêtés n'est pas toujours adéquat puisque les individus ont tendance à arrondir les chiffres (départ à 08h00 au lieu de 07h56).
- Les points adéquats d'origine et de destination de chaque déplacement ne sont pas précisés par les enquêtés ; chaque enquêté donne des éléments sur les zones de départ et de destination, mais pas les lieux exacts dans ces zones. Ceci crée un biais sur l'origine et la destination de chaque déplacement.

MODÈLE DE PRÉVENTION DE RISQUE

7.1	Détection de communautés	134
7.1.1	Partitionnement de graphe	136
7.1.2	Partitionnement de données	137
7.1.3	Approches utilisant des marches aléatoires	140
7.2	Établissement de cartes de vulnérabilité	141
7.3	Estimer la vulnérabilité liée à la structure du réseau	143
7.3.1	Application du clustering hiérarchique sur les communes du territoire étudié	143
7.3.2	Marche aléatoire sur le multigraphe du territoire d'étude	152

Dans le cadre de la prévention du risque, il est nécessaire d'effectuer une analyse de vulnérabilité à l'échelle d'un territoire. Si cette analyse doit couvrir tous les enjeux, il en est un essentiel : la population. Pour analyser la vulnérabilité de cette dernière, il faut identifier la menace, c'est-à-dire le risque global encouru par chaque individu, mais aussi la capacité de réaction de ces mêmes individus. Des cartes de vulnérabilité à partir de différents critères sont définies. Elles peuvent alors être croisées avec d'autres critères comme les aléas.

La vulnérabilité de la population ne peut pas être résumée uniquement à l'exposition à l'aléa, mais doit être complétée par le niveau de culture du risque des individus et également les capacités de « mise à l'abri ». Si le premier point appartient aux sciences sociales et nous le laisserons donc ouvert, le second touche en particulier aux problèmes de mobilité, en visant les vulnérabilités mobiles et les caractéristiques du réseau viaire.

Les graphes fournissent un modèle de représentation du réseau et la théorie des graphes offre, quant à elle, des outils et des développements récents sur les grands graphes permettant de qualifier, mesurer et étudier la structure. Si les métriques comme les plus courts chemins par exemple, appartiennent depuis longtemps au domaine, l'étude des structures est plus récente et son application dans le domaine de la cyndinique montrant le lien entre structure et vulnérabilité du réseau a été proposée par Cova et Church [39]. Leur technique repose sur un partitionnement de graphe en ayant fixé le nombre de nœuds par partition. Si cette approche est intéressante, la contrainte fixée la rend peu opérationnelle dans le cadre du risque.

Dans ce chapitre, nous développons deux approches d'évaluation de la vulnérabilité liée à la structure et l'usage du réseau routier.

Notion de communautés, organisations

Dans le chapitre 5, nous avons évoqué la notion d'organisation dans un système. Nous avons vu qu'il existe deux types d'organisation, l'une qui peut être définie uniquement par l'utilisateur et l'autre qui rétroagit sur le système dont elle fait partie. Dans l'équipe Réseaux d'Interactions et Intelligence Collective (RI2C) appartenant au Laboratoire d'Informatique, de Traitement de l'Information et des Systèmes (LITIS) dont je fais partie, le terme « organisations », dans les réseaux d'interaction quand il s'agit de la dynamique, est privilégié à celui de « communautés » ; la littérature ne différenciant pas ces deux termes en général et n'offrant pas non plus, dans les réseaux sociaux, de définition universelle sur les communautés. Toutefois, une communauté appartenant à un graphe G est un ensemble de sommets de G plus fortement connectés entre eux (à l'intérieur de la communauté) qu'avec les autres sommets appartenant au graphe (à l'extérieur de la communauté) : tous les graphes ne présentent pas de communautés [126, 136].

7.1 Détection de communautés

Des communautés au sein des réseaux peuvent de façon non stricte être définies comme des sous-ensembles de sommets qui sont plus fortement liés entre eux par rapport aux autres sommets constituant le reste du réseau. Ces communautés ont été observées dans différents types de réseaux, notamment dans les réseaux sociaux, mais aussi dans les réseaux métaboliques ou économiques . . . En effet, la recherche de communautés au sein de réseaux d'interaction connaît de nombreux développements ces dernières années [78] et de nombreux algorithmes ont été développés dans la littérature pour les étudier. Nous allons présenter les grandes orientations mais pour un état de l'art plus détaillé, on pourra consulter [137, 46, 159].

Déterminer des communautés dans un graphe consiste à trouver une partition des som-

mets en sous-ensembles disjoints les constituant selon un certain critère sans avoir pré-défini leur nombre ni le nombre de sommets les composant. Ce travail peut être étendu à des ensembles non disjoints si le recouvrement des communautés est accepté.

Plus formellement, soit $G = (V, E)$ un graphe donné, une partition $P = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ de l'ensemble V est un ensemble de communautés tel que $C_i \cap C_j = \emptyset$ et $\bigcup_i C_i = V$. Pour

chaque partition, une fonction de qualité nommée Q est attribuée. Le but sera de calculer pour chaque P la valeur $Q(P)$ afin de trouver Q_{max} qui correspond à la meilleure partition pour le critère Q . Cette fonction joue un rôle important dans le choix de la meilleure partition.

En général, la fonction de qualité à optimiser tient compte de la densité des arêtes/arcs aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des communautés. L'une des mesures les plus utilisées est la modularité [137] proposée par M.E.J. Newman. Nous présenterons explicitement cette mesure par la suite. Des contributions utilisant éventuellement d'autres mesures ont été proposées dans la littérature sur la détection de structure de communautés dans les grands graphes [41, 124, 125, 138, 150, 151, 12, 13]. Elles permettent généralement de mieux comprendre la structure des graphes étudiés et de dégager des propriétés macroscopiques difficilement détectables au niveau microscopique. Les méthodes proposées varient considérablement en terme d'approche et d'application, ce qui les rend difficiles à comparer [46].

Dans [149], les auteurs définissent de deux façons une communauté au sein d'un graphe. Soient $d_C^{out}(i)$ le nombre d'arcs sortant du sommet i appartenant à la communauté C vers les autres sommets de C et $d_C^{out}(i)$ le nombre d'arcs sortant du sommet i vers les autres sommets ne faisant pas partie de C :

- Communauté C au sens fort :

$$(7.1) \quad d_C^{out}(i) > d_C^{out}(i), \forall i \in C$$

Chaque sommet a plus de connections avec les sommets internes à sa communauté qu'avec l'extérieur.

- Communauté C au sens faible :

$$(7.2) \quad \sum_{i \in C} d_C^{out}(i) > \sum_{i \in C} d_C^{out}(i), \forall i \in C$$

Une communauté C est qualifiée de « faible » si la somme des degrés des sommets à l'intérieur de la communauté est plus grande que la somme des degrés avec le reste du graphe.

On peut considérer que les principales approches s'appuient sur deux grands domaines : le partitionnement de graphes et le clustering de données. Nous compléterons la présentation avec une démarche transversale utilisant les marches aléatoires.

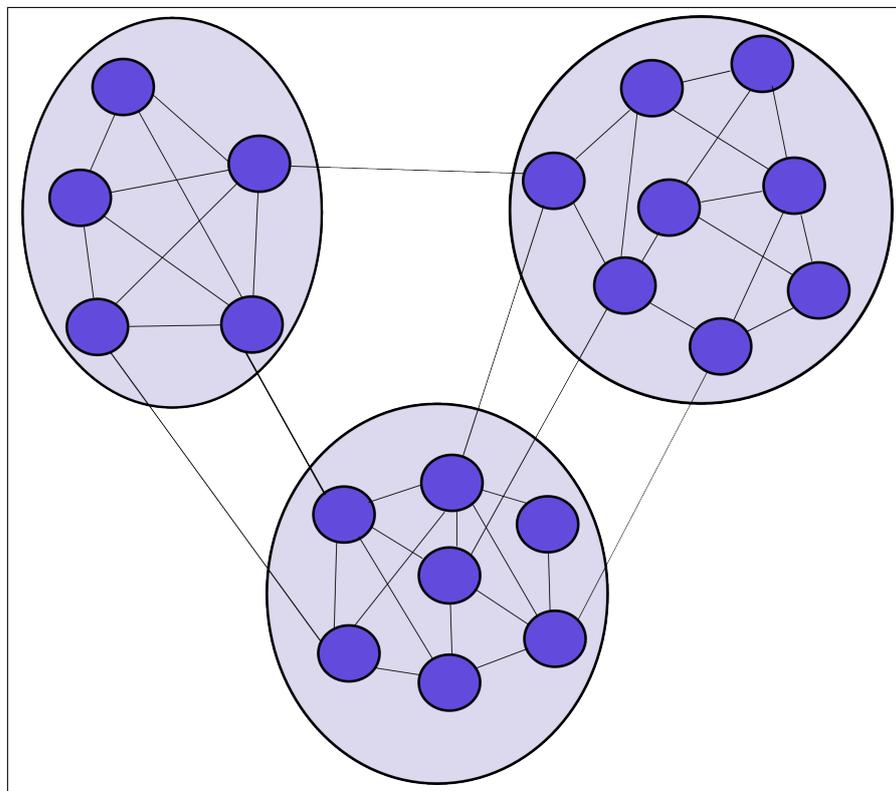


FIGURE 7.1: Exemple de détection de communautés dans un graphe.

7.1.1 Partitionnement de graphe

Initialement utilisé pour la parallélisation de processus (un sommet du graphe correspond à une tâche, les arêtes/arcs représentent les échanges)[137], le partitionnement de graphe cherche à diviser un graphe $G = (V, E)$ en k partitions disjointes de taille t préalablement fixée, tout en minimisant le nombre d'arcs entre les partitions.

Si le graphe à partitionner est pondéré, le problème consistera à couper le graphe G en k communautés de telle façon que toutes les communautés soient du même poids (+ ou $-\epsilon > 0$) et que la taille des coupes inter-communautés soit minimisée ; le poids d'une partie est la somme des poids de ses arcs et la taille d'une coupe est la somme des poids des arêtes/arcs reliant deux parties distinctes.

Il s'agit d'un problème NP-complet et les principales méthodes de résolution utilisent une bisection récursive : division du graphe en deux partitions, puis chaque partition en deux et ainsi de suite. Dans les applications pratiques, un léger déséquilibre ϵ est toléré sur la taille de chaque partition. L'inconvénient de cette approche réside dans le fait de prédéfinir le nombre de communautés et la taille de chacune. Deux méthodes

générales sont le plus souvent adoptées :

- la méthode spectrale : calcul du vecteur propre de la matrice Laplacienne du graphe et séparation en 2 parties par rapport au signe de leur composante selon ce vecteur [66, 70] ;
- la méthode de Kernighan et Lin : approche itérative consistant à partager les sommets en deux sous-ensembles tout en minimisant la somme des poids (ou le coût) des arcs externes. La solution est améliorée à chaque étape en échangeant les 2 sommets minimisant le coût des liens externes, ces sommets seront marqués pour les étapes suivantes et ne pourront plus être échangés. La meilleure solution de toutes les étapes sera retenue [94]. Des améliorations ont été proposées comme celles de Fiduccia et Mattheyses [69].

7.1.2 Partitionnement de données

Le partitionnement de données ou clustering hiérarchique cherche à rassembler en communautés des données similaires en utilisant une certaine distance ou mesure de proximité. Dans la littérature, on utilise généralement la théorie des graphes pour modéliser ce problème : les sommets représentent les données et le poids sur les arcs représente la distance entre les données. Une synthèse sur le sujet peut être trouvée dans [92]. Deux communautés dans la hiérarchie ne se chevauchent pas : soit l'une est incluse dans l'autre soit les deux sont disjointes. Deux grandes approches sont connues en clustering hiérarchique, l'une est ascendante et l'autre est descendante selon que l'on parte du graphe dans sa globalité et que l'on fusionne successivement ou que l'on parte d'une grande communauté et on divise successivement.

Approches ascendantes

Initialement, chaque sommet est considéré comme une communauté : $P^0 = \{v, v \in V\}$. À chaque étape de l'algorithme, on calcule la distance de similarité entre les communautés adjacentes et le choix de fusion regroupe les deux communautés les plus proches. Le nombre de communautés diminue de 1 par conséquent.

Le processus s'arrête quand il ne reste plus qu'une seule communauté correspondant au graphe entier. À la fin, on obtient une hiérarchie de communautés comme le montre la figure 7.2. Dans cet exemple, il s'agit d'un multigraphe (plusieurs arcs coexistent entre 2 sommets adjacents) ; ainsi 2 sommets sont plus proches s'ils partagent plusieurs arcs que s'ils n'étaient séparés que par un seul. De nombreuses mesures peuvent être utilisées pour calculer la proximité et le choix de cette mesure est très important : pour un même algorithme, nous pouvons obtenir des résultats de partitions différentes selon le choix de la distance de proximité. Ainsi, pour deux communautés, il peut s'agir d'une distance moyenne entre les sommets des deux communautés, la distance des centroïdes, la distance minimale ou maximale entre deux sommets appartenant chacun à l'une des deux communautés, la distance de Ward qui regroupe les com-

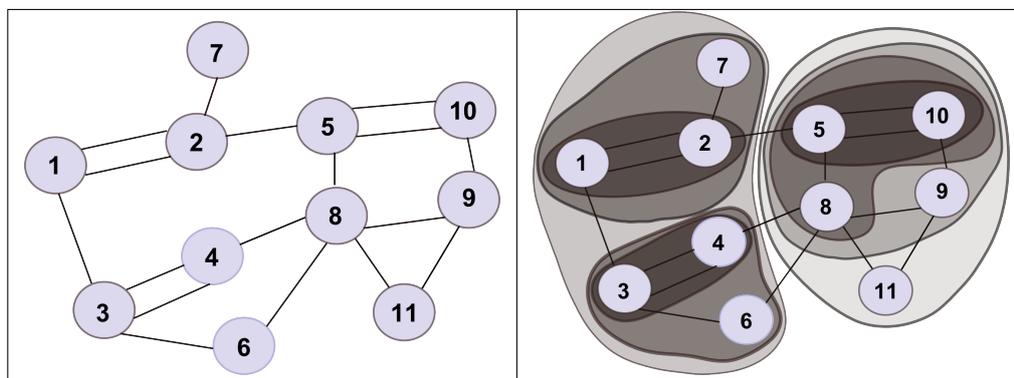


FIGURE 7.2: Exemple de détection de communautés dans un multigraphe non orienté.

munautés minimisant la perte d'inertie [170] ...

La hiérarchie des communautés est généralement représentée par un dendrogramme (cf. figure 7.3). Une solution correspond à une partition obtenue après avoir fixé un point de coupe. Ce point est choisi à l'aide d'une fonction mesurant la qualité des partitions [28] comme la modularité qui se base sur la proportion d'arcs internes aux communautés $e(C)$ (équation 7.3) et la proportion d'arcs externes aux communautés $a(C)$ (équation 7.4).

$$(7.3) \quad e(C) = \frac{\sum_{i \in C} \sum_{j \in C} w_{ij}}{\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} w_{ij}}$$

$$(7.4) \quad a(C) = \frac{\sum_{i \in C} \sum_{j \in V} w_{ij}}{\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} w_{ij}}$$

La modularité $Q(P)$ liée à une partition $P = C_1, C_2, \dots, C_n$ est calculée selon l'équation 7.5.

$$(7.5) \quad Q(P) = \sum_{c \in P} e(C) - a(C)^2$$

Pour 2 sommets adjacents i et j ,

$$(7.6) \quad w_{ij} = \begin{cases} \text{poids de l'arc} & \text{si le graphe est pondéré} \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

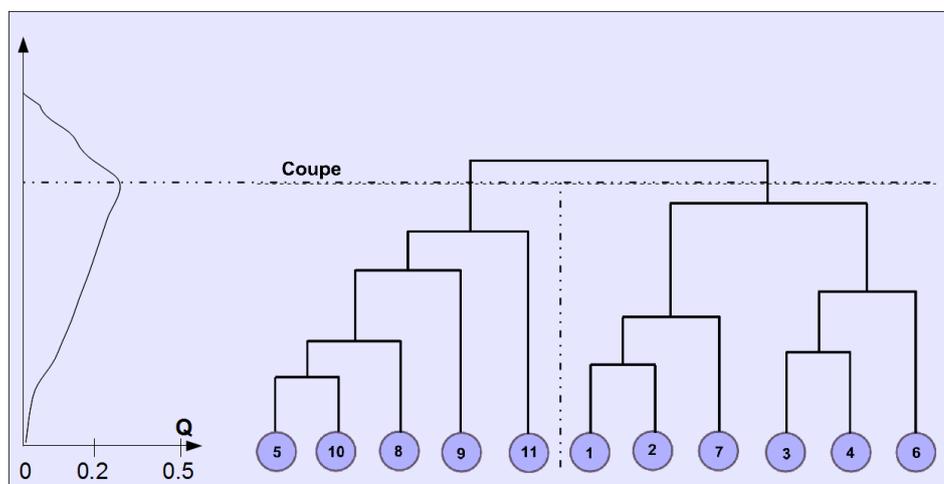


FIGURE 7.3: Dendrogramme correspondant aux communautés de la figure 7.2.

D'après l'équation, la modularité prend une valeur dans l'intervalle $[-1, 1]$; la modularité est nulle pour une partition contenant tous les sommets du graphe. Cette mesure de qualité n'est pas unique et présente des lacunes [72]. Parmi ces lacunes, la modularité est d'autant plus élevée que les communautés sont grandes. Cela favorise le fusionnement de communautés de petites tailles même si elles sont très denses. De plus, son optimisation est un problème NP-complet. La résolution nécessite donc une méthode approchée pour des graphes de grande taille [27].

Approches descendantes

Avec les approches descendantes, c'est le processus inverse qui est utilisé. Le graphe entier est considéré comme une seule partition qui sera scindée par la suite en deux clusters. La scission se fait de façon à ce que la distance entre les deux descendants soit la plus grande possible et les arcs sont retirés les uns après les autres par conséquent. Différents critères de séparation existent dans la littérature, parmi les plus connus, la centralité d'intermédiarité [78] qui calcule pour chaque arête/arc le nombre de chemins l'utilisant, mais aussi l'approche de Radicchi *et al* [149] qui calcule le rapport du *nombre de cycle d'ordre g (entier à définir) sur le nombre total de tels cycles possibles* et enfin l'approche utilisant la centralité de l'information [73] qui calcule l'efficacité de communication entre deux sommets comme étant l'inverse de leur distance (plus court chemin). La procédure générale est récursive jusqu'à obtenir des clusters composés d'un seul sommet. Comme pour les approches ascendantes, le phénomène peut être représenté par un dendrogramme et un point de coupe est choisi par rapport à l'une des fonctions d'évaluation.

7.1.3 Approches utilisant des marches aléatoires

Initialement, une marche aléatoire est un modèle mathématique d'un système basé sur des successions de pas effectués au hasard. Les pas aléatoires sont indépendants les uns des autres (caractère Markovien : à chaque instant, l'état futur d'un système ne dépend pas de son passé mais de son état actuel) ; il n'y a pas d'effet mémoire. Autrement dit, c'est une formalisation mathématique d'une trajectoire qui consiste à prendre une succession de phases aléatoires. Les résultats de l'analyse de marche aléatoire ont été appliqués à l'informatique (ex. estimer la taille du web), à la physique (ex. modèle simplifié du mouvement brownien), à l'écologie (ex. description de mouvements d'animaux), l'économie (ex. modéliser les prix des actions) et à bien d'autres domaines. Les marches aléatoires sont une des techniques pour approcher des solutions.

Dans le problème de marche aléatoire sur un graphe, il s'agit de marcheurs dont chacun est localisé sur un sommet et parcourt le graphe en choisissant l'un des sommets adjacents.

Soit $G = (V, E, W)$ un graphe pondéré avec W l'ensemble des poids sur les arcs (ou les sommets selon le problème qu'on cherche à traiter). Un marcheur localisé sur un sommet i choisit un sommet adjacent j selon une probabilité P_{ij} qui dépend de la pondération w_{ij} sur l'arc (i, j) :

$$(7.7) \quad P_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sum_{k=1}^n w_{ik}}$$

n est le nombre de sommets incidents. Si le graphe étudié est non pondéré, la matrice d'adjacence A sera utilisée pour le calcul de P_{ij} . Dans ce cas, $w_{ij} = A_{ij}$, où A_{ij} est le nombre d'arcs entre i et j , quand il s'agit d'un multigraphe, A_{ij} pourrait être > 1 . Ce type d'approche utilise des données locales, des biais peuvent être introduits comme les phéromones numériques. Le comportement des marches aléatoires dépend fortement de la structure du graphe [137]. Les marches aléatoires tendent à être piégées à l'intérieur des communautés, ce qui explique le fait que plusieurs approches de détection de communautés utilisent des marches aléatoires.

Par ailleurs, les approches de détection de communautés et de marche aléatoire peuvent être utilisées dans différents domaines d'application. Pour plus de détails sur ces domaines, le lecteur peut se référer au travail de Lovász [106]. Dans le cadre de notre travail, elles sont utilisées pour comprendre l'influence de la structure du réseau routier sur la fluidité des flux et pour l'établissement des cartes de vulnérabilité liées à l'accès au réseau. Avant de présenter ces deux approches, nous allons passer en revue quelques modèles d'estimation et d'établissement de cartes de vulnérabilité.

7.2 Établissement de cartes de vulnérabilité

La prévention du risque passe par l'étude des aléas, *i.e.* l'atténuation du risque à la source et, par l'étude des enjeux vulnérables. Récemment, une attention particulière a été portée à l'étude de la vulnérabilité permettant de localiser les enjeux pouvant être touchés par des aléas et d'étudier la résilience du système face à ces aléas. L'évaluation de la vulnérabilité d'un territoire doit reposer sur une analyse détaillée de ce territoire. La première étape consiste à comprendre et analyser la nature des aléas auxquels le territoire fait face. Ils peuvent être dépendants (ou non) selon leur nature et les caractéristiques du territoire étudié. Un élément du territoire peut ne pas être sensible à ces aléas, mais peut néanmoins être concerné par un ou plusieurs aléas à la fois. De plus, l'interdépendance des aléas et les effets domino sont des phénomènes complexes à comprendre. Pour cela, la vulnérabilité des enjeux par rapport à chaque type d'aléa est généralement analysée. Des études ont été réalisées dans ce sens pour établir un score global dépendant de l'exposition à chaque type d'aléa, ce qui n'empêche pas d'avoir une vision d'ensemble sur l'analyse de la vulnérabilité. En effet, la technologie des SIG est largement utilisée dans l'analyse et la représentation de la vulnérabilité, mais aussi des aléas.

À l'appui des SIG, il est possible de produire des cartes représentant la sensibilité des enjeux par rapport aux aléas et de combiner plusieurs cartes afin d'en construire une plus globale, résultat de l'agrégation des informations. Plusieurs aspects peuvent être pris en compte dans l'évaluation de la vulnérabilité, la littérature est riche dans ce sens. Parmi eux, on peut citer l'aspect biophysique et social (accès aux ressources, population avec des besoins d'évacuation spéciaux, population à mobilité réduite...), les caractéristiques démographiques (âge, densité de population, niveau de vie...), l'occupation du sol, les transports en commun, l'accessibilité au réseau viaire et aux hôpitaux, l'existence des lieux de refuge, la culture du risque chez la population. Plus de détails sur ces aspects peuvent être trouvés dans [43, 36].

L'élaboration des cartes de vulnérabilité, combinées avec les aléas, permet de réaliser des cartes des risques encourus sur un territoire. Elles constituent incontestablement un outil d'aide à la décision pour mieux comprendre et analyser les différents risques mais aussi pour construire des plans de protection des enjeux. Néanmoins, ces cartes ne prennent pas en considération la vulnérabilité liée à la mobilité de la population sur le réseau routier. Pour combler ce manque, nous étudions dans ce travail l'influence de la structure du réseau routier sur le fonctionnement des flux sur ce réseau. Un des points forts de cette approche réside dans le fait qu'elle ne dépend pas que d'un seul aléa comme pour les approches classiques d'analyse de vulnérabilité. L'étude de la structure se rapproche du travail effectué par Cova et Church [39] qui ont ouvert la voie dans le cadre de l'évacuation de la population en utilisant un SIG. Le but de leur étude était d'identifier les clusters du réseau routier (représenté par un graphe), dont le nombre est fixé à l'avance, pouvant influencer négativement une évacuation. Un modèle basé sur l'optimisation (problème de partitionnement de graphe) a été réalisé afin de trouver

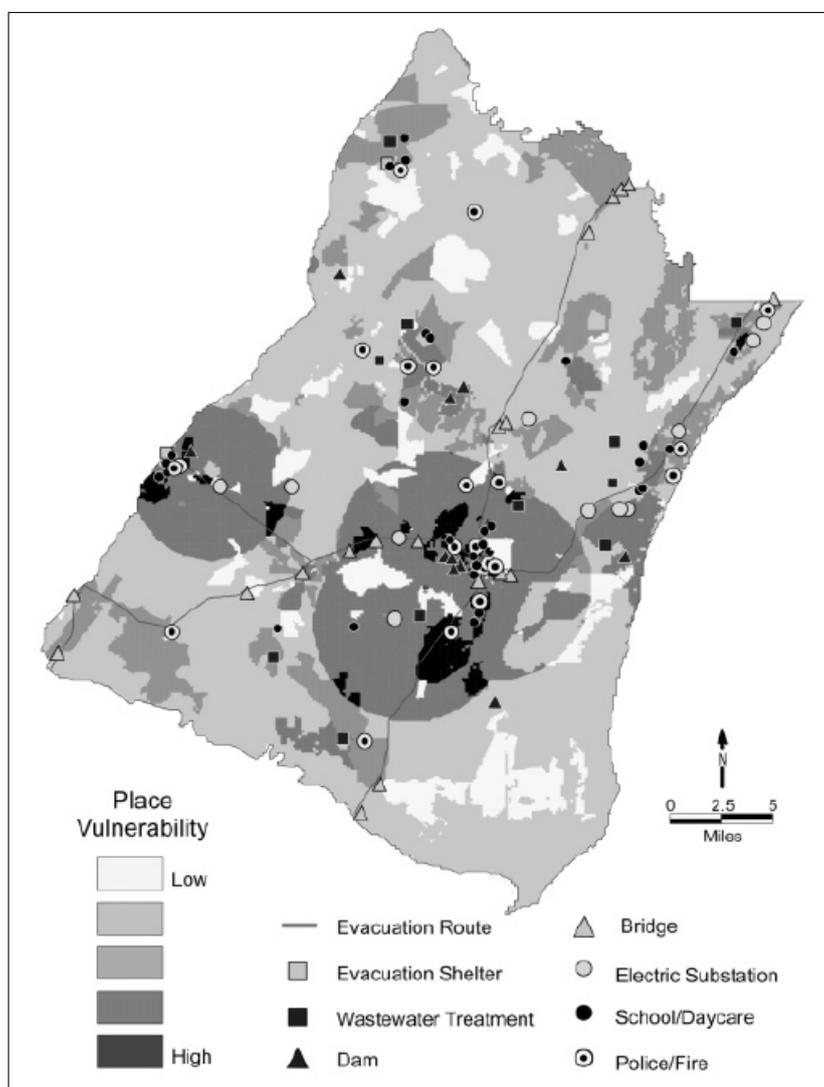


FIGURE 7.4: Exemple de carte de vulnérabilité appliquée à la ville américaine Georgetown en Caroline du Sud [43]. Prise en compte de l'aspect biophysique et social pour le calcul d'un score de vulnérabilité global.

le voisinage causant la vulnérabilité la plus élevée autour de chaque sommet du graphe pour construire une carte de vulnérabilité autour de tous les sommets de la ville de Santa Barbara. Une heuristique constructive a été utilisée pour calculer le meilleur cluster autour de chaque sommet. Le résultat a été ainsi visualisé sur une carte (avec ARCINFO). Une zone est d'autant plus vulnérable que le coefficient *nombre de personnes à évacuer*

dans un voisinage rapporté sur le nombre de voies de sortie est élevé. Néanmoins, dans cette étude, le nombre de sommets maximal dans un voisinage était prédéfini, ce qui n'est pas toujours applicable dans le monde réel. De plus, le choix de la ville de Santa Barbara ne constitue pas forcément un exemple reproductible en Europe voire même aux États-Unis.

Notre démarche consiste à identifier des communautés dans un graphe (ou un multigraphe) sans avoir à prédéfinir le nombre de communautés ni le nombre de sommets par communauté dont nous démontrerons l'utilité dans la détection d'arcs pouvant influencer le déroulement d'une évacuation. Ce travail est complété par une méthode de marche aléatoire permettant de mettre en évidence l'utilisation des routes ne connaissant à l'avance que la structure du réseau. Ces deux points abordent respectivement l'aspect structurel et l'aspect phénoménologique.

7.3 Estimer la vulnérabilité liée à la structure du réseau

La structure du réseau routier contraint énormément l'établissement de plans d'évacuation. Une architecture de style Manhattan offre plus d'alternatives de choix de routes en cas de dysfonctionnement d'une partie du réseau (*cf.* figure 5.4) qu'une structure en étoile ou une autre structure moins régulière (*cf.* figure 5.5). Dans ce qui suit, nous décrivons l'application des algorithmes de clustering hiérarchique et de marche aléatoire pour détecter des zones susceptibles de contraindre fortement une évacuation.

7.3.1 Application du clustering hiérarchique sur les communes du territoire étudié

Nous appliquons un algorithme de clustering hiérarchique au multigraphe représentant le réseau routier des 34 communes de la rive droite de l'estuaire de la Seine (voir algorithme 1). La modularité est utilisée pour évaluer la qualité de chaque partition et la meilleure partition obtenue est celle qui a la plus grande modularité. Il s'agit d'une approche ascendante. À chaque étape, nous fusionnons les communautés les plus proches et nous mettons à jour la distance entre la nouvelle communauté et les autres communautés. Pour alléger le calcul, nous gardons la modularité de l'étape précédente et nous la modifions pour l'étape en cours en ne prenant en compte que les modifications que provoque la fusion. Nous avons testé plusieurs types de distance de proximité d et nous avons calculé la modularité à chaque fois. L'entrée et la sortie de l'algorithme sont définies comme suit :

- entrée : un graphe ou un multigraphe ;
- sortie : la partition ayant la modularité maximale (variable *bestPartition* dans l'algorithme 1).

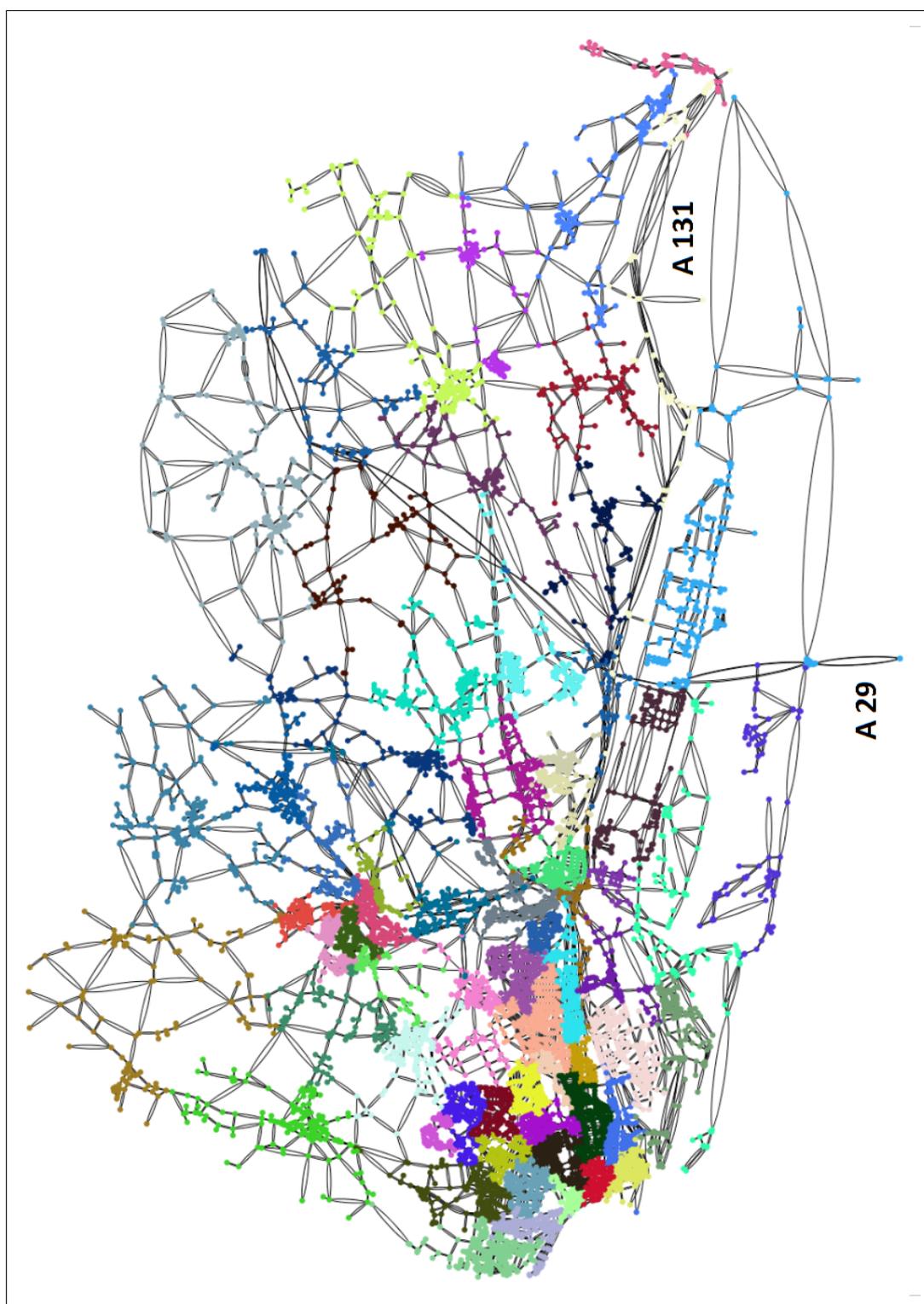


FIGURE 7.5: Clustering hiérarchique sur le multigraphe de l'estuaire de la Seine.

Algorithme 1: Algorithme de clustering hiérarchique ascendant.

```

Input : Graph g
Output : Cluster[] bestPartition
/* Tableaux de clusters */
1 Cluster[] clusters, bestPartition;
2 modulariteMax = 0;
3 minDistance = ∞;
/* Chaque sommet correspond à un cluster */
4 pour tout Sommet s ∈ g.getSommets() faire
5   Cluster c = s;
6   clusters.ajouter(c);
7 fin
8 tant que numOfclusters > 1 faire
9   Cluster c1, c2, c3;
10  pour tout cl1 ∈ clusters faire
11    pour tout cl2 ∈ clusters faire
12      distance = calcDistance(cl1, cl2);
13      si distance < minDistance alors
14        minDistance = distance;
15        c1 = cl1;
16        c2 = cl2;
17      fin
18    fin
19  fin
20  c3 = fusion(c1, c2);
21  clusters.supprimer(c1);
22  clusters.supprimer(c2);
23  clusters.ajouter(c3);
24  modularity = updateModularity(results);
25  si modularity > modulariteMax alors
26    modulariteMax = modularity;
27    bestPartition = results;
28  fin
29 fin

```

Les meilleurs résultats sont obtenus pour d calculée selon l'équation 7.8 :

$$(7.8) \quad d = \frac{|C_i| * |C_j|}{nbArcs}$$

avec $nbArcs$ le nombre d'arcs entre deux communautés C_i et C_j et $|C_k|$ le nombre de sommets d'une communauté k . Au début, nous favorisons les sommets à plus forte connectivité pour la fusion. Cette équation donne un bon résultat car deux communautés sont d'autant plus proches qu'elles partagent un nombre d'arcs important. D'après l'équation 7.8, deux communautés C_i et C_j sont favorisées pour être fusionnées si elles sont de petite taille (d est directement proportionnelle au produit de $|C_i|$ et de $|C_j|$).

L'équation 7.8 peut être utilisée qu'il s'agisse d'un graphe ou d'un multigraphe. Deux sommets adjacents liés par n arcs ($n > 1$) sont plus proches que pour $n = 1$. Dans un contexte d'étude de vulnérabilité liée à la structure du réseau routier, pour $n > 1$, le fait de perdre un des arcs peut être compensé par la présence des autres arcs, tandis que pour $n = 1$, l'arc est incontournable.

La courbe de la modularité (cf. figure 7.6) est croissante jusqu'à $Q = 0.948$ correspondant à $n = 65$ communautés et elle décroît pour atteindre la valeur nulle quand il ne reste plus qu'une seule communauté regroupant tous les sommets. Nous avons calculé l'écart type σ par rapport à la moyenne du nombre de sommets par communauté μ . Nous avons obtenu $\mu = 150.1$ et $\sigma = 58.48$. Si nous séparons les communautés appartenant au multigraphe du Havre de celles à l'extérieur de la ville et nous calculons pour chaque communauté appartenant au Havre, le coefficient de clustering moyen de ses sommets, nous obtenons :

- pour les communautés appartenant à la ville du Havre, la moyenne $\mu_{cl} = 0.02179$ et l'écart-type $\sigma_{cl} = 0.01$;
- pour les communautés du reste du territoire, $\mu_{cl} = 0.0204$ et $\sigma_{cl} = 0.0134$.

Pour pouvoir comparer les deux écarts types ci-dessus, nous calculons le coefficient de variation cv selon l'équation 7.9.

$$(7.9) \quad cv_{cl} = \frac{\sigma_{cl}}{\mu_{cl}} * 100$$

Nous obtenons une valeur de coefficient de variation de 45.89% pour les communautés du Havre et de 65.68% pour le reste du territoire. Ceci s'explique par le fait que le réseau du Havre est mieux connecté que sa périphérie. Nous avons également appliqué le même algorithme de clustering hiérarchique ascendant sur le multigraphe de la ville de Rouen de 2780 sommets, le nombre de communautés est de 41 et la modularité est de 0.919 (voir figure 7.7). Les valeurs de μ_{cl} et de σ_{cl} sont de 67.8 et de 37 respectivement. Si nous calculons le coefficient de clustering moyen par communauté comme pour l'estuaire, nous avons :

- pour les communautés appartenant au centre-ville de Rouen, $\mu_{cl} = 0.0333$ et $\sigma_{cl} = 0.022$;
- pour les communautés du reste du territoire, $\mu_{cl} = 0.0226$ et $\sigma_{cl} = 0.018$.

Comme pour le cas de l'estuaire de la Seine, le coefficient de variation obtenu $cv_{cl} = 79.64\%$ pour le reste de la ville et $cv_{cl} = 66.06\%$ pour son centre peut avoir la même interprétation que pour le multigraphe du Havre et le reste de l'estuaire.

Les distances classiques de clustering comme la distance de Ward, la distance moyenne des sommets entre deux communautés, la distance entre les centroïdes des communautés et la distance minimale ou maximale entre deux sommets venant chacun d'une communauté différente ne peuvent pas être appliquées dans notre cas. En effet, les poids sur les arcs ne sont pas pris en compte dans notre algorithme. De plus, la plupart de ces méthodes ne sont pas extensibles aux multigraphes. Nous nous basons dans cette approche

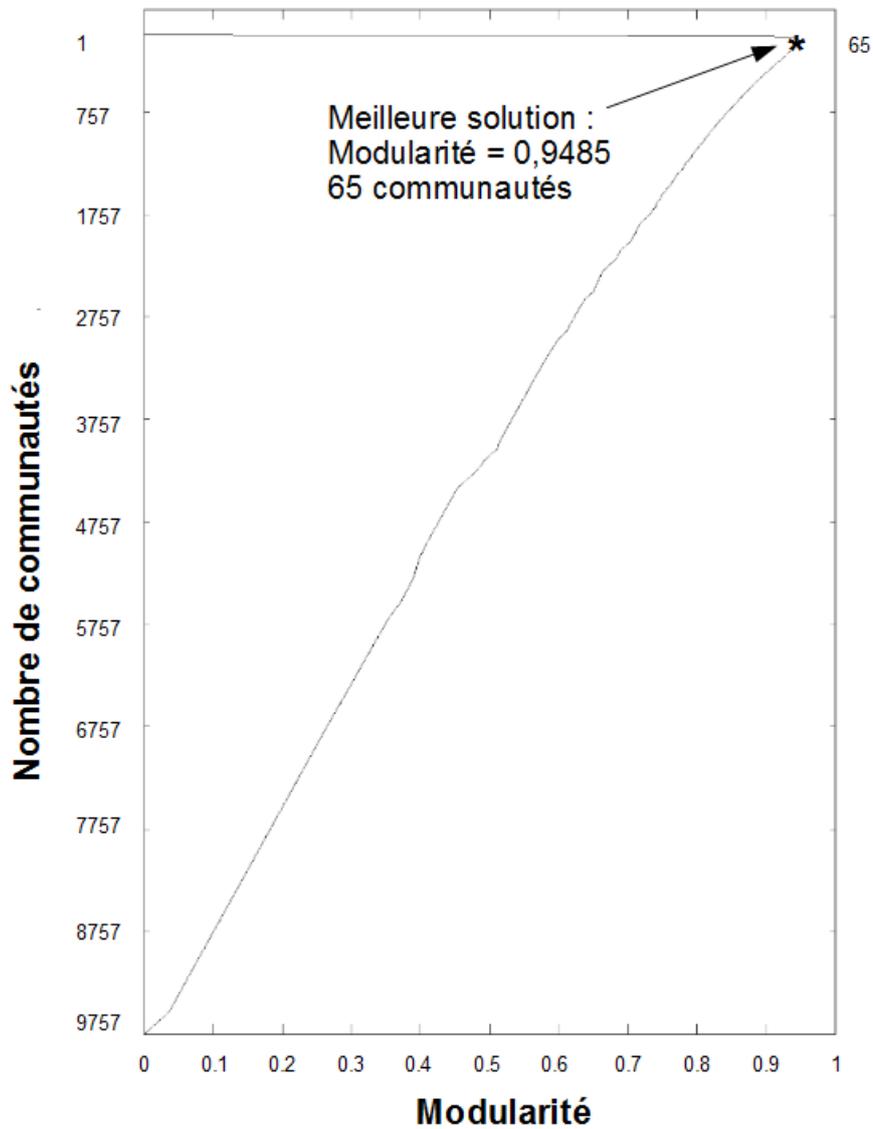


FIGURE 7.6: Courbe d'évolution de la modularité en fonction des communautés obtenues sur le multigraphe de l'estuaire.

sur la connectivité. Le poids sur les arcs est pris en considération dans l'algorithme de marche aléatoire détaillé par la suite. Nous avons appliqué plusieurs mesures de proximité sur le centre ville du Havre formant un multigraphe de 518 sommets. Le tableau 7.1



FIGURE 7.7: Clustering hiérarchique sur le multigraphe de la ville de Rouen.

affiche la modularité correspondant à chaque mesure de similarité utilisée pour deux communautés C_i et C_j . A_{xy} est le nombre d'arcs entre un sommet x et un sommet y .

Mesure de proximité	Modularité	Nb Clusters
$\frac{\sum_{x \in C_i} \sum_{k \in V} A_{xk} + \sum_{y \in C_j} \sum_{h \in V} A_{yh}}{\sum_{x \in C_i} \sum_{y \in C_j} A_{xy}}$	0.757	37
$\frac{\frac{\sum_{x \in C_i} \sum_{k \in C_i} A_{xk}}{\sum_{x \in C_i} \sum_{h \in C_i} A_{xh}} + \frac{\sum_{y \in C_j} \sum_{l \in C_j} A_{yl}}{\sum_{y \in C_j} \sum_{m \in C_j} A_{ym}}}{\sum_{x \in C_i} \sum_{y \in C_j} A_{xy}}$	0.766	49
$\frac{Min(C_i , C_j)}{\sum_{x \in C_i} \sum_{y \in C_j} A_{xy}}$	0.824	16
$\frac{\sum_{x \in C_i} \sum_{k \in C_i} A_{xk} * \sum_{y \in C_j} \sum_{h \in C_j} A_{yh}}{\sum_{x \in C_i} \sum_{y \in C_j} A_{xy}}$	0.826	15
$\frac{ C_i * C_j }{\sum_{x \in C_i} \sum_{y \in C_j} A_{xy}}$	0.832	18

TABLE 7.1: Distances de proximité testées et résultats correspondants.

Application du clustering hiérarchique à l'estimation de la vulnérabilité

Les approches de gestion du risque sont souvent pessimistes par précaution. Cette surestimation pose néanmoins des problèmes : la population peut se sentir non concernée car elle considère le danger lointain, d'autre part les périmètres ne sont pas mobiles et prennent mal en considération le phénomène dynamique de propagation éventuel. L'utilisation d'un algorithme de détection de communautés nous permet de mettre en évidence les arcs sensibles qu'il faut à tout prix essayer de préserver. En effet, les communautés présentent comme caractéristique d'avoir des sommets fortement connectés. La perte d'un ou de plusieurs arcs peut être résolue par des chemins alternatifs, ce qui n'est pas le cas lorsqu'il s'agit d'un arc incontournable.

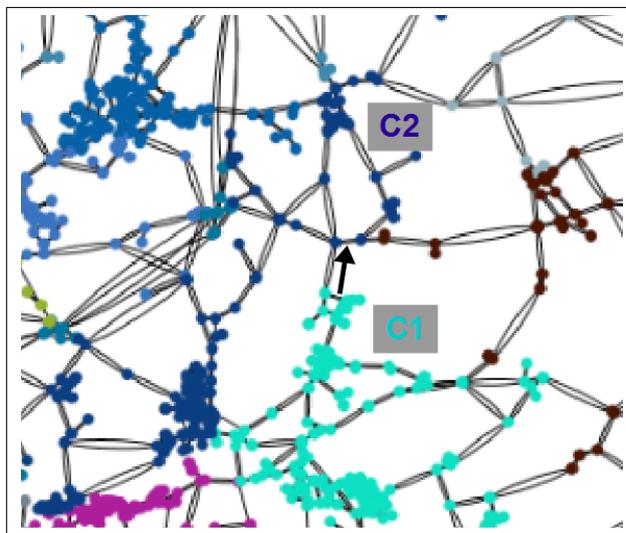


FIGURE 7.8: Scénario de choix de routes pour évacuer une communauté C_1 du multigraphe vers une communauté adjacente C_2 .

Dans la figure 7.8, une catastrophe dans la zone correspondant au cluster C_1 (en vert) peut pousser les personnes à évacuer vers la zone correspondant au cluster voisin C_2 (en bleu foncé) en empruntant l'arc faible entre les deux zones, ce qui peut aggraver la situation, dans le cas d'un éventuel accident sur cet arc.

Liens faibles pour un scénario de nuage toxique

L'algorithme de détection de communautés qu'on vient de présenter nous a permis d'identifier les liens (arcs ou arêtes au sens d'un graphe ou d'un multigraphe) inter-communautaires « faibles », *i.e.* des liens de passages incontournables. Ces liens méritent une attention particulière de la part des autorités en cas d'accident ou de crise. Ils doivent toujours être fluides et ouverts à la circulation.

Considérons maintenant un scénario de propagation d'un nuage toxique simulé par le logiciel Safer (*cf* section 6.1.3). Dans la figure 7.9, les liens inter-communautaires sont mis en évidence dans la zone exposée du territoire, mais aussi dans le voisinage de la zone. En important ce nuage comme étant un fichier géographique vers notre modèle, nous avons identifié les arcs faibles qui intersectent ou sont inclus dans la zone exposée. Les liens correspondants à ces arcs faibles sont à surveiller si la décision d'évacuer la zone exposée est prise.

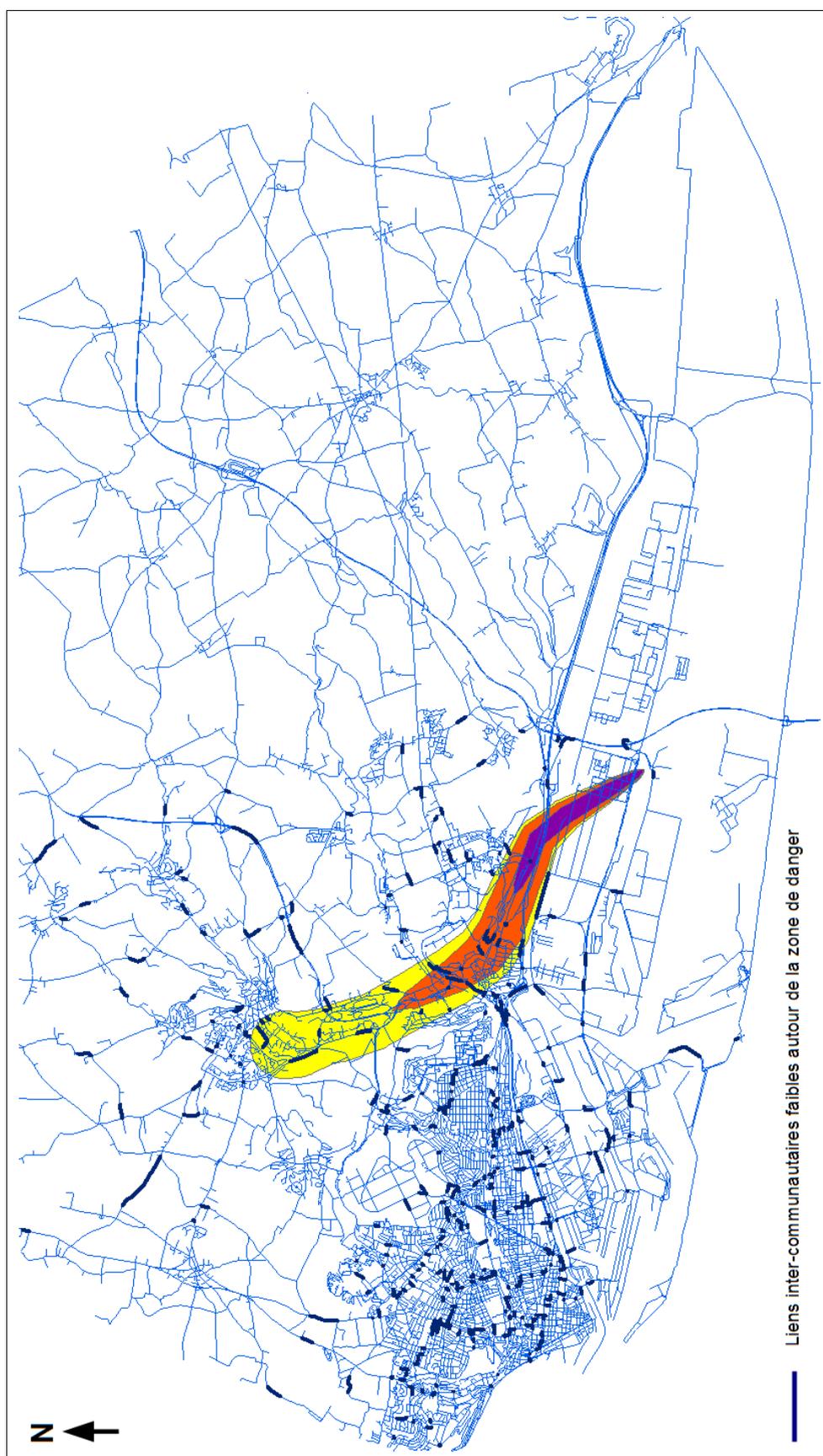


FIGURE 7.9: Liens faibles dans une zone exposée à un nuage toxique dans l'estuaire de la Seine.

7.3.2 Marche aléatoire sur le multigraphe du territoire d'étude

Afin de mettre en évidence que la structure du réseau piège la dynamique, nous avons mené une expérience simple en utilisant les marches aléatoires sur le multigraphe correspondant au réseau routier du territoire. Comme décrit dans le chapitre 5, la valuation sur chaque arc du multigraphe correspond au temps moyen pour franchir cet arc. Cette information est à disposition grâce à la base de données NavTeq¹. Dans cette expérience, nous disposons d'un certain nombre d'entités placées sur les sommets du multigraphe. Le nombre d'entités est égal au nombre de sommets du multigraphe. Initialement, chaque entité repose sur un sommet. Ensuite, nous lançons une boucle itérative où, à chaque étape, chaque entité doit traverser aléatoirement un arc adjacent ou attendre. Le nombre de passages sur chaque arc est comptabilisé durant la simulation. Une entité traverse un arc ou attend x étapes correspondant au temps de franchissement de l'arc. Après avoir franchi un arc, une entité choisit aléatoirement un arc adjacent à condition de ne pas revenir vers le sommet duquel elle est partie. Les arcs utilisés par une entité sont stockés pour empêcher l'entité de les réemprunter. Comme le réseau routier de notre étude est délimité, certaines routes de la frontière sont coupées. Si une entité atteint une telle impasse, elle est réintroduite sur un sommet aléatoire du multigraphe.

Nous avons effectué plusieurs simulations en changeant à chaque fois la graine aléatoire et nous avons toujours obtenu des résultats très proches. La figure 7.10 représente l'une des simulations. Les arcs sont colorés en utilisant une graduation allant du bleu (presque pas de passage) au rouge (congestion) passant par le vert, le jaune et l'orange. L'échelle est géométrique. Pour passer du bleu au vert, il faut doubler le nombre de passages et ainsi de suite de graduation en graduation.

Dans sa version statique, l'algorithme s'arrête une fois qu'un nombre maximum de passages est atteint (ici 4000). Nous avons choisi un grand nombre afin que les entités explorent suffisamment le multigraphe. Cette méthode présente pourtant des lacunes. Il s'agit de la rétroaction positive qui amplifie le système et provoque de l'hétérogénéité. Pour cela, il fallait intégrer un mécanisme de rétroaction négative pour régler le système en ajoutant de l'évaporation sur les arcs pour éliminer les mauvaises solutions.

En effet, nous avons développé une version dynamique de l'algorithme, nous introduisons donc des phéromones numériques sur les arcs liés au nombre de passages par arc et nous intégrons un phénomène d'évaporation. En multipliant, à chaque étape, le nombre de passages sur chaque arc par un coefficient d'évaporation (ici 0.0003). La simulation ne s'arrête que lorsque le taux de passage par arc devient stable. L'avantage de la version dynamique réside dans le fait de s'adapter à des changements éventuels de structure pendant la simulation (ex. la perte d'un arc suite à un accident).

1. Société de réalisation de cartes numériques et d'autres contenus dynamiques pour la navigation et les services de localisation, dont la navigation GPS automobile et individuelle. Voir <http://www.navteq.com/>.

Pour une meilleure compréhension, les mêmes résultats sont affichés sur la figure 7.11 avec des étiquettes qui permettent de localiser les routes et de mettre en évidence leur utilisation. Les routes identifiées correspondent à celles du centre-ville et aux autoroutes. L'A29 et l'A13 sont les deux principales autoroutes qui représentent les flux d'échange entre les communes de l'agglomération havraise et l'extérieur. La route libellée « Entrée principale » est l'une des routes les plus utilisées pour entrer au Havre (cette ville est entourée par l'eau sur sa frontière sud et sa frontière ouest). La route libellée « La Brecque » constitue un très grand échangeur qui est, pour les mêmes raisons, l'une des sections les plus utilisées pour entrer ou sortir du Havre.

Le nombre de passages déterminés avec cette marche aléatoire constitue un indicateur sur les différentes routes susceptibles d'être plus empruntées que d'autres en raison de la topologie du multigraphe.

Nous remarquons que les résultats de l'enquête ménage présentés dans le chapitre 6 (cf. figure 6.8) se rapprochent de ceux obtenus par la marche aléatoire sur le même multigraphe ; les principales routes fréquentées dans les deux approches sont similaires surtout pour les autoroutes et les entrées du Havre. Ces deux méthodes constituent un moyen efficace pour construire une photographie des déplacements sur un réseau routier, même si *a contrario* de la marche aléatoire, l'approche exploitant une EMD nécessite des données sur les déplacements de la population. En effet, la marche aléatoire proposée ne dépend que de la structure du multigraphe (pondéré dans notre travail) et peut être appliquée sans avoir recours à des données supplémentaires sur les déplacements de la population, d'où l'intérêt de cette méthode.

Nous avons néanmoins conscience qu'une étude plus approfondie devrait être conduite afin de pouvoir valider notre démarche. Ce travail a été engagé sur l'agglomération de Rouen pour laquelle nous obtenons des résultats encourageants par rapport aux données de trafic connues.

Cette même simulation a été testée après avoir bloqué l'accès à certaines routes. Pour cela, les autoroutes A13 et A29 ainsi que l'entrée principale de la ville ont été supprimées. La figure 7.12 montre le résultat. Par ces suppressions, nous remarquons que ces routes absorbaient une quantité importante de trafic, que le trafic est alors plus diffus dans l'agglomération et que l'échangeur de la « Brecque » est complètement saturé. Ce phénomène est bien connu lors des mouvements de grève qui bloquent parfois ces accès.

Si nous lançons la même simulation en ne bloquant que l'entrée du Havre, nous obtenons à peu près les mêmes résultats qu'à la première simulation où aucune route n'était supprimée. Ceci signifie que les marcheurs qui « aperçoivent » une route bloquée prennent d'autres routes sans trop affecter le trafic. Le résultat de cette dernière expérimentation est illustré dans la figure 7.13.

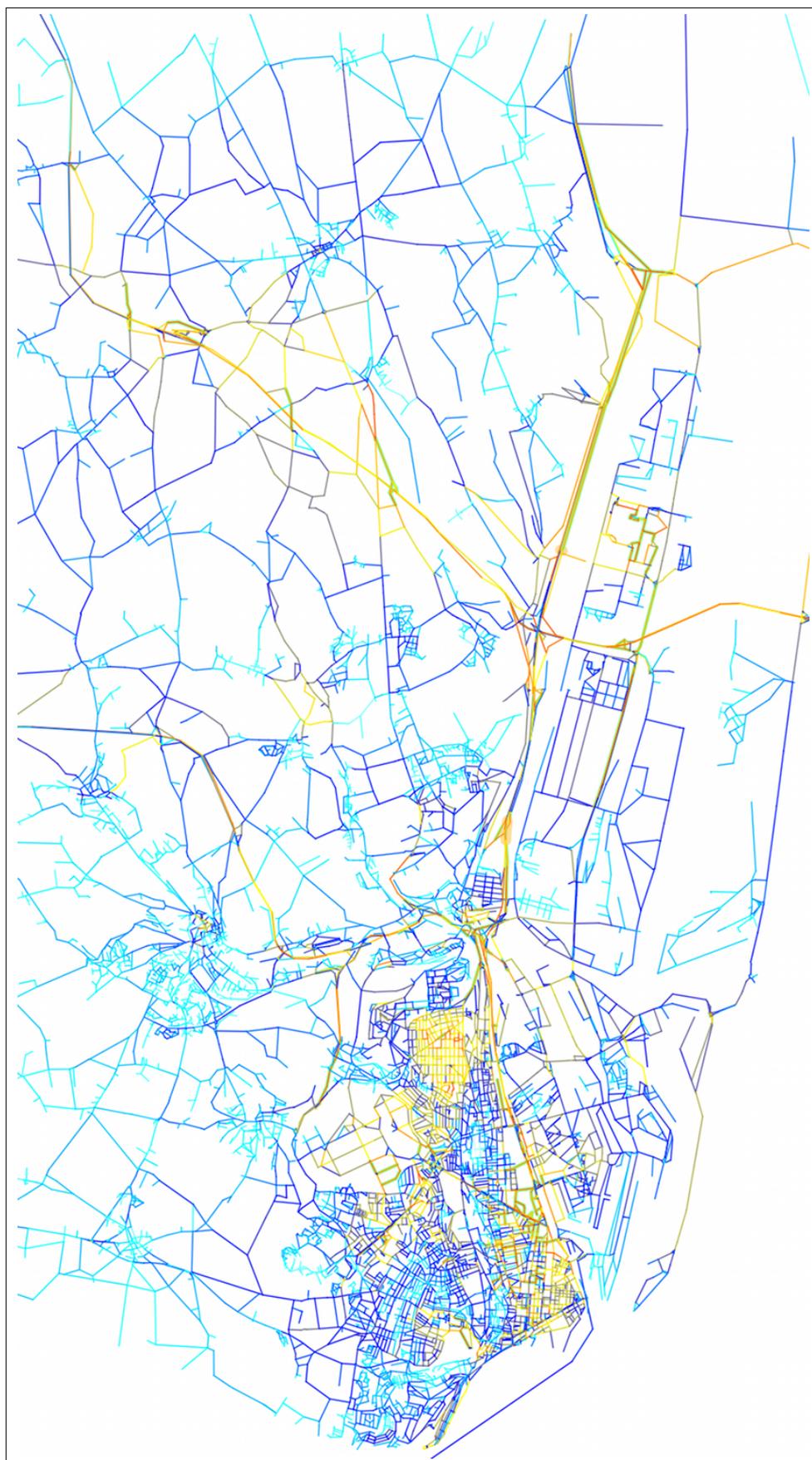


FIGURE 7.10: Marche aléatoire sur le multigraphe de l'agglomération havraise après 4000 itérations : du non emprunté (en bleu) jusqu'au congestionné (en rouge).

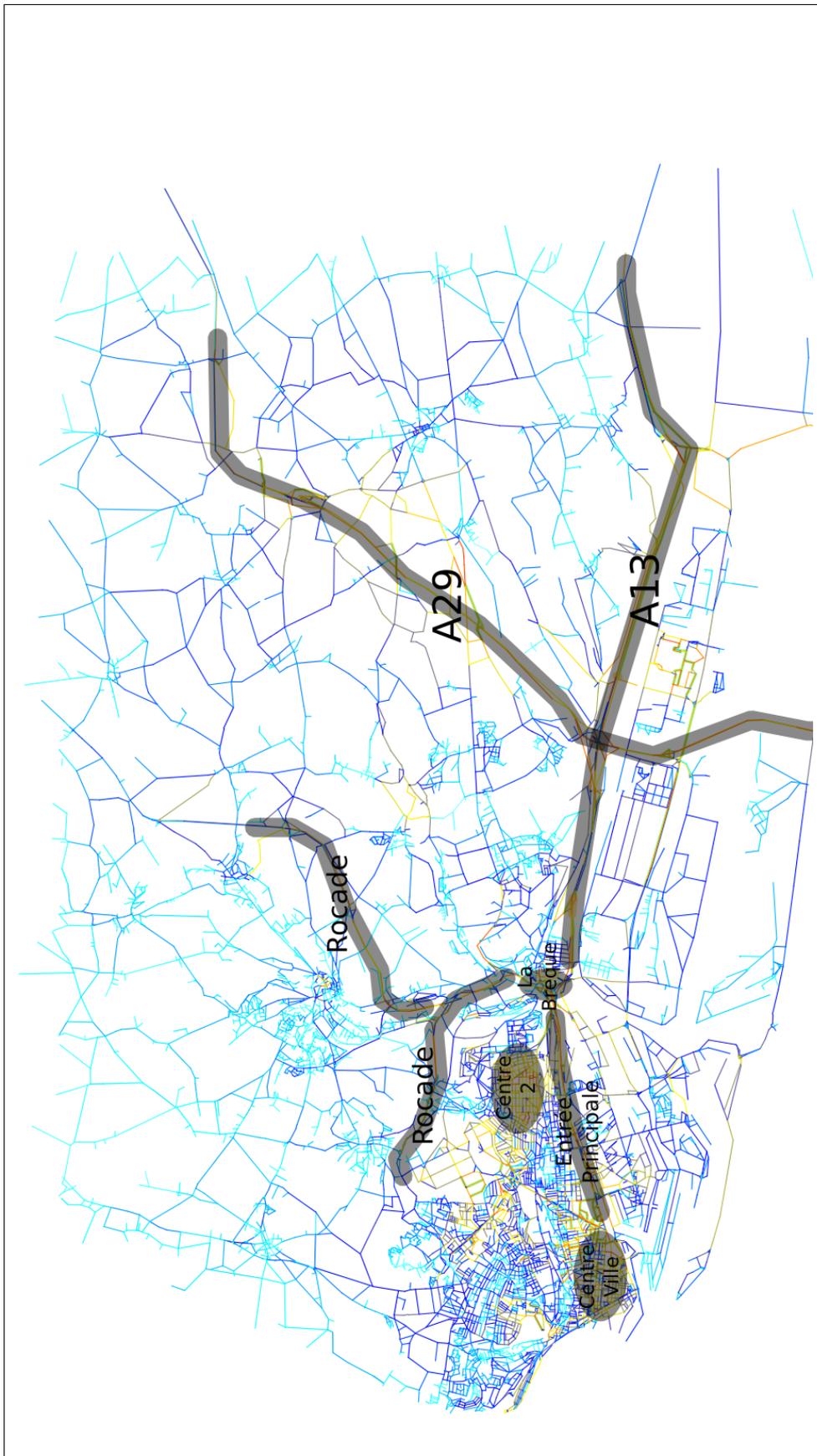


FIGURE 7.11: La figure 7.10 avec des labels sur les zones « importantes ».

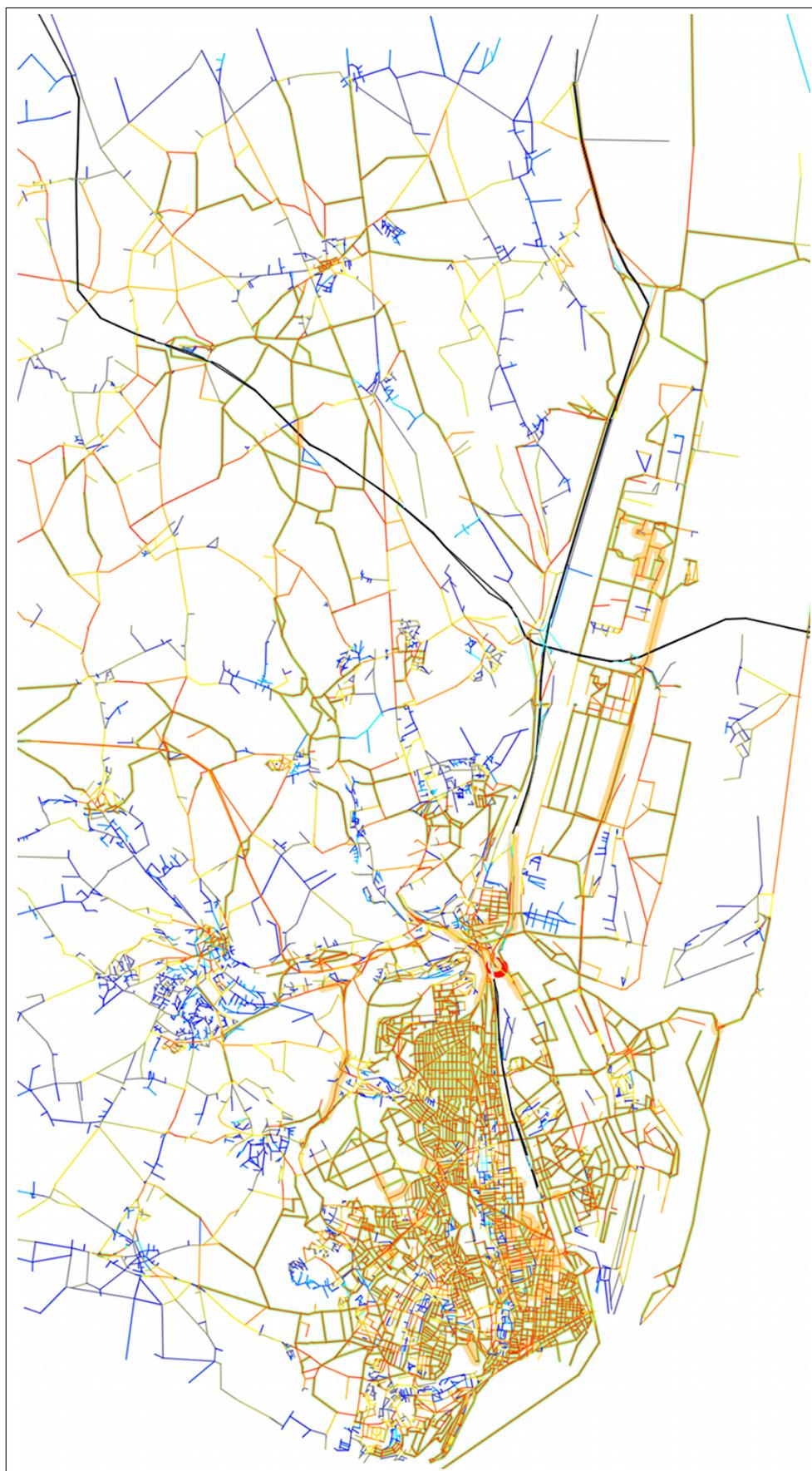


FIGURE 7.12: La marche aléatoire après 4000 itérations sans l'A13, l'A29 ni l'entrée principale du Havre.

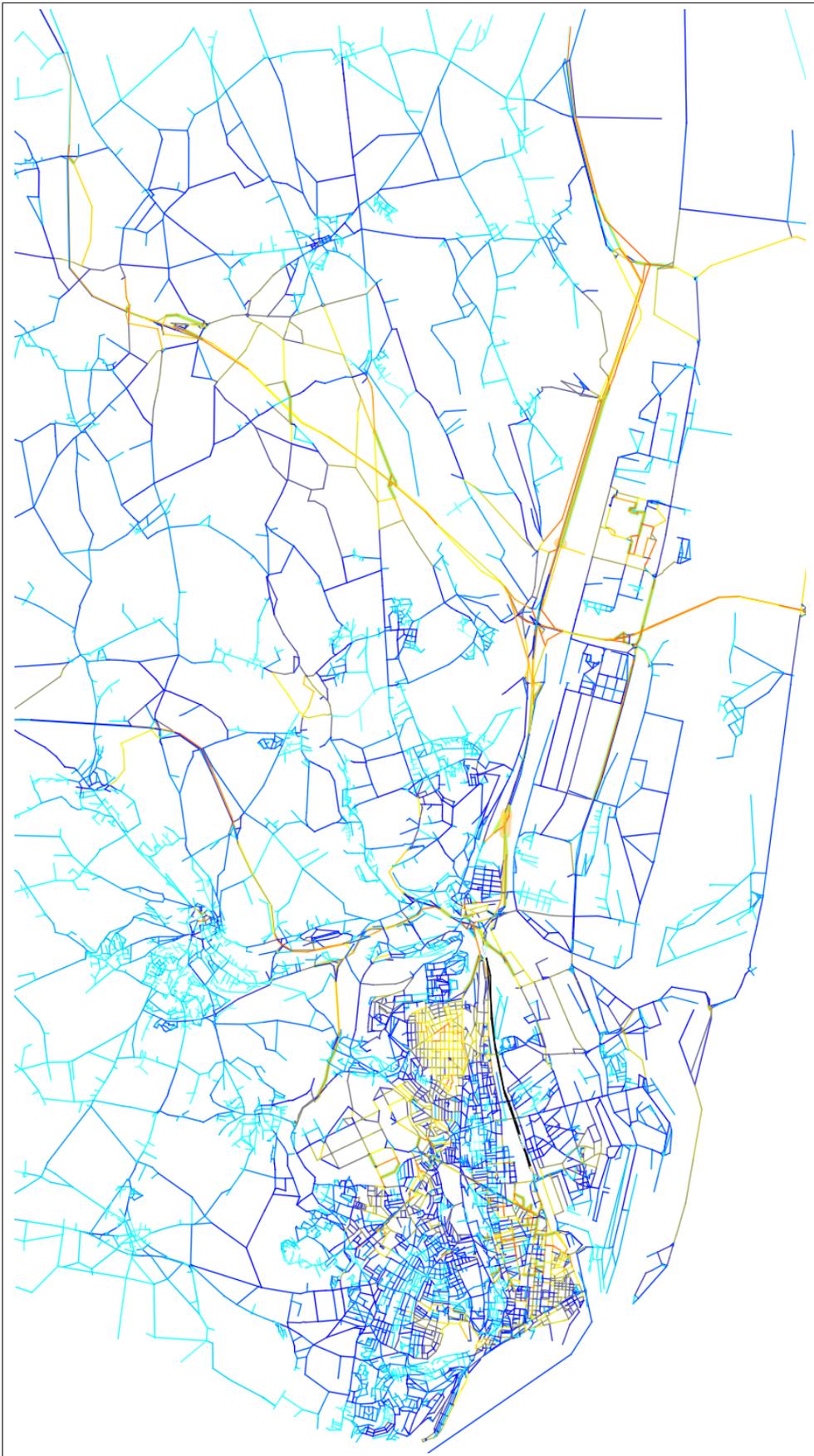


FIGURE 7.13: La marche aléatoire après 4000 itérations sans l'entrée principale du Havre.

SIMULATION DU TRAFIC ROUTIER

8.1	Microsimulation du trafic	164
8.1.1	Caractéristiques techniques des véhicules	165
8.1.2	Formulation de la loi de poursuite	166
8.1.3	Sensibilité aux paramètres	167
8.2	Validation du modèle	182

Les modèles de trafic peuvent être classés selon la finesse de la représentation de l'écoulement. Ainsi, chaque modèle permet une représentation plus ou moins détaillée des phénomènes physiques et se caractérise éventuellement par une facilité plus ou moins grande de mise en œuvre. Ce choix est délicat à plus d'un titre puisque plus on augmente la représentativité du modèle, plus on augmente les temps de calcul. De plus, il est également souvent difficile de garantir que la trajectoire du modèle corresponde bien à celle attendue. On distingue ainsi deux grands types de modèle : le modèle microscopique et le modèle macroscopique ; les modèles hybrides permettent de coupler ces deux types de modèle. Dans ce qui suit, nous décrivons les principales différences entre les types de modèle et quelques avancées liées à la modélisation hybride avant de présenter notre modèle de microsimulation.

Modèle microscopique

La simulation microscopique du trafic routier a connu un fort développement ces dernières années. Ce genre de modèle est surtout utilisé quand les conditions de cir-

culacion ne peuvent pas être étudiées analytiquement : un grand nombre de véhicules en forte interaction, dans un environnement en présence d'un nombre considérable d'éléments régulateurs du trafic (feux de signalisation, priorités, passages piétons ...). Les variables utilisées pour représenter l'écoulement sont la position longitudinale $x(t)$ (éventuellement la position latérale $y(t)$), la vitesse $\dot{x}(t)$ et l'accélération $\ddot{x}(t)$ de chaque mobile.

Le modèle microscopique représente donc le comportement individuel de chaque véhicule en représentant les interactions avec les autres véhicules et en général en utilisant une spatialisation. Les interactions sont généralement modélisées par des lois de poursuite. À la loi de poursuite, un modèle de génération stochastique est généralement ajouté pour gérer l'introduction d'objets mobiles en fixant leur comportement initial. Ce type de modèle utilise souvent une distribution probabiliste décrivant l'arrivée aléatoire. Le modèle peut être raffiné en ajoutant un modèle de dépassement par exemple pour tous les véhicules automobiles, un modèle de contrôle qui simule les feux tricolores ... et un modèle de conflits sur les intersections. Des modèles microscopiques peuvent également être utilisés pour des problèmes de mouvement de foules, on pense, en particulier aux approches collectives de type *boids* [156]. Dans le cadre de l'évacuation des populations via le réseau routier, un modèle microscopique nous semble utile pour comprendre les interactions entre les évacués et l'influence de ces interactions sur la trajectoire globale du système.

Modèle macroscopique

Le modèle macroscopique repose sur l'analogie entre la circulation des véhicules et l'écoulement d'un fluide à l'intérieur d'un canal. Le comportement des différents éléments qui constituent le flux est abordé de manière moyenne et on considère que le fluide les représentant est continu. Le flux est alors représenté par trois variables : le débit $Q(x, t)$, la concentration ou la densité $K(x, t)$ et enfin la vitesse du flot $V(x, t)$. Les trois variables Q , K et V sont reliées entre elles par des lois d'écoulement sur le même principe des lois de mécanique de fluides posés par Lighthill, Whitham et Richards (LWR) [104]. En général, le débit est défini comme étant le produit de la densité et de la vitesse du flux de trafic (*cf.* équation 8.1) :

$$(8.1) \quad Q(x, t) = K(x, t) * V(x, t)$$

La loi fondamentale pour ces modèles est relative à la conservation des flux comme montré dans l'équation 8.2 :

$$(8.2) \quad \frac{\partial K(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} = 0$$

D'après 8.1, au régime stationnaire, la vitesse et le débit dépendent donc de la densité, comme nous le montre le diagramme fondamental de la figure 8.1, de façon dé-

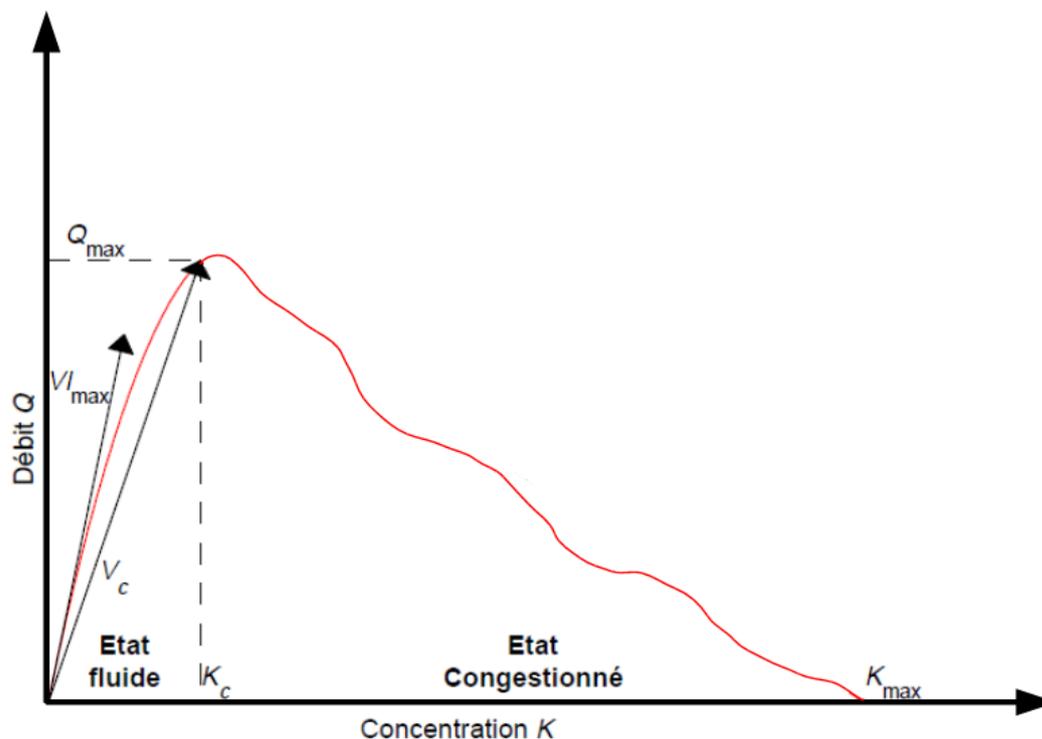


FIGURE 8.1: Diagramme fondamental.

croissante pour la vitesse et de manière tout d'abord croissante pour le débit puis décroissante. Un débit maximal est atteint fixant la capacité maximale d'écoulement de l'arc et déterminant donc une densité critique.

La conception d'un modèle macroscopique nécessite une troisième équation indépendante décrivant le comportement des véhicules. Si le système se trouve toujours en état d'équilibre et n'évolue que d'un état d'équilibre à un autre, on parle d'un modèle de premier ordre classiquement nommé Lighthill Whithman et Richards (**LWR**), en d'autres termes, une relation est supposée entre deux des trois variables (le débit n'est fonction que de la concentration par exemple). Une des lacunes importantes de ce type de modèle réside dans le fait qu'il ne modélise pas les phases transitoires d'accélération ou de décélération des véhicules. Des changements brusques de vitesse des véhicules sont constatés après un démarrage au feu rouge par exemple. Un véhicule en 5^{ème} ou 6^{ème} position dans une file d'attente démarre juste après 2 secondes que le feu passe au vert et avec une accélération infinie [42]. Le **LWR** est simple et marche bien pour les grandes distances et pour des situations peu congestionnées.

Si la relation entre les variables du flux est représentée par une équation dynamique sur la vitesse traduisant le comportement de l'accélération, on parle alors d'un modèle de second ordre. Par ce type de modèles, les états hors l'équilibre sont aussi pris en compte. Dans un contexte d'évacuation des populations, un modèle macroscopique peut éventuellement être utilisé pour analyser les flux sur les grands axes et non plus les véhicules individuels.

Modèle hybride

Le modèle hybride permet de coupler, au sein de la même simulation, les deux types de modèles d'écoulement dynamique présentés plus haut. L'intérêt évident de ce type d'approche réside dans le fait de pouvoir adapter le type de représentation aux phénomènes émergents régissant l'écoulement sur les différents éléments du réseau. Il permet ainsi de décrire précisément (avec le modèle microscopique) certains éléments spécifiques où les phénomènes locaux de l'écoulement peuvent avoir des conséquences au niveau global (gare de péage, entrecroisement autoroutier, carrefour giratoire, ...) tout en conservant une vision globale de l'écoulement sur le reste du réseau (avec le modèle macroscopique).

L'utilisation d'un modèle hybride peut s'avérer importante dans le cadre de gestion des évacuations. Le changement d'échelle du micro au macro permet d'effectuer une économie de calcul lorsque le niveau de représentation le permet. Cette utilisation semble pertinente pour une zone dans une situation normale (pas de danger). Par contre, le passage du macro au micro, dans une situation critique (incendie par exemple) permet de zoomer sur une zone pour détecter les comportements et les interactions entre les entités en danger se trouvant dans cette zone.

L'existence d'un autre type de modèles nommé mésoscopique est à noter, dont la précision et le coût de calcul sont compris entre ceux du micro et du macro. Ce type de modèle se base sur l'analogie avec la cinétique des gaz. Le calcul se réduit au traitement de paquets de véhicules (homogènes) au lieu des véhicules individuels qui génère moins de perte d'information qu'en utilisant un modèle macroscopique. Les mouvements de ces paquets sont calculés en utilisant les modèles macroscopiques. L'hybridation peut donc se faire à l'appui d'un modèle micro et un modèle meso engendrant une perte d'information moins importante que pour un couplage avec le macro.

Des travaux ont déjà abordé la modélisation hybride du trafic [108]. Cependant, ce genre d'approche est relativement novateur et, à notre connaissance, très peu ont abordé un changement de modèle en cours de simulation [84].

Le problème d'interfaçage est un problème délicat à résoudre. Le fait de passer d'un tronçon micro vers un tronçon macro et vice versa requiert le respect d'un certain nombre de règles afin d'assurer une transmission correcte de l'information entre deux niveaux de représentation différents.

Les règles d'interfaçage du macro vers le micro sont généralement les suivantes :

-
- Générer le bon flux d'entrée microscopique vérifiant les valeurs sortant au niveau macroscopique : une loi de poisson peut être utilisée pour générer des véhicules par unité de temps micro.
 - Assigner une voie de circulation à chaque véhicule généré : une loi de distribution binomiale peut être utilisée. Les paramètres de la loi dépendent de la vitesse et de la concentration des véhicules.
 - S'assurer de la propagation des conditions de flux de trafic microscopique vers le niveau macroscopique : une cellule virtuelle est utilisée au niveau micro, dans laquelle la concentration est récupérée et utilisée au niveau macro.

Les règles d'interfaçage du micro vers le macro sont généralement les suivantes :

- Créer une cellule virtuelle en zone micro et des véhicules virtuels en début de la zone macro.
- Injecter au flux entrant de la cellule macroscopique le flux sortant par la cellule virtuelle.
- S'assurer de la propagation des flux de trafic macroscopique vers le niveau microscopique : un véhicule qui ne précède aucun autre suit un véhicule virtuel de la première cellule de la zone macro dont les paramètres sont dérivés de la vitesse et de la densité.

La synchronisation des deux modèles consiste alors à lancer le modèle macro pour une période T , puis à récupérer des valeurs en amont et en aval de la zone macro et à lancer n fois ($n = T/t$) le modèle micro et récupérer les valeurs correspondantes des cellules virtuelles.

Afin de répondre aux lacunes de passage du continu vers le discret et vice versa, un modèle hybride « idéal » a été proposé par Bourrel *et al.* dans [22]. Les deux modèles micro et macro ont les mêmes règles de comportement, *i.e.* celles du modèle LWR. La propagation de la congestion est apparue dans la zone micro ainsi que dans la zone macro. Ce modèle est vraiment théorique et n'a pas d'application. Une extension de ce modèle a été réalisée au niveau micro par la génération stochastique de véhicules.

Le modèle théorique proposé dans [22] a été amélioré dans [23]. Le modèle LWR est adopté pour modéliser les flux mais aussi pour modéliser le déplacement individuel des véhicules. Le but est d'utiliser un même modèle simple et flexible pour d'éventuelles extensions et de se focaliser plus sur le problème d'interfaçage et de transmission entre les deux modèles. Ainsi, une seule voie par route avec des caractéristiques uniformes et un seul type de véhicules sont considérés. Une cellule de transition juste avant la zone micro (*upstream*) assure la transition du trafic de la zone macro vers la zone micro et inversement pour la cellule de transition *downstream* après la zone micro. La cellule de transition permet de faire coexister les deux modèles de trafic avec les caractéristiques d'un véhicule (vitesse, position) et celles du flux (densité, flux) par simple agrégation des véhicules. La synchronisation des deux modèles est faite en définissant $T = n * t$ où T représente le pas macro et t le pas micro, n est un entier positif représentant la discrétisation.

Bien que l'hybridation semble satisfaire les conditions déjà posées, le modèle micro basé sur le LWR est simple et ne prend pas en considération des comportements de véhicules un peu plus compliqués.

Les différentes approches d'hybridation présentées jusqu'à maintenant utilisent deux modèles micro-macro issus de la même loi de poursuite. Pour pallier à cette limite, un modèle hybride hétérogène a été développé dans [62], il traite la variabilité du flux sur une portion d'autoroute multi-voies divisée en deux parties macro avec une partie micro au milieu. Le modèle macroscopique utilisé est celui de Pagne¹ [132] après sa discrétisation et la loi de poursuite appliquée est celle définie par Krauß au niveau micro [98]. Ce dernier est un modèle microscopique basé sur la notion de vitesse de sécurité séparant un véhicule de celui qui le précède et dépendant du temps de réaction du conducteur. Il est rapide, sans collision et selon la littérature, capable de reproduire parfaitement les caractéristiques macroscopiques du flux [97]. Comme pour les autres approches hybrides, la synchronisation est assurée en définissant le $pas_macro = n * pas_micro$ (n entier > 0). Un agent *upstream* et un autre *downstream* assurent la transition sur les interfaces entre les zones. Les perturbations dans le trafic de l'aval vers l'amont et réciproquement se propagent correctement. Le travail a été appliqué sur une portion d'autoroute. Afin de mesurer l'impact global des perturbations dans différents endroits, le modèle doit être appliqué sur un environnement correspondant à un réseau routier.

Afin d'améliorer le niveau micro évoqué dans des travaux antérieurs [62] et de valider l'impact des améliorations au sein du modèle hybride, un travail a été réalisé dans [84]. Contrairement au travail précédent ([62]), l'environnement consiste en un réseau routier avec des ronds-points à priorité et des feux rouges.

Un accident a été simulé sur un carrefour étudié au niveau micro, alors que le reste du réseau est étudié au niveau macro, permettant d'analyser l'effet de la perturbation sur le réseau. La perturbation s'est propagée en amont dans la zone macro, en faisant varier à chaque fois le pas micro et le pas macro. Finalement, la taille du réseau routier n'a pas été spécifiée. Les caractéristiques du réseau sont pourtant indispensables, l'effet d'une perturbation locale pouvant dépendre de ses caractéristiques.

8.1 Microsimulation du trafic

La micro simulation du trafic routier permet de décrire la trajectoire de chaque véhicule sur le réseau en modélisant l'interaction avec les autres véhicules. Nous cherchons à analyser les éléments essentiels qui contraignent les flux sur le réseau routier, que ce soit dans une situation normale ou dans une situation de crise. Ces éléments peuvent être liés à l'environnement lui-même ou bien à l'usage du réseau. Dans ce travail, nous avons choisi de mettre en œuvre un modèle microscopique de trafic. Ce choix est motivé par plusieurs arguments :

1. Modèle macroscopique de second ordre.

- L’environnement dans lequel agissent les entités leur impose des contraintes. Ainsi, en se restreignant au cas du réseau routier, le comportement des entités est contraint par ses règles de structure et d’usage. Des règles locales liées aux caractéristiques des voies (largeur, vitesse, capacité), à l’existence des régulateurs de trafic (intersections, rond-points, feux rouges...) sont à respecter par les entités. Ces éléments sont à notre disposition grâce à la base de données NavTeq² de laquelle sont extraites les informations liées au réseau routier.
- L’utilisation d’une approche de modélisation du comportement individuel de chaque entité et de son interaction avec son environnement et les autres entités nécessite des ressources de calcul importantes. Cette contrainte n’est plus bloquante de nos jours grâce à l’évolution des capacités de calcul des ordinateurs. Ceci permet de modéliser des dizaines voire des centaines de milliers d’entités sur des réseaux de taille importante, ce qui est le cas dans le cadre de cette thèse.
- Les résultats recueillis à partir de l’EMD traduisent les trajets individuels de la population. Une approche microscopique permet de tracer les déplacements de chaque personne.
- La marche aléatoire présentée dans le chapitre 7 permet de déterminer les routes susceptibles d’être les plus empruntées. Si cette approche permet de mettre en évidence l’influence de la mobilité, elle ne prend pas en compte les interactions entre les entités mobiles ; alors qu’un modèle microscopique basé sur une loi de poursuite même simple permettra de mieux décrire la réalité et de faire éventuellement apparaître le couplage entre interactions et structure. De plus, une comparaison entre marche aléatoire et modèle microscopique avec une loi d’interaction est envisageable.

Nous avons choisi de développer un modèle microscopique avec une loi de poursuite simple. Elle permet aux véhicules de se déplacer sans collision. Nous n’avons pas cherché à utiliser et à développer un modèle de comportement (trop) sophistiqué. En effet, si celui-ci peut s’avérer pertinent pour des analyses fines du trafic quand, par exemple, l’environnement est représenté avec un niveau de représentation élevé et que l’on cherche des informations quantitatives. Cependant, il est illusoire d’aller dans cette voie dans le cadre du risque pouvant présenter des ruptures de comportement et des pertes de rationalité.

Ce modèle est donc discret avec un pas de temps dt d’une seconde ; les véhicules se déplaçant avec une accélération constante pendant le pas de temps.

8.1.1 Caractéristiques techniques des véhicules

Les mobiles que nous considérons afin de simuler le trafic sont des véhicules automobiles tous de même taille. Les propriétés mécaniques considérées sont liées à la modélisation de la loi de mobilité, il s’agit de l’accélération et de la décélération maxi-

2. <http://www.navteq.com/>.

males. Ces éléments permettent d'avoir une représentation réaliste de la cinématique dans les phases d'arrêt et de redémarrage.

8.1.2 Formulation de la loi de poursuite

Pour établir un modèle microscopique de trafic, il faut décrire la trajectoire de chaque véhicule qui parcourt un tronçon de route, en passant par la modélisation de l'interaction entre chaque véhicule automobile et son prédécesseur. Ce modèle doit prendre en compte un certain nombre de contraintes qui sont liées à la fois à l'environnement mais aussi aux caractéristiques mécaniques.

Soit deux véhicules i et $i - 1$, tel que $i - 1$ est le prédécesseur de i et $x_i(t)$, $x_{i-1}(t)$ leurs positions respectives. La vitesse des véhicules i et $i - 1$ est $\dot{x}_i(t)$ (resp. $\dot{x}_{i-1}(t)$) et son accélération $\ddot{x}_i(t)$ (resp. $\ddot{x}_{i-1}(t)$). La loi de poursuite est définie par rapport à la vitesse relative des véhicules $\dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t)$ et la distance entre les deux véhicules $x_{i-1}(t) - x_i(t)$. D'autres éléments sont à considérer :

- La vitesse maximale autorisée.
- Les distances de sécurité : si un véhicule V est précédé à un instant t , il faut qu'il avance en « gardant à l'esprit » qu'à l'étape $t + 1$, son prédécesseur est susceptible de procéder à un freinage d'urgence. Dans ce cas, il faut que V prenne en compte sa distance de freinage qui dépend de l'efficacité de son système de freinage. Il faut aussi qu'il considère sa vitesse actuelle et la distance de freinage de son prédécesseur, une distance de sécurité dépendant de sa vitesse initiale, mais aussi de la distance qui sépare les deux véhicules.
- Les distances de freinage : si un véhicule n'est pas précédé, il avance toujours de telle façon qu'il puisse s'arrêter à la vitesse nulle une fois qu'il arrive au bout du tronçon de route considéré.

Dans le tableau 8.1, nous indiquons la signification des symboles utilisés pour le calcul de la distance parcourue par un véhicule pendant un pas de temps Δt .

Considérons maintenant deux véhicules i et son prédécesseur $i - 1$; si la distance de freinage de $i - 1$ est calculée selon l'équation 8.3 :

$$(8.3) \quad f_{i-1} = \dot{x}_{i-1}^0(t) * \Delta t - \frac{1}{2} * bmin_{i-1} * \Delta t^2$$

l'accélération du véhicule i à l'instant t est calculée comme dans l'équation 8.4 :

$$(8.4) \quad \ddot{x}_i(t) = \frac{2 * s_{i,i-1} + 2 * f_{i-1} + bmin_i * \Delta t^2 - 4 * \dot{x}_i^0(t) * \Delta t - 2 * \lambda * \dot{x}_i^0(t) * \Delta t}{3 * (\Delta t^2 + \gamma)}$$

La valeur de $\ddot{x}_i(t)$ oscille entre la décélération maximale $bmin_i$ et l'accélération maximale $amax_i$. Elle est aussi bornée par l'accélération maximale possible ap_i . Si le

Symbole	Désignation
$\ddot{x}_i(t)$	Accélération du véhicule i à l'instant t
$amax_i$	Accélération maximale du véhicule i
ap_i	Accélération maximale possible du véhicule i selon la nature de la route
$bmin_i$	Décélération maximale du véhicule i
$\dot{x}_i(t)$	Vitesse du véhicule i
$\dot{x}_i^0(t)$	Vitesse initiale du véhicule i
Δx_i	Distance parcourue par le véhicule i
f_i	Distance de freinage du véhicule i
r_i	Distance restante du véhicule i le séparant du bout de la route
$d_{i,j}$	Distance le véhicule i de son prédécesseur j
$s_{i,j}$	$d_{i,j} - c$ où c est une constante liée à un espace minimum entre deux véhicules
Δt	Pas de temps de la simulation
λ	Constante positive
γ	Constante positive
$\lambda * \dot{x}_i^0(t)$	Distance de sécurité dépendant de la vitesse initiale ($\dot{x}_i^0(t)$) du véhicule i

TABLE 8.1: Désignation des symboles utilisés pour le calcul de la loi de poursuite.

véhicule i n'est pas précédé, son accélération est calculée selon l'équation 8.5 :

$$(8.5) \quad \ddot{x}_i(t) = \frac{2 * r_i + bmin_i * \Delta t^2 - 4 * \dot{x}_i(t) * \Delta t}{3 * \Delta t^2}$$

8.1.3 Sensibilité aux paramètres

Nous simulons le trafic routier dans un environnement complexe qui impose des règles sur les véhicules. À leur tour, les véhicules interagissant entre eux et avec l'environnement, ce qui peut contraindre l'environnement. Nous modélisons donc un phénomène réel, de nombreux paramètres sont pris en compte pour le modèle construit. Une étude de sensibilité aux paramètres permet de quantifier la sensibilité d'une grandeur mesurée aux variations d'un paramètre du système, permettant de déterminer l'influence du paramètre étudié. Le changement d'un paramètre peut créer des perturbations locales mais aussi provoquer un changement dans la trajectoire globale du système. Nous modifions à chaque simulation un paramètre et nous nous plaçons à une échelle plus globale pour mesurer l'effet du changement sur le système.

Influence du nombre de véhicules

Les phénomènes de saturation du réseau peuvent être liés à des perturbations occasionnées par des mouvements de grève ou à un accident mais aussi dûs au nombre

de véhicules circulant en même temps sur le réseau (heures de pic par exemple). Pour cela, nous avons testé l'influence du nombre de véhicules sur l'état global de la simulation. L'un des paramètres susceptibles d'être influencé par la charge du trafic est la vitesse de chaque véhicule, ce qui entraîne des conséquences sur la vitesse moyenne des véhicules. Pour chacun des tests de simulation menés, le nombre de véhicules reste constant. Selon les résultats de l'EMD (figure 6.7), le nombre de véhicules peut atteindre près de 45 000 véhicules lors de la deuxième heure de pic du trafic. Nous avons mené des tests avec plus de 45 000 (100 000 et 200 000), correspondant à une situation pour laquelle la plupart des résidents utilisent leurs véhicules en même temps.

Influence du nombre de véhicules sur la vitesse moyenne

Nous avons lancé la simulation plusieurs fois pendant 5000 itérations chacune en changeant à chaque fois le nombre de véhicules et avons tracé pour chaque test une courbe correspondant à la vitesse moyenne des véhicules par pas de temps $\Delta t = 1$ seconde. Dans ces tests, l'accélération maximale d'un véhicule correspond à une valeur fixe comprise entre 1.5 m/s^2 et 5.5 m/s^2 . Le fait d'attribuer une accélération maximale différente par véhicule a pour vocation à créer plus d'hétérogénéité dans le déplacement des véhicules.

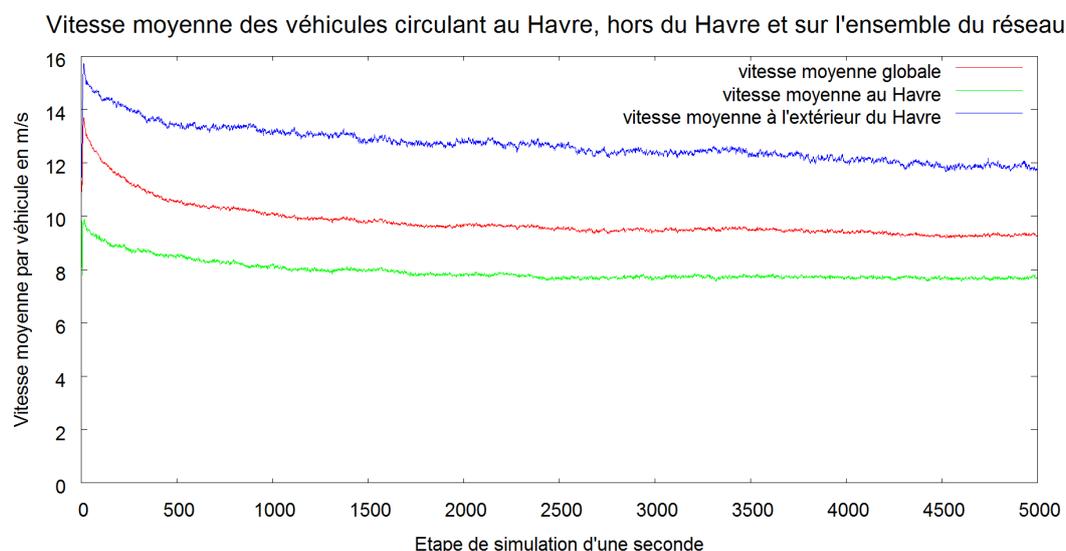


FIGURE 8.2: Vitesse moyenne pour 15 000 véhicules pendant 5000 secondes sur le réseau de l'estuaire de la Seine.

Initialement, les véhicules sont placés sur les routes selon l'importance de chacune

de ces routes (sa capacité en nombre de véhicules³). La capacité maximale totale (en nombre de véhicules) des arcs de la ville du Havre est de 246 157 véhicules et la capacité maximale totale des arcs du périphérique du Havre est de 478 579 pour un total de 724 736 si on considère que la longueur moyenne d'un véhicule est de 4 m et la distance frontale minimale entre deux véhicules qui se suivent de 1 m.

Chaque véhicule se déplace sur le réseau en respectant les contraintes liées à l'environnement et aux autres véhicules. Afin d'empêcher que les véhicules se fassent piéger en tournant localement en rond, une mémoire des derniers sommets visités a été intégrée. Arrivé à une intersection, un véhicule choisit aléatoirement un arc adjacent. Si l'arc choisi est saturé, il peut attendre jusqu'à un certain nombre d'itérations prédéfini avant de modifier son choix quand c'est possible, mais ne décide en aucun cas de faire un demi-tour là où ce n'est pas possible de le faire. Néanmoins, le réseau routier de l'étude est limité; pour cela, un véhicule qui arrive dans une impasse se réinjecte sur un arc du multigraphe choisi aléatoirement.

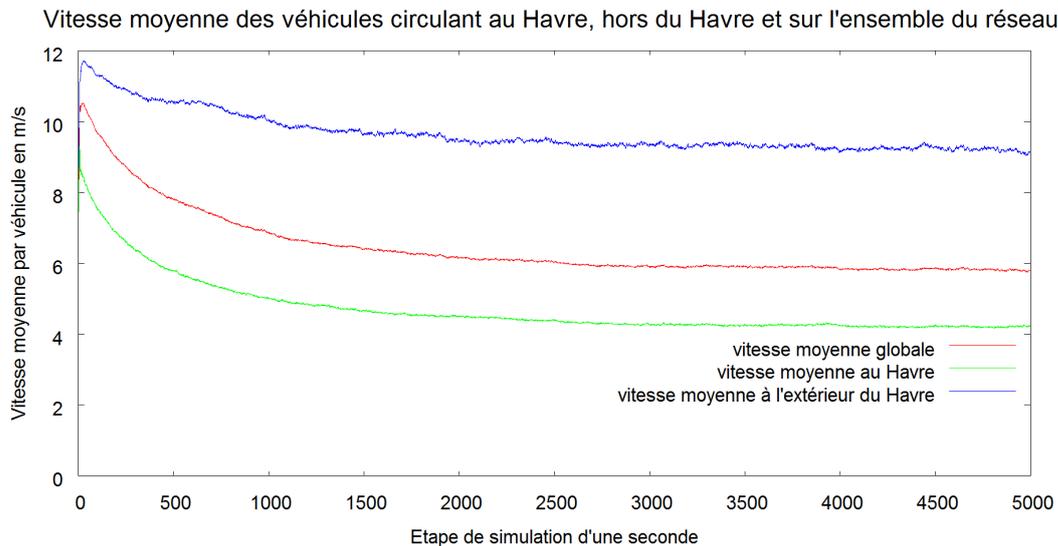


FIGURE 8.3: Vitesse moyenne pour 45 000 véhicules pendant 5000 itérations sur le réseau de l'estuaire de la Seine.

La figure 8.2 montre le résultat de simulation du déplacement de 15 000 véhicules sur 5000 itérations. Nous avons remarqué qu'à fur et à mesure de la simulation, les véhicules entrant dans la ville du Havre et plus particulièrement son centre-ville se trouvent

3. La capacité maximale C_m en nombre de voitures par arc est égale à L/l où L est la longueur de l'arc (de la route correspondante) et l représente la somme de la longueur moyenne d'un véhicule et de la distance frontale inter-véhicules.

piégés par sa structure alors que les véhicules circulant dans la périphérie ont moins de difficulté à se déplacer du fait de l'existence de plus d'espace, d'autoroutes et de voies rapides. Ceci est clairement visible sur la figure 8.2 où les véhicules roulant en périphérique ont une vitesse moyenne de 12 m/s environ (courbe en bleu de la figure) alors que ceux roulant au Havre ont une vitesse de 8 m/s (courbe en vert de la figure) en moyenne. La vitesse moyenne globale se rapproche plus de la moyenne des vitesses au Havre, le nombre de véhicules piégés au Havre augmente au fur et à mesure de la simulation ralentissant par conséquent les véhicules.

Dans un deuxième test, nous avons augmenté le nombre de véhicules circulant sur le réseau jusqu'à 45 000 véhicules pendant 5000 itérations (figure 8.3). Comme pour le premier test, nous avons tracé les trois courbes de vitesse moyenne correspondant aux véhicules qui circulent au Havre, ailleurs et sur l'ensemble du réseau de l'estuaire. La vitesse moyenne hors du Havre décroît jusqu'à un peu moins de 9.6 m/s alors que pour 15 000 véhicules, elle était à 12 m/s environ au même instant de la simulation. La vitesse moyenne des véhicules se déplaçant au Havre décroît plus fortement pour les deux simulations avec 15 000 45 000 véhicules, et ce à cause du grand nombre de véhicules qui s'accumulent progressivement sur le réseau du Havre. Par conséquent, la vitesse moyenne globale se rapproche de la vitesse moyenne au Havre.

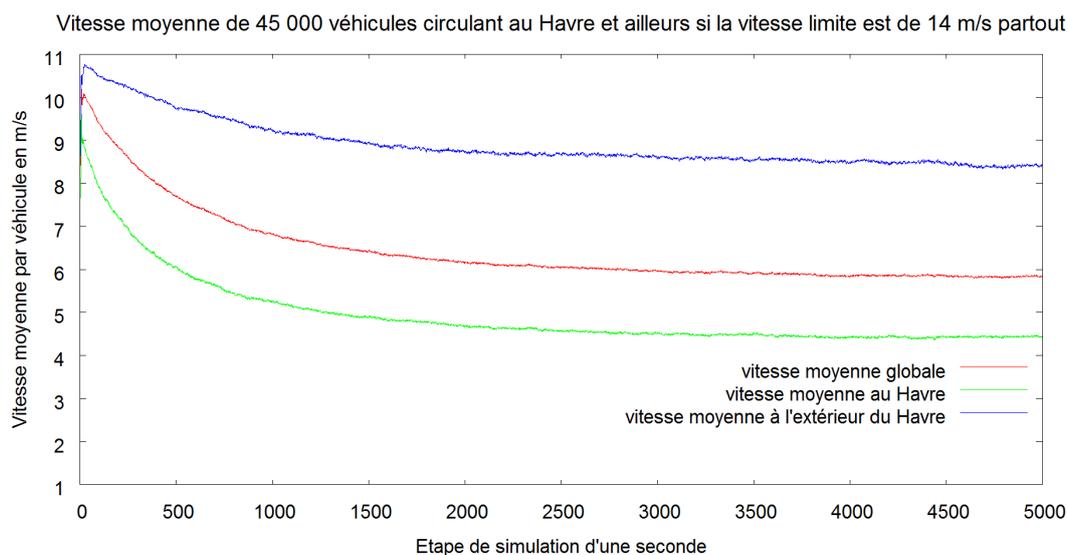


FIGURE 8.4: Vitesse moyenne pour 45 000 véhicules pendant 5000 itérations sur le réseau de l'estuaire de la Seine si la vitesse limite de tous les tronçons de routes = 14 m/s .

Pour confirmer le fait que les véhicules se font piéger principalement par la structure du réseau et pas par la vitesse limite des tronçons de route, nous avons fixé la même

vitesse limite à 14 m/s (50 km/h environ) sur tous les tronçons et avons obtenu la courbe de la figure 8.4. Cette figure montre clairement que la vitesse limite a peu d'influence sur la vitesse moyenne globale des véhicules en comparaison avec l'influence de la structure du réseau.

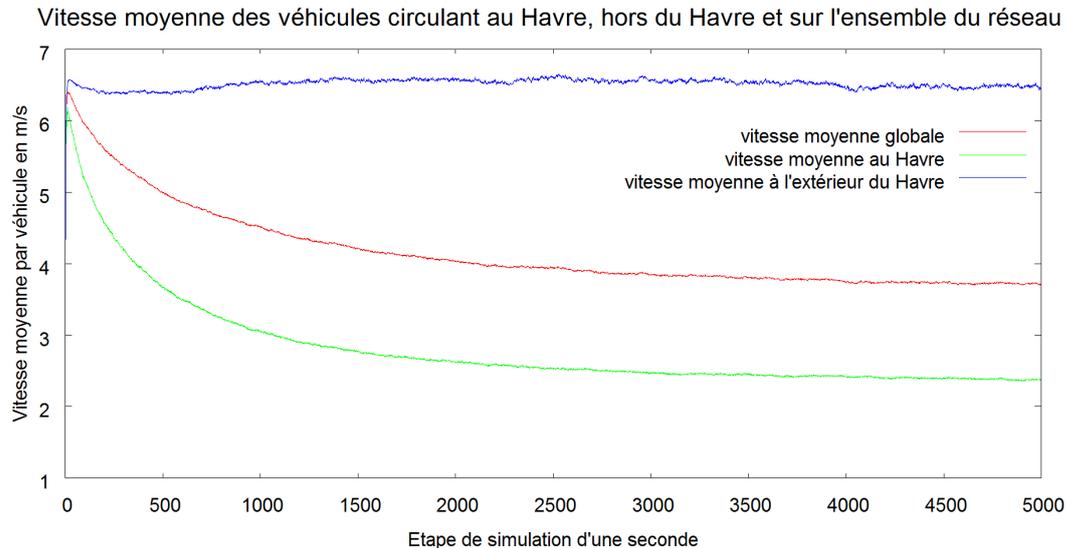


FIGURE 8.5: Vitesse moyenne pour 100 000 véhicules pendant 5000 itérations sur le réseau de l'estuaire de la Seine.

Si nous recommençons la simulation avec 100 000 véhicules sur le réseau de l'estuaire dans les mêmes conditions qu'avant, nous remarquons une baisse de la vitesse moyenne des véhicules circulant au Havre, hors du Havre et sur l'ensemble du réseau et un rapprochement progressif de la vitesse moyenne globale de celle de la moyenne des véhicules au Havre. Ceci montre une nouvelle fois que les flux sont influencés non seulement par la structure du réseau, les véhicules se faisant piéger par cette structure à l'intérieur de la ville, mais aussi par l'interaction forte qui augmente du fait du grand nombre de véhicules.

La courbe de la vitesse moyenne des véhicules de la figure 8.5 semble être linéaire sur un intervalle de 5000 itérations. Si nous traçons l'évolution de la vitesse moyenne sur un intervalle de 1000 itérations (cf. figure 8.6), nous constatons qu'elle est loin d'être linéaire du fait des perturbations sur le réseau liées aux bouchons qui se forment et se défont au cours de la simulation.

La figure 8.7 confirme que lors de la simulation, les véhicules s'accumulent de plus en plus dans la ville du Havre, faisant baisser clairement la vitesse moyenne de ces véhicules qui interagissent fortement entre eux, contre une légère augmentation de la vitesse

8. SIMULATION DU TRAFIC ROUTIER

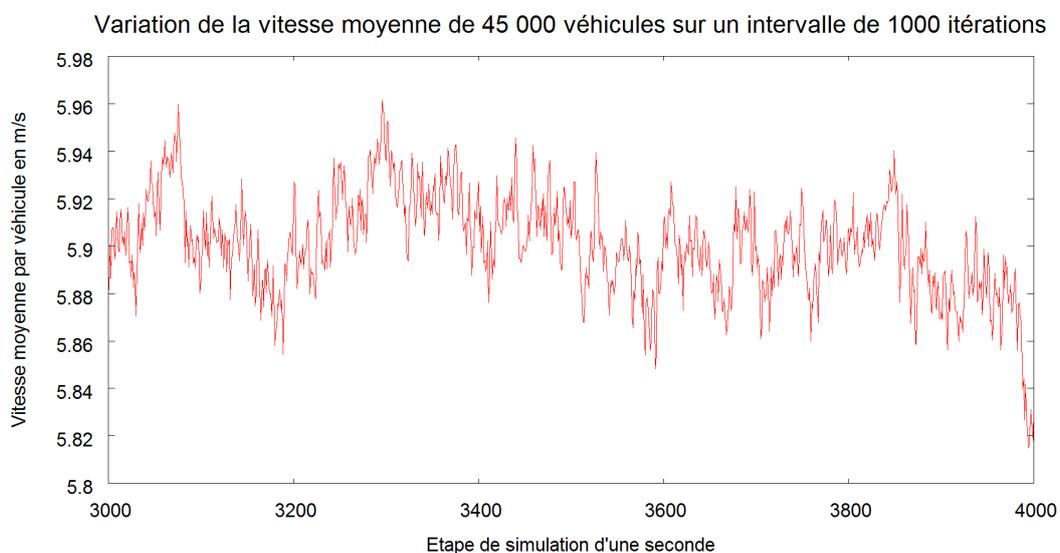


FIGURE 8.6: Vitesse moyenne pour 100 000 de la figure 8.5 entre l'itération 3000 et 4000.

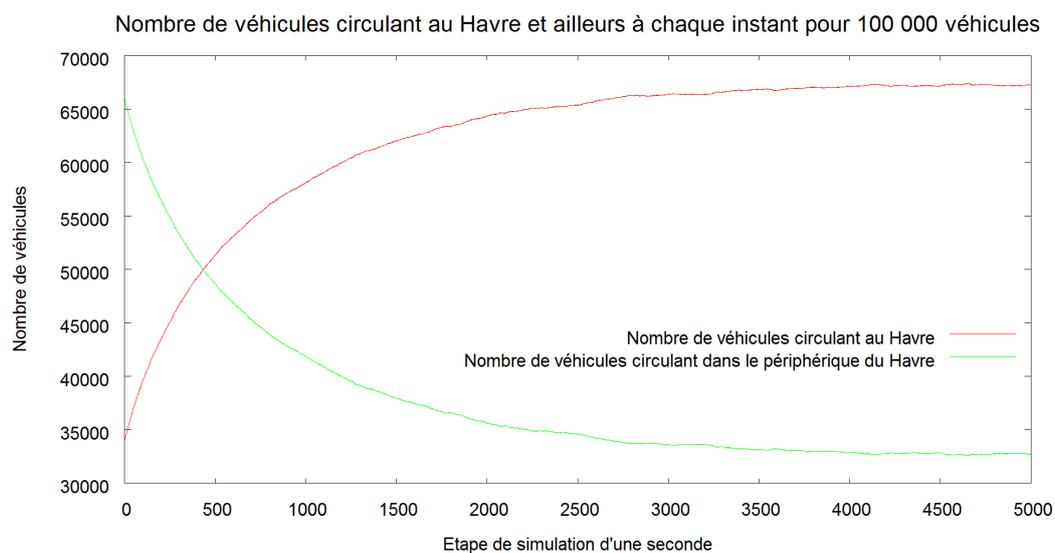


FIGURE 8.7: Nombre de véhicules circulant au Havre et à l'extérieur à chaque instant.

moyenne des véhicules circulant dans le périphérique du fait de la chute de leur nombre à fur et à mesure.

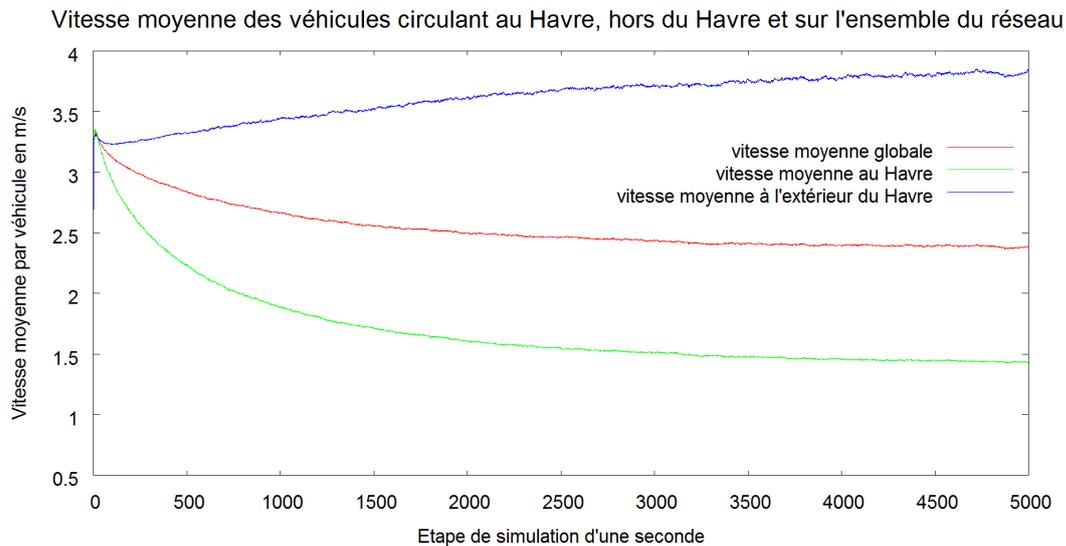


FIGURE 8.8: Vitesse moyenne pour 200 000 véhicules pendant 5000 itérations sur le réseau de l'estuaire de la Seine.

Nous avons mené un dernier test avec 200 000 véhicules (*cf.* figure 8.8). En comparant ce test avec le test précédent de 100 000 véhicules, à l'instant $t = 5000$, la vitesse moyenne des véhicules se trouvant au Havre, hors du Havre et sur l'ensemble du réseau baisse de 2.3 m/s à 1.4 m/s , de 6.4 m/s à 3.8 m/s et de 2.3 m/s à 1.4 m/s respectivement.

Dans la figure 8.9, nous traçons la vitesse globale moyenne obtenue pour chacun des tests précédents. Nous remarquons qu'à chaque fois qu'on augmente le nombre de véhicules, on sature le réseau routier et on fait ralentir les véhicules. Pour comprendre précisément la variation de la vitesse moyenne à un instant donné, nous avons fait une photographie de la situation des véhicules à un même instant t pour chacun des tests.

La courbe de la figure 8.10 montre la vitesse moyenne à $t = 4000$ itérations pour chacun des tests effectués. La courbe n'est pas linéaire, elle décroît d'une manière importante en passant de 15 000 véhicules à 45 000 et d'une manière moins importante quand nous passons de 45 000 à 100 000 et à 200 000. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'à partir d'une certaine charge de trafic, le réseau commence à saturer et les vitesses moyennes ne varient plus considérablement.

Influence du nombre de véhicules sur la densité des arcs

Nous avons montré que les véhicules entrant dans la ville du Havre sont susceptibles sous certaines conditions de ralentir considérablement. Il faut en général plus de temps à un véhicule se trouvant pris dans des bouchons en ville qu'à un véhicule

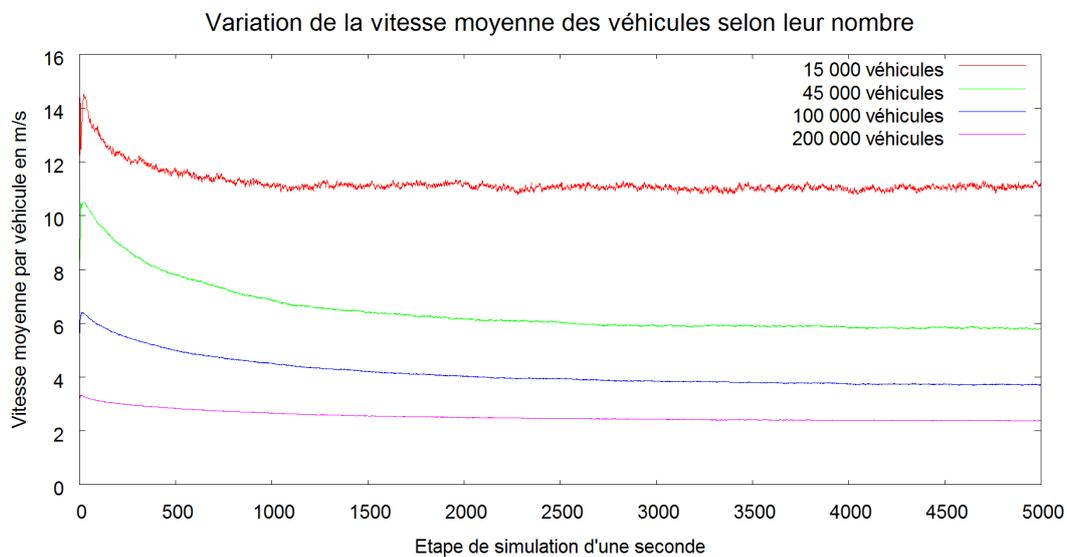


FIGURE 8.9: Comparaison des vitesses moyennes selon le nombre de véhicules sur l'estuaire de la Seine pendant 5000 itérations.

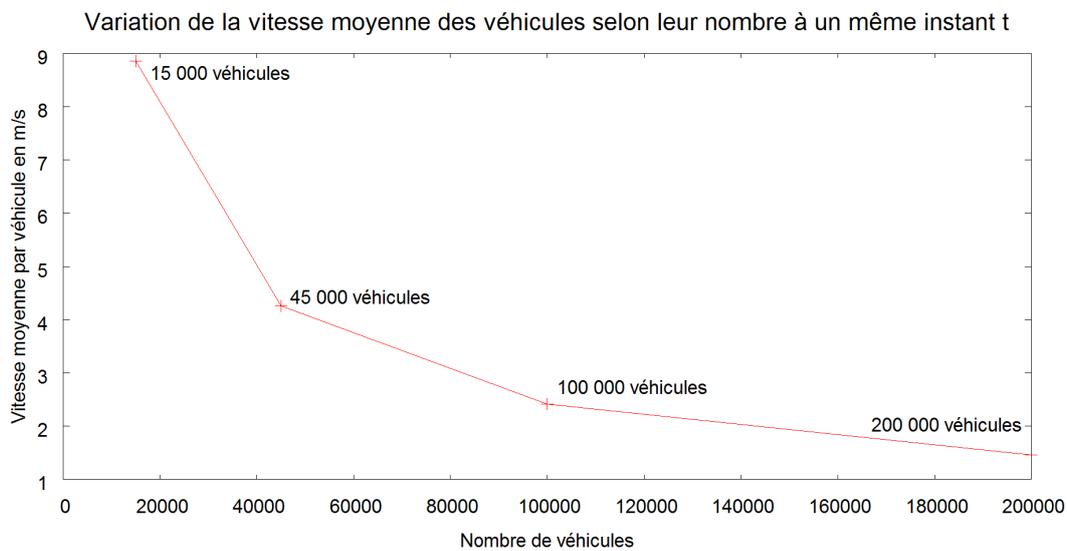


FIGURE 8.10: Comparaison des vitesses moyennes selon le nombre de véhicules sur l'estuaire de la Seine à l'instant $t = 4000$.

sur une voie rapide du périphérique pour atteindre une des sorties de la ville. De plus, la ville du Havre présente une interface importante avec la mer, constituant une raison supplémentaire de contrainte des flux; pour cela, nous identifions des zones plus congestionnées que d'autres dans le multigraphe. Dans ce paragraphe, nous analysons la variation de la densité sur chaque arc par pas de simulation. Un arc de capacité maximale en nombre de véhicules $maxCap$ et d'une charge (nombre de véhicules actuels) c à l'instant t a une densité $d = \frac{c}{maxCap}$ qui varie entre 0 et 1. Nous avons divisé l'intervalle $[0, 1]$ en 5 intervalles et pour chacun de ces intervalles, avons calculé le nombre de véhicules ayant une densité appartenant à cet intervalle. À titre d'exemple, un arc à densité $d = 0.1$ est compté dans l'intervalle $[0, 0.2]$. Nous avons donc calculé les différents niveaux de densité pour les mêmes tests de simulation du paragraphe 8.1.3.

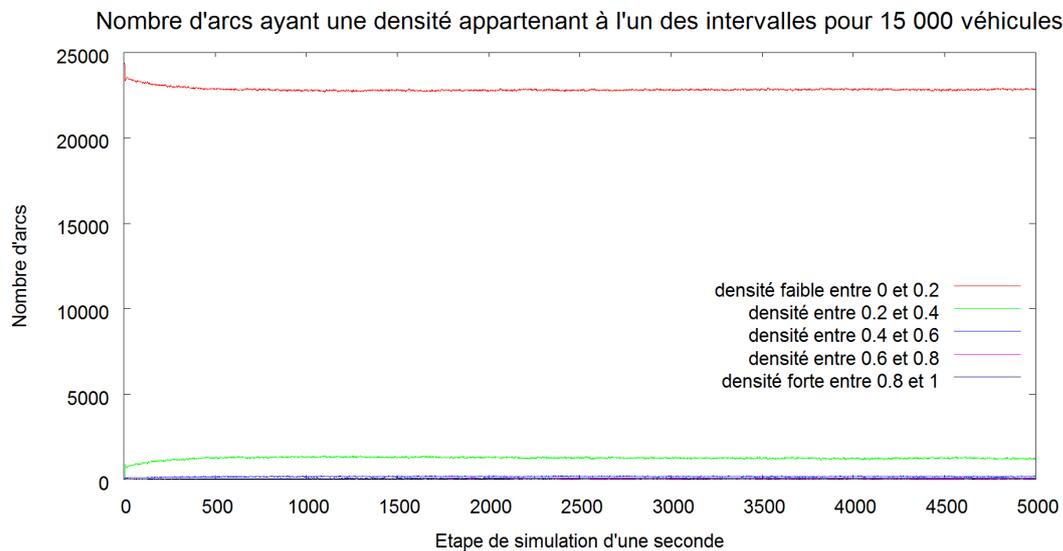


FIGURE 8.11: Nombre d'arcs ayant une densité comprise dans l'un des 5 intervalles fixés.

La figure 8.11 illustre le nombre d'arcs par intervalle de densité pour 15000 véhicules. La courbe en rouge sur la figure représente le nombre d'arcs ayant une densité entre 0 et 0.2. Le fait d'avoir un nombre élevé d'arcs peu encombrés rejoint le résultat obtenu dans la figure 8.2 (pour le même test) montrant une vitesse moyenne élevée des véhicules. Nous obtenons aussi un nombre modeste d'arcs ayant une densité supérieure à 0.4.

En passant à 45 000 véhicules correspondant au deuxième test du paragraphe 8.1.3, nous remarquons une baisse du nombre d'arcs à densité faible et une hausse du nombre d'arcs plus chargés. À l'instant $t = 5000$, le nombre d'arcs à densité faible a diminué de 22846 (cas de 15 000 véhicules) à 19561. À l'inverse, le nombre d'arcs complètement

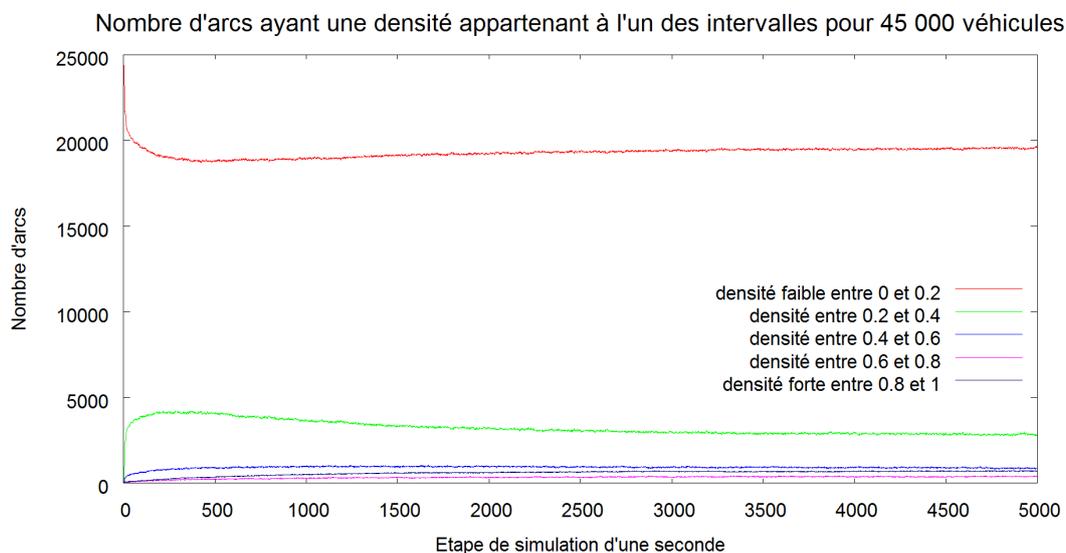


FIGURE 8.12: Nombre d'arcs ayant une densité comprise dans l'un des 5 intervalles fixés.

saturés a augmenté de 66 (cas de 15 000 véhicules) à 710. On remarque aussi une hausse claire des arcs moyennement chargés ($d > 0.2$).

En passant à 100 000 véhicules, nous remarquons une baisse du nombre d'arcs peu chargés par rapport aux tests précédents (15 448). Parallèlement, une hausse du nombre d'arcs à densité élevée est à signaler (2659). Comme pour le passage de 15 000 véhicules à 45 000, le passage de 45 000 véhicules à 100 000 se traduit par une hausse des arcs moyennement chargés.

Comme pour les autres tests, nous remarquons que pour 200 000 véhicules (*cf.* figure 8.14), le nombre d'arcs à faible densité continue à baisser (10 580 arcs à très faible degré) contre une augmentation importante du nombre d'arcs relativement denses (6110 arcs complètement saturés dont 5205 appartenant au Havre). La plupart des arcs peu chargés se trouvent dans le périphérique du Havre et aux alentours de 85% des arcs saturés font partie du réseau routier havrais. Pour mieux comprendre la hausse considérable du nombre d'arcs complètement saturés dans le cas de 200 000 véhicules, nous avons tracé la courbe de densité des arcs de la ville du Havre uniquement et à tout moment de la simulation, le résultat est présenté dans la figure 8.15.

Nous retrouvons le même résultat avec les deux mesures de vitesse moyenne et la densité sur les arcs. Ces deux mesures montrent qu'avec l'augmentation du nombre de véhicules, la densité de certains arcs augmente et les véhicules ralentissent proportionnellement par voie de conséquence.

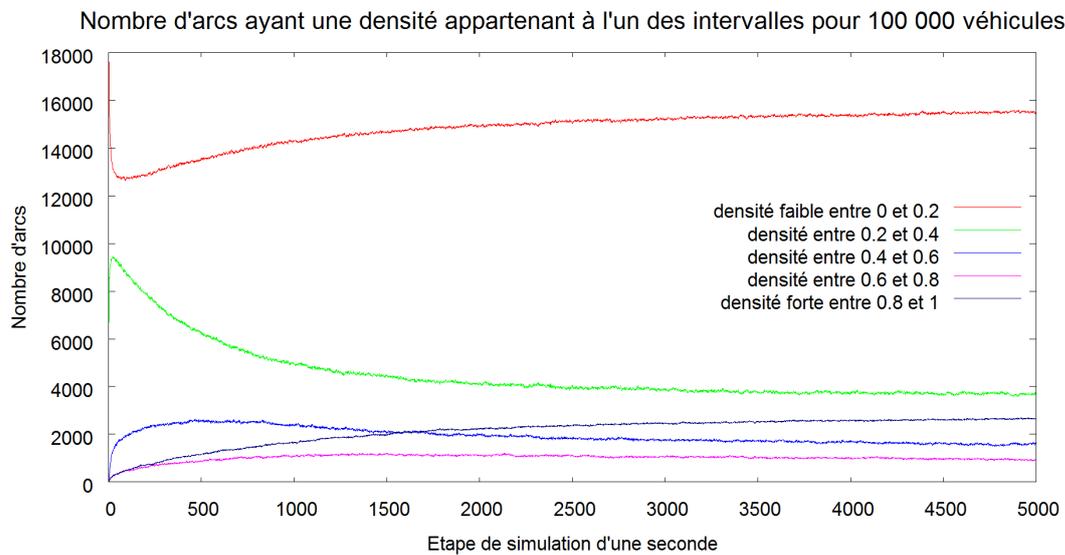


FIGURE 8.13: Nombre d'arcs ayant une densité comprise dans l'un des 5 intervalles fixés.

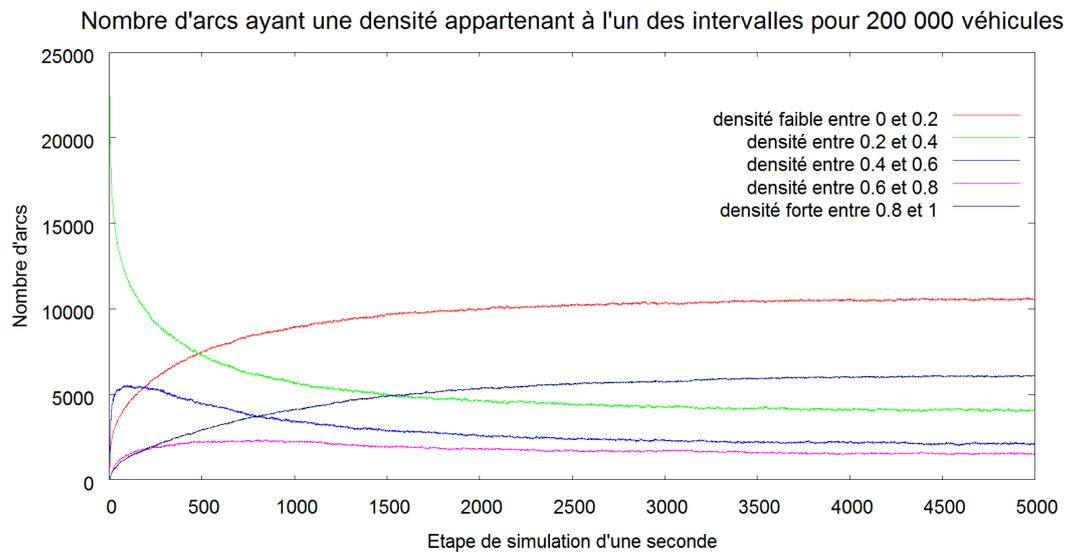


FIGURE 8.14: Nombre d'arcs ayant une densité comprise dans l'un des 5 intervalles fixés.

Influence du nombre de véhicules sur les flux passant par les sommets

Nous avons mentionné dans le chapitre 7 qu'une des caractéristiques importantes des réseaux reste sa structure. Plusieurs outils de mesure peuvent être utilisés dans la

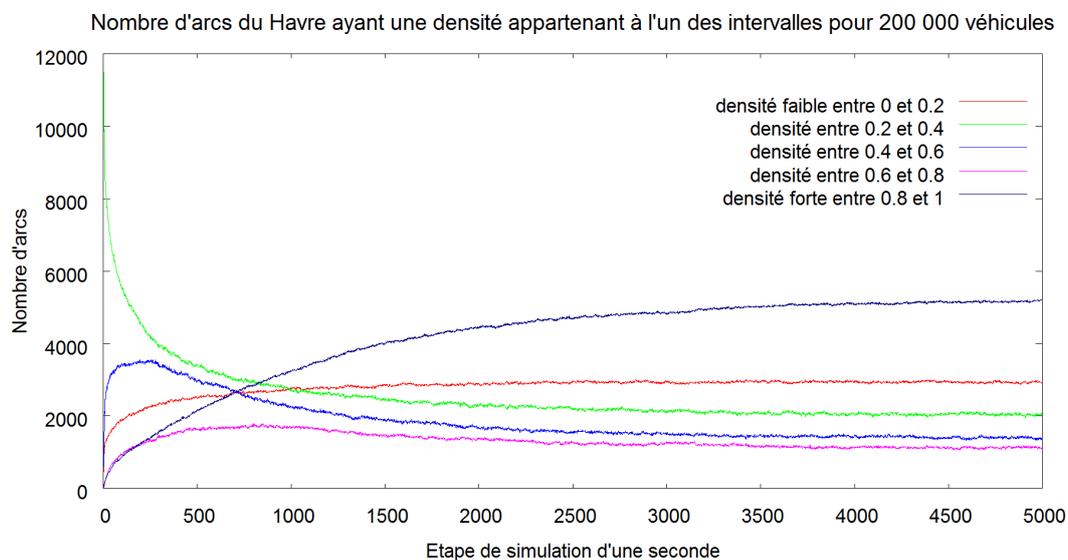


FIGURE 8.15: Nombre d'arcs du Havre ayant une densité comprise dans l'un des 5 intervalles fixés.

théorie des graphes permettant de qualifier la structure d'un réseau. Parmi eux, nous pouvons citer la distribution des degrés des sommets dans un réseau. Elle est cependant insuffisante pour qualifier à elle seule la structure d'un réseau. En général, les réseaux réels d'une ville ou d'une agglomération contiennent des sommets qui sont majoritairement de degré moyen ou faible et peu de sommets sont fortement connectés (courbe en cloche).

La figure 8.16 montre la distribution des degrés de sommets du multigraphe correspondant aux réseaux routiers du Havre, de son périphérique et de l'estuaire de la Seine. Nous rappelons que, pour ce travail, il s'agit d'un multigraphe, par conséquent, plusieurs arcs peuvent coexister entre deux sommets adjacents. Le degré d'un sommet dans cette figure correspond au nombre de sommets adjacents à ce sommet (et pas au nombre d'arcs adjacents). Les sommets du multigraphe ont, en majorité, des degrés entre 1 et 4 et peu de sommets sont de degré élevé (30 sommets de degré 5 et 3 sommets de degré 6). Nous remarquons que les sommets fortement connectés se trouvent majoritairement au Havre alors que ceux peu connectés se trouvent majoritairement au périphérique du Havre.

Dans la figure 8.17, nous traçons le degré de chaque sommet du multigraphe de l'estuaire en prenant en compte la spatialisation. Nous remarquons que la partie sud-ouest du réseau d'étude correspondant à la ville du Havre contient des sommets fortement connectés par rapport au reste du multigraphe. Pour des raisons graphiques, les

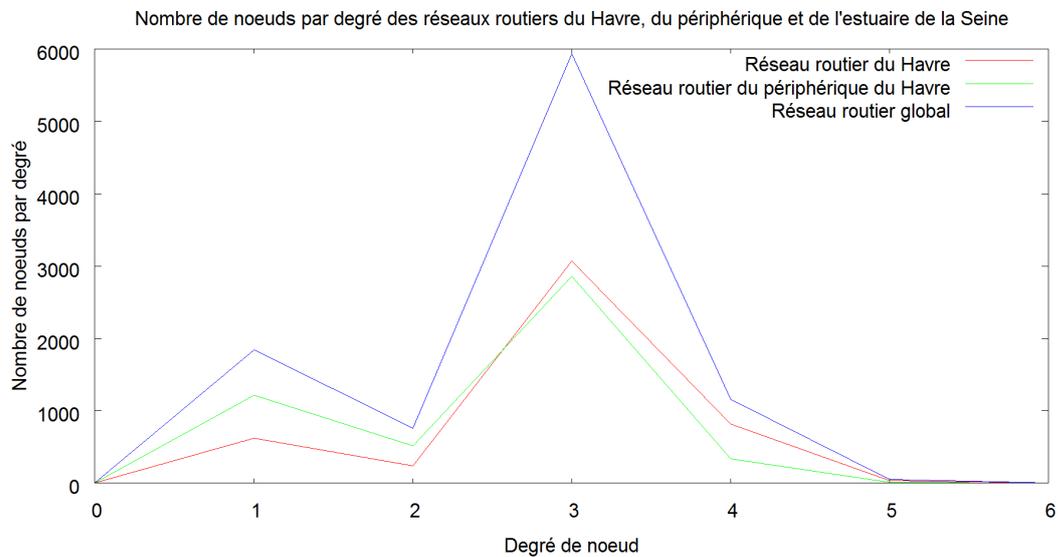


FIGURE 8.16: Distribution des sommets selon leur degré des multigraphes du Havre, du périphérique et de l'estuaire de la Seine.

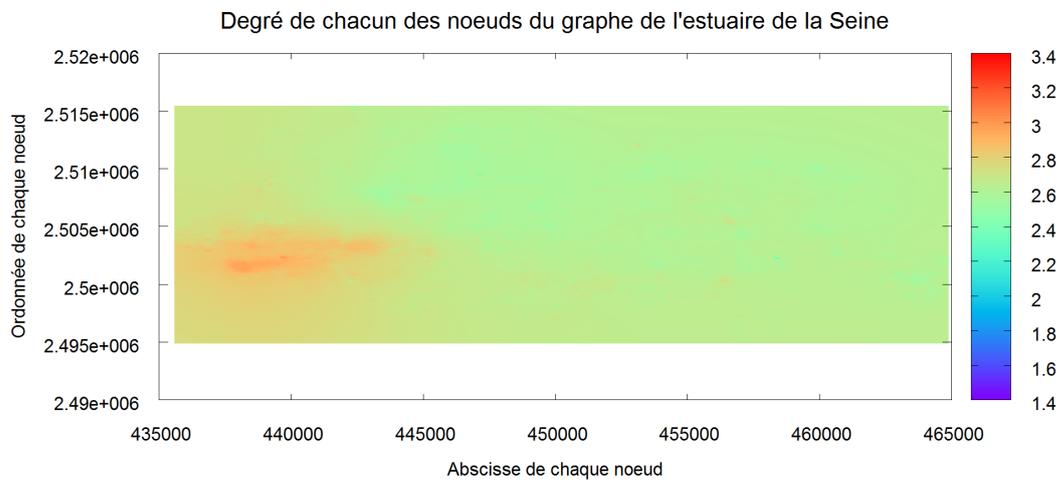


FIGURE 8.17: Degré de chaque sommet du réseau routier de l'estuaire de la Seine. Système de coordonnées : lambert 2 étendu.

sommets fortement connectés situés dans des zones moins denses en sommets n'appa-

raissent pas clairement dans la figure.

En général, les sommets qui sont fortement connectés jouent un rôle central au moins localement dans un multigraphe. Pour confirmer cette hypothèse sur le multigraphe de l'estuaire, nous avons tracé le flux moyen sur 5000 itérations pour chacun des tests de simulation précédemment présentés.

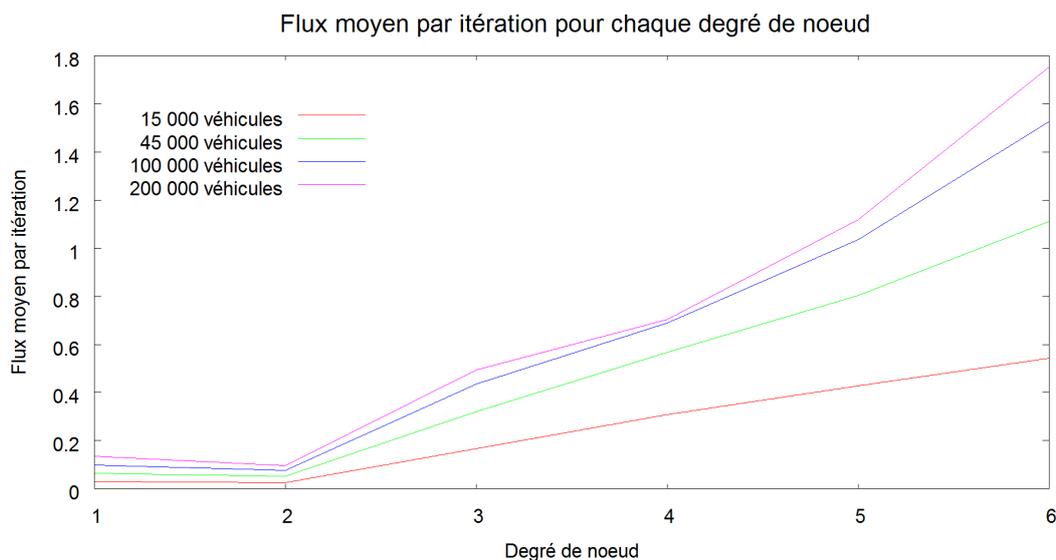


FIGURE 8.18: Flux moyen par degré de sommet selon le nombre de véhicules sur le multigraphe de l'estuaire de la Seine.

La figure 8.18 compare le flux moyen passant par les sommets du multigraphe de l'estuaire de la Seine, classés selon leur degré, et ce pour les quatre tests précédemment présentés. La figure montre clairement que plus un sommet est connecté, plus il est susceptible d'absorber un flux important et plus il joue par conséquent un rôle central au moins au niveau local. La perte d'un sommet central en cas d'accident, de bouchons ou de mouvements de grève peut perturber le trafic d'une manière plus importante que s'il s'agit d'un sommet moins central.

Nous avons aussi calculé pour chaque sommet du multigraphe le flux moyen passant par ce sommet sur 5000 itérations. Le résultat pour 100 000 véhicules est illustré dans la figure 8.19.

Cette figure montre que la zone correspondant aux sommets de la ville du Havre absorbent une quantité importante de trafic par rapport au reste du multigraphe. Par contre, les zones correspondant aux autres communes sont en général moins encombrées. Ceci rejoint les résultats obtenus par la marche aléatoire présentée au chapitre 7.

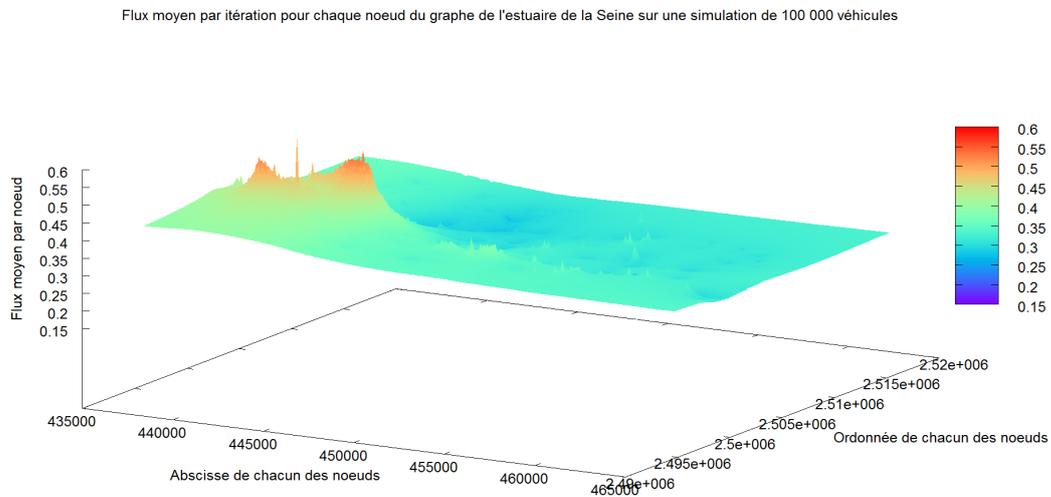


FIGURE 8.19: Flux moyen par sommet pour 100000 véhicules circulant sur le multigraphe de l'estuaire de la Seine. Système de coordonnées : lambert 2 étendu.

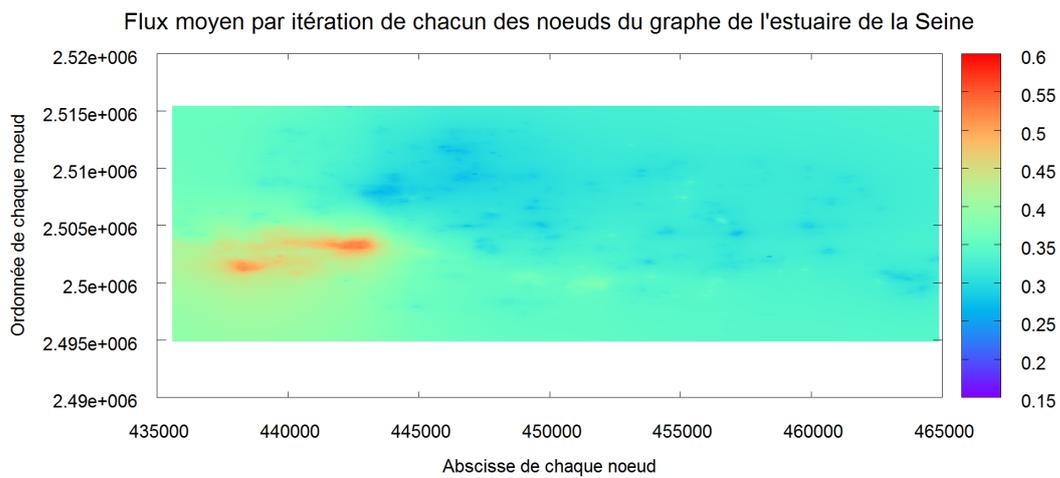


FIGURE 8.20: Flux moyen par sommet pour 100000 véhicules circulant sur le multigraphe de l'estuaire de la Seine. Système de coordonnées : lambert 2 étendu.

Si nous projetons la courbe de la figure 8.19 sur un plan, nous obtenons un résultat qui coïncide avec le résultat obtenu dans la figure 8.17. Notons que pour des limitations graphiques, les valeurs affichées ne reflètent pas exactement celles obtenues. La ville

du Havre contenant des sommets relativement bien connectés absorbe une quantité de trafic importante.

8.2 Validation du modèle

La validation du modèle microscopique proposé passe par l'étude du comportement individuel des véhicules pendant la simulation et ensuite par l'étude du comportement collectif du flux de véhicules.

Le comportement individuel se traduit par le diagramme « espace-temps » montrant l'évolution de la position des véhicules en fonction du temps. Ce diagramme nous permet de suivre un véhicule sur une voie de circulation (figure 8.21).

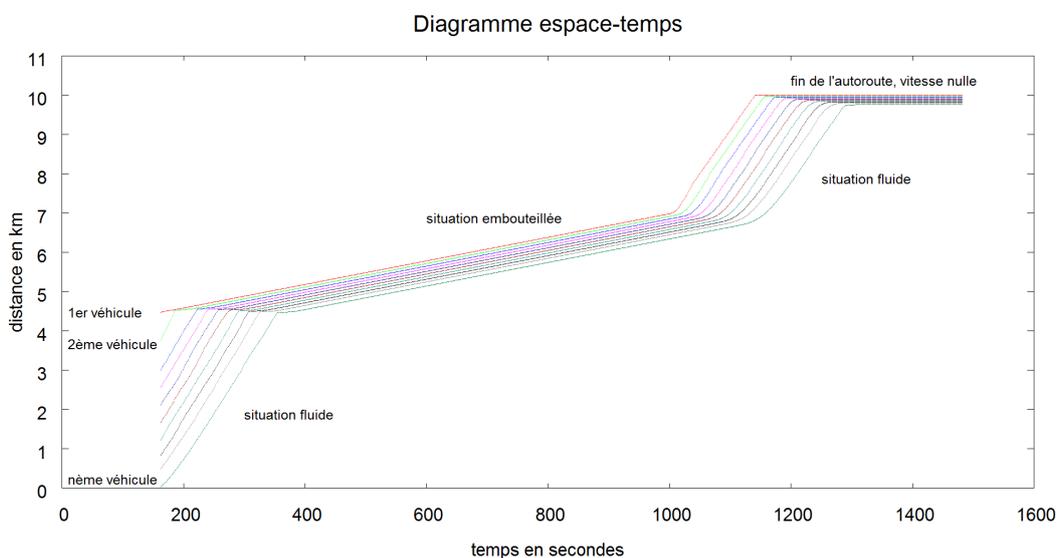


FIGURE 8.21: Diagramme espace-temps.

Dans la figure 8.21, nous distinguons des situations pour lesquelles le trafic est plus ou moins fluide voire immobile. Le trafic est fluide quand il y a peu de perturbations qui ralentissent les véhicules. En revanche, une situation de congestion, due à une perturbation, est provoquée dans cet exemple par un véhicule qui ralentit. Nous pouvons remarquer la propagation de cette perturbation du premier jusqu'au dernier véhicule. Une trajectoire horizontale montre qu'un véhicule est immobile. La situation immobile dans cet exemple est due à la fin de la voie de circulation qui oblige tous les véhicules à freiner avant de s'arrêter.

Afin d'étudier le comportement collectif du flux de véhicules, nous avons tracé le diagramme fondamental (figure 8.22).

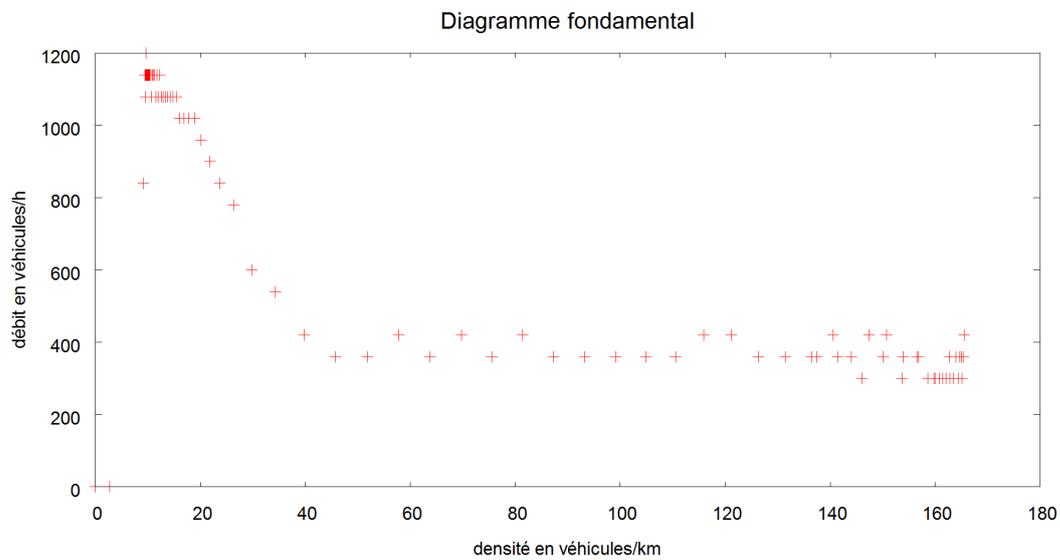


FIGURE 8.22: Diagramme fondamental.

Pour un tronçon d'autoroute, le flux (le nombre total des véhicules traversant le tronçon) a été relevé toutes les 60 secondes et la densité des véhicules ainsi que leur vitesse moyenne ont été calculées. Le diagramme montre que le débit augmente pour atteindre une valeur maximale correspondant à une densité critique avant qu'il ne décroisse avec l'augmentation de la densité. L'interprétation de ce phénomène est déjà décrite dans la figure 8.1.

MODÈLE DE MICRO-ÉVACUATION

9.1	Travaux antérieurs sur la micro-évacuation	186
9.2	Influence de la structure du réseau sur les flux	187
9.2.1	Influence au niveau microscopique	188
9.2.2	Influence au niveau mésoscopique : centralité d'intermédiarité	193
9.2.3	Influence au niveau macroscopique : clustering hiérarchique	198
9.3	Modèle d'évacuation	198
9.3.1	Entrées et sorties du modèle	200
9.3.2	Blocage d'une zone de danger	200
9.3.3	Comportement des véhicules	203
9.4	Résultats de simulation	205
9.4.1	Influence de l'emplacement de la zone	206
9.4.2	Influence de la capacité des liens inter-communautaires	208
9.4.3	Influence des flux à l'extérieur de la communauté	211
9.4.4	Influence de la distance séparant les liens inter-communautaires	212
9.4.5	Influence de la capacité des chemins séparant les liens inter-communautaires	216
9.4.6	Comparaison du temps d'évacuation selon le nombre de sorties	216
9.5	Récapitulatif	219

La gestion des risques passe par la prévention avant même l'occurrence des risques, mais aussi par la gestion de la crise afin de minimiser ses conséquences sur les en-

jeux et particulièrement la population. Les exercices d'évacuation grandeur nature sont indispensables pour former les différents acteurs (secouristes, individus, forces de l'ordre, hôpitaux, ...) et les préparer à affronter une éventuelle catastrophe. Néanmoins, bien que nécessaires au bon déroulement d'une évacuation lors d'une éventuelle catastrophe, les exercices d'évacuation grandeur nature peuvent être très coûteux et manquer éventuellement de réalisme dû en particulier à l'absence du facteur de panique, ce dernier pouvant déclencher des comportements imprévisibles se propageant parmi les évacués lors d'une « vraie » catastrophe, mettant en péril la vie des individus [144]. Afin de combler les difficultés et le manque de réalisme liés aux exercices d'évacuation mais aussi les coûts, on a souvent recours à des méthodes de simulation certes simplistes mais moins coûteuses et permettant de prendre en compte des comportements variés chez les individus interagissant entre eux. Le comportement global du système est analysé et change selon les conditions initiales, mais aussi selon le comportement des évacués et des organisations, les stratégies établies, ... Cela permet d'amener des éléments de réponse aux décideurs lors d'une situation de crise bien que le problème de validation reste ouvert. Dans ce chapitre, nous exposons notre modèle permettant la prévention des risques et le traitement d'évacuations. Il utilise une approche multi-échelle d'analyse de structure dans un réseau d'interaction correspondant au réseau routier. Nous identifions aussi les principaux paramètres influençant le déroulement d'une évacuation.

9.1 Travaux antérieurs sur la micro-évacuation

Les autorités se sont focalisées pendant longtemps sur la réduction des aléas, *i.e.* l'atténuation du risque à la source. Récemment, une attention particulière a été consacrée sur la réduction de la vulnérabilité. Les SIG sont largement utilisés dans l'analyse et la représentation des aléas, de la vulnérabilité et des risques par croisement. Nous avons présenté dans le chapitre 3 une carte d'aléas (figure 3.2), une carte d'enjeux (figure 3.3) et une carte de risques (figure 3.4) appliquées toutes sur le territoire d'étude. Nous avons signalé dans l'introduction du présent chapitre l'importance des modèles de simulation pour tester des stratégies de gestion de crise comme l'évacuation en considérant l'interaction entre les différentes entités. Cela nécessite de représenter l'environnement en utilisant les SIG mais aussi d'intégrer des modèles de dynamique de population. Récemment, des exemples d'application ont été développés, incluant la dynamique de la population, des modèles de croissance urbaine et des modèles d'occupation du sol. Pour les modélisateurs informaticiens, cette intégration fournit la capacité de disposer d'entités informatiques, notamment des agents liés à des endroits géographiques réels. Pour les utilisateurs des SIG, elle fournit la capacité de modéliser l'apparition des phénomènes par de multiples interactions entre des agents dans l'espace et le temps [123]. Beaucoup de chercheurs ont souligné la nécessité de créer les modèles de Systèmes Multi Agents (SMA), qui peuvent exiger la structure de données topologique

fournie dans les SIG [131]. De cette façon, un SMA peut être représenté en faisant co-exister n niveaux d'organisation ou d'échelles auxquels peuvent correspondre plusieurs classes d'agents (ex : niveau 1 : individus, niveau 2 : entreprises, organisations et niveau 3 : villes, collectivités...) [47].

Dans le cadre des micro-évacuations, plusieurs études basées sur la microsimulation ont été développées. Le temps global d'évacuation d'un voisinage en danger est généralement utilisé pour analyser le déroulement des évacuations. De nombreux paramètres entrent en compte dans le calcul du temps d'évacuation. Ainsi, l'effectif de la population, le nombre de véhicules, la capacité des routes et le nombre de véhicules par unité de temps peuvent être considérés [40]. Les parties du réseau routier contraignant le déroulement de l'évacuation peuvent être prises en compte et le modèle peut être couplé avec un SIG [39, 133].

Les travaux de Cova et Church ont ouvert la voie dans ce domaine en proposant un modèle d'évacuation de la population de la ville américaine Santa Barbara [39]. Leur approche s'appuie donc sur un SIG mais aussi sur un clustering de graphe. L'interaction entre les piétons et les occupants des véhicules présente aussi un facteur important pouvant influencer le comportement global du système voire changer sa trajectoire lors d'une évacuation. Ce facteur a été pris en compte dans [163, 165] alors qu'il a été absent dans [133]. Dans la plupart de ces modèles, les évacués ont tendance à choisir les plus courts chemins pour sortir à l'extérieur de la zone de danger [167, 163, 165]. Ceci correspond à une approche pessimiste par précaution, habituellement employée par les décideurs gérant les risques. Le choix des mêmes itinéraires par les évacués s'avère souvent être la réalité, ralentissant l'évacuation et provoquant des bouchons de trafic mettant en péril la vie des individus.

9.2 Influence de la structure du réseau sur les flux

Des entités en interaction engendrent un réseau qui est influencé par ces dernières et qui sont elles-mêmes contraintes par ce même réseau. Nous retrouvons des réseaux de ressources, d'information, des réseaux sociaux ou de transport au travers desquels circulent des flux d'énergie, d'information ou de matière. Les réseaux peuvent être différenciés, entre autres, par leur structure ou par la façon dont les entités sont connectées. Ainsi que nous l'avons exprimé précédemment, les connexions d'un réseau n'ont pas le même ordre d'importance. À titre d'exemple, si on prend le réseau financier inter-capitales, la connexion entre deux capitales mondiales, permettant la circulation de flux financiers considérables, a un ordre d'importance plus grand qu'une connexion entre deux villes moins influentes. La structure d'un réseau peut généralement être représentée par un graphe, le lecteur peut consulter le chapitre 5 pour plus de détails. La théorie des graphes mais aussi des réseaux sociaux sont riches pour amener des éléments qualifiant la structure d'un réseau ou du graphe le représentant. La perte d'une connexion dans un réseau, suite à un accident, peut engendrer des conséquences à un niveau lo-

cal du réseau comme à un niveau plus global selon l'importance de cette connexion. Si nous considérons maintenant un réseau routier représenté par un multigraphe dans ce travail de thèse, la question suivante se pose : comment mesurer la vulnérabilité liée à une connexion et à un nœud d'un réseau au niveau local et à un niveau beaucoup plus global ?

- Au niveau microscopique, nous proposons de mesurer l'importance d'un arc par le coefficient de clustering de ses extrémités et par le détour à faire suite à la perte de cet arc.
- Au niveau mésoscopique, nous mesurons l'importance de chaque sommet par le nombre de plus courts chemins du multigraphe y passant.
- Au niveau macroscopique, nous travaillons sur une représentation agrégée du réseau comme résultat de l'algorithme de clustering hiérarchique présenté dans le chapitre 7 pour mesurer l'importance de chaque arc, surtout quand il s'agit d'évacuer une zone en danger.

9.2.1 Influence au niveau microscopique

Les arcs et les sommets d'un graphe n'ont pas le même ordre d'importance au niveau local. Ainsi, la perte d'un arc ou d'un sommet faisant partie d'une zone fortement connectée, suite à un éventuel accident par exemple, peut être compensée sans provoquer un important détour aux véhicules y passant.

Pour mieux expliquer l'importance locale d'un arc dans un graphe, nous définissons la transitivité dans un graphe orienté.

Définition 3 Un graphe orienté $G = (V, E)$ est dit :

- transitifssi $\forall a, b, \text{ et } c \in V \text{ tels que } \exists (a, b) \in E \text{ et } (b, c) \in E, \text{ alors } \exists (a, c) \in E,$
- intransitifssi $\forall a, b, \text{ et } c \in V \text{ tels que } \exists (a, b) \in E \text{ et } (b, c) \in E, \text{ alors } \nexists (a, c) \in E.$

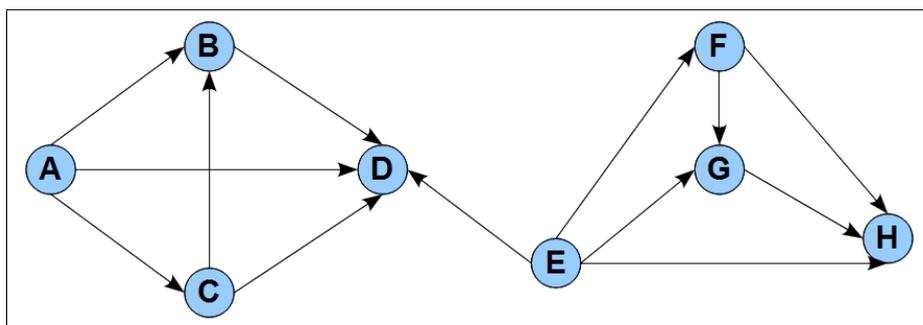


FIGURE 9.1: Graphe transitif.

Ces définitions sont très contraignantes et les réseaux étudiés ne présentent jamais ces caractéristiques strictes mais par contre une tendance locale ou globale vers la transitivité.

Le coefficient de clustering d'un sommet mesure la transitivité locale, il permet donc de mesurer cette tendance :

$$(9.1) \quad C_r = \frac{2 * E_v}{d_v * (d_v - 1)}, v \in V$$

E_v est le nombre d'arêtes entre les voisins de v et d_v est le nombre de sommets incidents à v .

Ainsi, le coefficient de clustering d'un graphe peut être défini comme suit.

Définition 4 *Le coefficient de clustering d'un sommet est vu comme la probabilité moyenne que deux sommets incidents de ce sommet soient adjacents. Le coefficient de clustering d'un graphe ou d'un sous-graphe peut également être calculé à partir de la moyenne des coefficients des sommets du graphe considérés.*

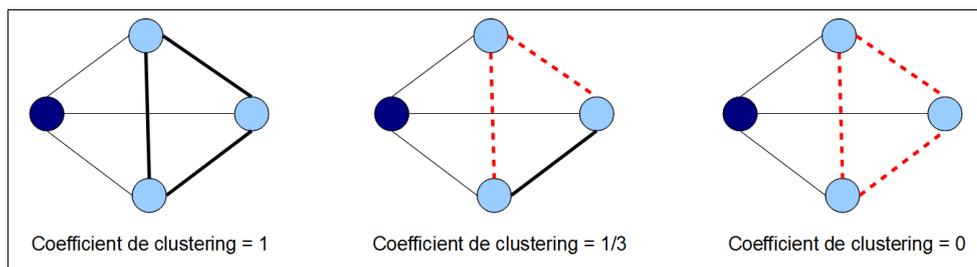


FIGURE 9.2: Exemple de coefficient de clustering local sur un graphe non orienté pour le sommet en bleu foncé.

Le coefficient de clustering local du sommet en bleu foncé de la figure 9.2 est calculé comme la proportion d'arrêtes entre ses sommets voisins, par rapport au nombre de toutes les connexions possibles. Le sommet en bleu foncé a trois voisins pouvant donc avoir un maximum de trois connexions entre eux. Dans la partie gauche de la figure, les trois connexions possibles existent (connexions en noir épais), ce qui donne un coefficient de clustering de 1. Dans la partie médiane de la figure, une seule arête existe (connexion noire épaisse) et deux connexions manquent (pointillés rouges), donnant un coefficient de 1/3. Enfin, dans la partie droite de la figure, aucune des connexions possibles entre les voisins du sommet bleu foncé n'existe, produisant ainsi une valeur de coefficient de clustering nulle.

Un coefficient de clustering proche de 1 caractérise alors une trame viaire très riche et donc robuste. À l'inverse, lorsque ce même coefficient est très faible, la trame est

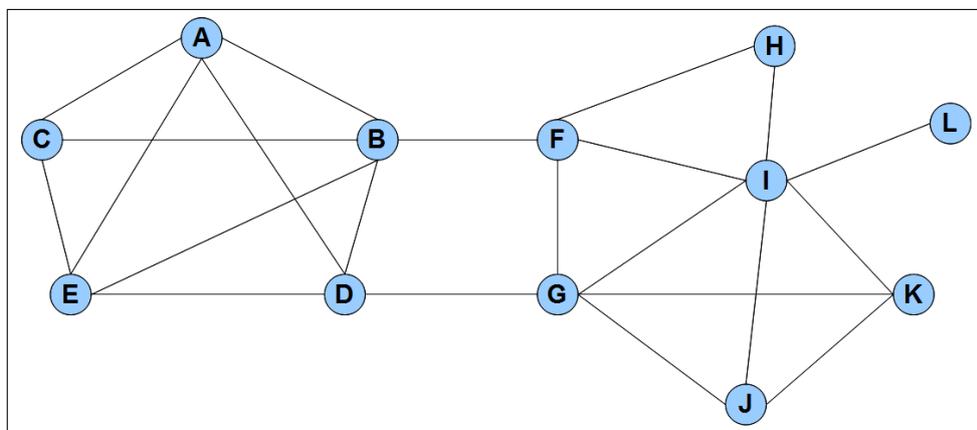


FIGURE 9.3: Exemple d'un graphe dont nous cherchons à calculer le coefficient de clustering.

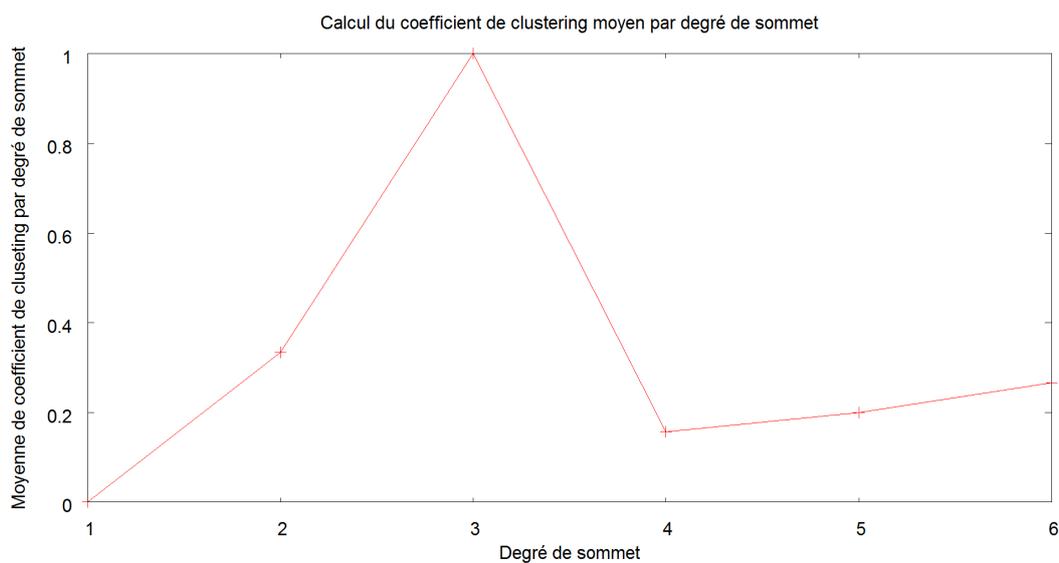


FIGURE 9.4: Coefficient de clustering moyen par degré de sommet de l'exemple présenté dans la figure 9.3.

pauvre et fragile. La figure 9.4 illustre le calcul de la moyenne du coefficient de clustering des sommets de la figure 9.3. Les sommets de degré 3 de la figure (C, J et K) ont tous un coefficient de clustering de 1. Par contre, le sommet L de degré 1 a un coefficient de clustering de 0. Par conséquent, le dysfonctionnement éventuel de l'arête (L, I) ne peut pas être compensé. À l'inverse, la perte de l'arête (E, C) par exemple peut être

compensée en empruntant (E, A) et (A, C) .

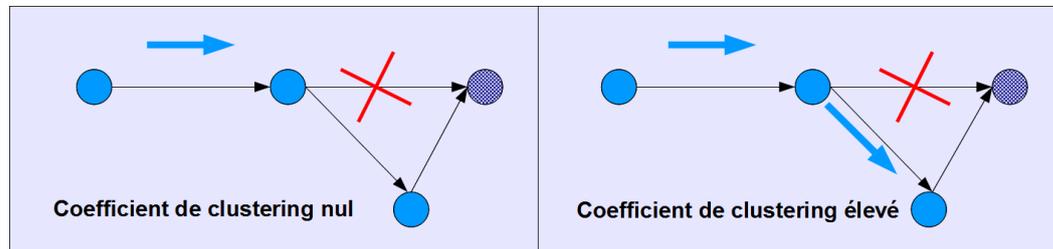


FIGURE 9.5: Exemple de l'influence locale d'un accident.

Une méthode de mesure de l'importance d'un arc consiste donc à calculer le coefficient de clustering de ses deux extrémités. Ainsi, comme le montre la figure 9.5, la perte d'un arc n'a pas le même effet dans la partie gauche que dans la partie droite de la figure ; le coefficient de clustering du sommet hachuré vaut 0 dans la partie gauche et 1 dans la partie droite de la figure 9.5. La perte de cet arc dépend donc fortement du coefficient de clustering du sommet destination de cet arc.

La perte d'un arc peut induire des détours importants à un niveau local comme à un niveau plus global, surtout si cet arc constitue un lieu de passage incontournable. En effet, nous avons développé une méthode permettant de quantifier le détour à faire suite à la perte éventuelle d'un arc (i, j) . Elle consiste à énumérer les chemins allant de i à j sans passer par (i, j) . Pour limiter le calcul à un niveau local, nous calculons le nombre de chemins n pour aller de i à j dont la taille en nombre d'arcs est plus petit qu'un entier positif k . Ces chemins correspondent aux détours que doivent faire les véhicules voulant emprunter (i, j) . Ce dernier est d'autant plus vulnérable que le nombre de détours possibles est petit. Nous proposons donc de calculer la vulnérabilité $v_{i,j}$ de (i, j) comme suit : $v_{i,j} = 1/(n + 1)$. La vulnérabilité prend donc des valeurs entre 0 et 1. Ainsi, si aucun chemin n'existe entre i et j dont la taille en nombre d'arcs est $< k$ ($n = 0$), la vulnérabilité $v_{i,j}$ prendra 1 comme valeur (vulnérabilité maximale).

La figure 9.6 représente les arcs du multigraphe représentant le territoire d'étude selon la valeur de leur vulnérabilité au niveau microscopique. La vulnérabilité est de plus en plus importante en passant du vert jusqu'au rouge, l'échelle des couleurs étant géométrique. Nous remarquons que la vulnérabilité des arcs du centre-ville du Havre est moins forte des arcs ailleurs grâce à sa structure maillée régulière ; la perte d'un arc peut être compensée dans une zone qui est fortement connectée. Comme le montre la figure 9.7, le coefficient de clustering par degré de sommet moyen est beaucoup plus élevé pour le sous-graphe correspondant au centre-ville du Havre comparé au coefficient de clustering sur le reste du graphe de l'estuaire de la Seine.



192 FIGURE 9.6: Vulnérabilité des arcs à un niveau local en fonction d'une taille de détour donnée (ici $k = 4$).

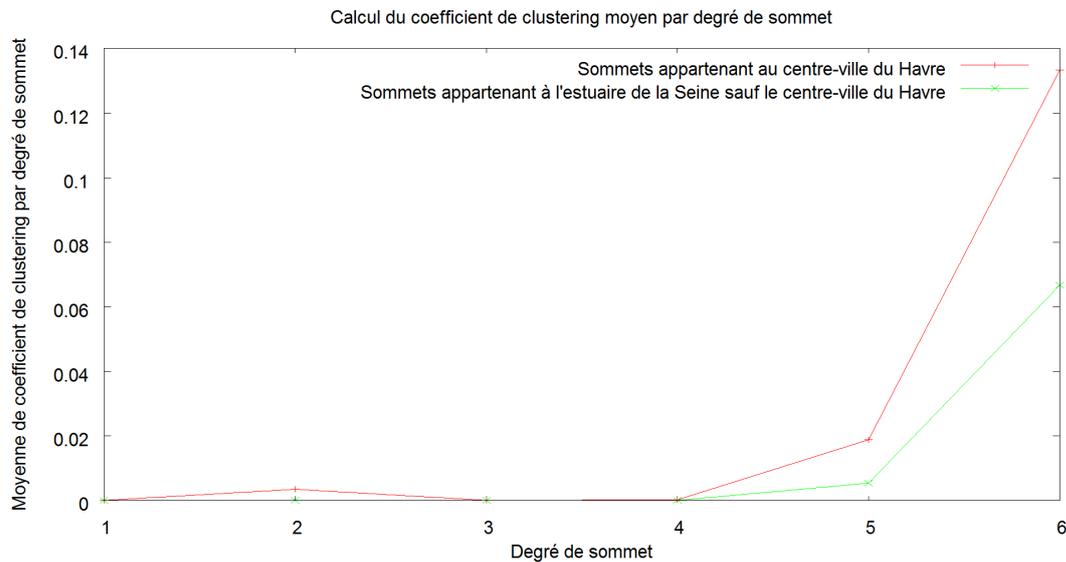


FIGURE 9.7: Coefficient de clustering moyen par degré de sommet sur le centre-ville du Havre et sur l'ensemble de l'estuaire de la Seine.

9.2.2 Influence au niveau mésoscopique : centralité d'intermédiarité

Le plus court chemin en temps ou en distance constitue l'une des stratégies les plus utilisées pour le choix des itinéraires par les automobilistes. Vue de cet angle, l'importance d'un sommet ou d'un arc dépend du nombre de plus courts chemins y passant. En effet, nous avons calculé la centralité d'intermédiarité qu'on a adaptée au multi-graphe [75, 76]. Dans un contexte sociologique, la centralité d'intermédiarité défend l'idée qu'un individu peut servir d'intermédiaire dans un nombre important d'échanges entre les autres membres d'un groupe même s'il est éventuellement peu connecté aux autres et relativement éloigné. S'agissant d'un graphe, elle peut être définie comme suit :

Définition 5 La centralité d'intermédiarité pour un sommet d'un graphe consiste à calculer le nombre de chemins minimaux y passant. Formellement, pour un graphe $G = (V, E)$, la centralité d'intermédiarité d'un sommet v , $c_v = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}}$, où σ_{st} est le nombre de plus courts chemins entre s et t et $\sigma_{st}(v)$ est le nombre de plus courts chemins entre s et t passant par v .

La méthode utilisée est celle proposée par Brandes dans [25, 26], consistant à calculer d'une manière optimisée les plus courts chemins (en temps dans notre travail) entre chaque paire de sommets. La centralité d'un sommet correspond au nombre de plus

courts chemins y passant. Le même algorithme peut être utilisé pour calculer la centralité d'intermédiarité des arcs.

La figure 9.8 montre les sommets du multigraphe de l'estuaire de la Seine selon leur valeur de centralité. Les sommets sont colorés en utilisant une graduation allant du noir (centralité minimale) au rouge (centralité maximale) passant par le vert et le bleu. Nous proposons de calculer la centralité d'un ensemble de sommets faisant partie d'une même zone comme étant la moyenne de la centralité de tous les sommets de l'ensemble. La centralité du multigraphe entier devient la moyenne de la centralité de tous les sommets du multigraphe. Ainsi, nous pouvons quantifier la perte d'une zone du multigraphe comme la différence entre la centralité totale du multigraphe avec et sans les sommets de la zone. La perte peut être quantifiée sur le multigraphe entier mais aussi à un niveau plus local (ville du Havre par exemple).

Cas d'application à la Brecque

Si on normalise la centralité sur les sommets, la centralité prend donc une valeur entre 0 et 1. Maintenant, si on supprime la partie du graphe correspondant à l'entrée du Havre, la différence de la centralité des sommets avec et sans la Brecque¹ vaut 170. Si on supprime d'autres parties du multigraphe de même taille que la Brecque et on calcule la moyenne de la perte de la centralité des sommets, on obtient une différence de 35. Ceci explique que la perte de la Brecque cause une perturbation importante dans le multigraphe et peut provoquer des détours importants si la plupart des automobilistes suivent des plus courts chemins en temps pour leurs déplacements. La figure 9.9 illustre la centralité des sommets du multigraphe de l'estuaire après avoir supprimé la Brecque. Les plus courts chemins passant par la Brecque avant sa suppression sont modifiés et passent par les sommets se trouvant à la frontière sud et nord de la Brecque après sa suppression. Nous remarquons aussi que les sommets des autoroutes A131 et A29 sont moins marqués car les plus courts chemins entre ces autoroutes et la ville du Havre passaient principalement par la Brecque avant sa suppression. Nous proposons une mesure prenant une valeur entre 0 et 1 pour désigner l'effet de la perte d'une partie d'un graphe ou d'un multigraphe, permettant de comparer l'importance d'une zone par rapport à une autre. Pour chaque sommet i du graphe (ou du multigraphe) de centralité c_i avant la suppression d'une zone et c'_i après sa suppression, la perte P se calcule selon l'équation 9.2.

$$(9.2) \quad P = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|c_i - c'_i|}{\max(c_i, c'_i)} \right)}{n}$$

1. L'échangeur de La Breque correspond à l'entrée principale du Havre dont observe des bouchons de trafic lors des heures de pointe.

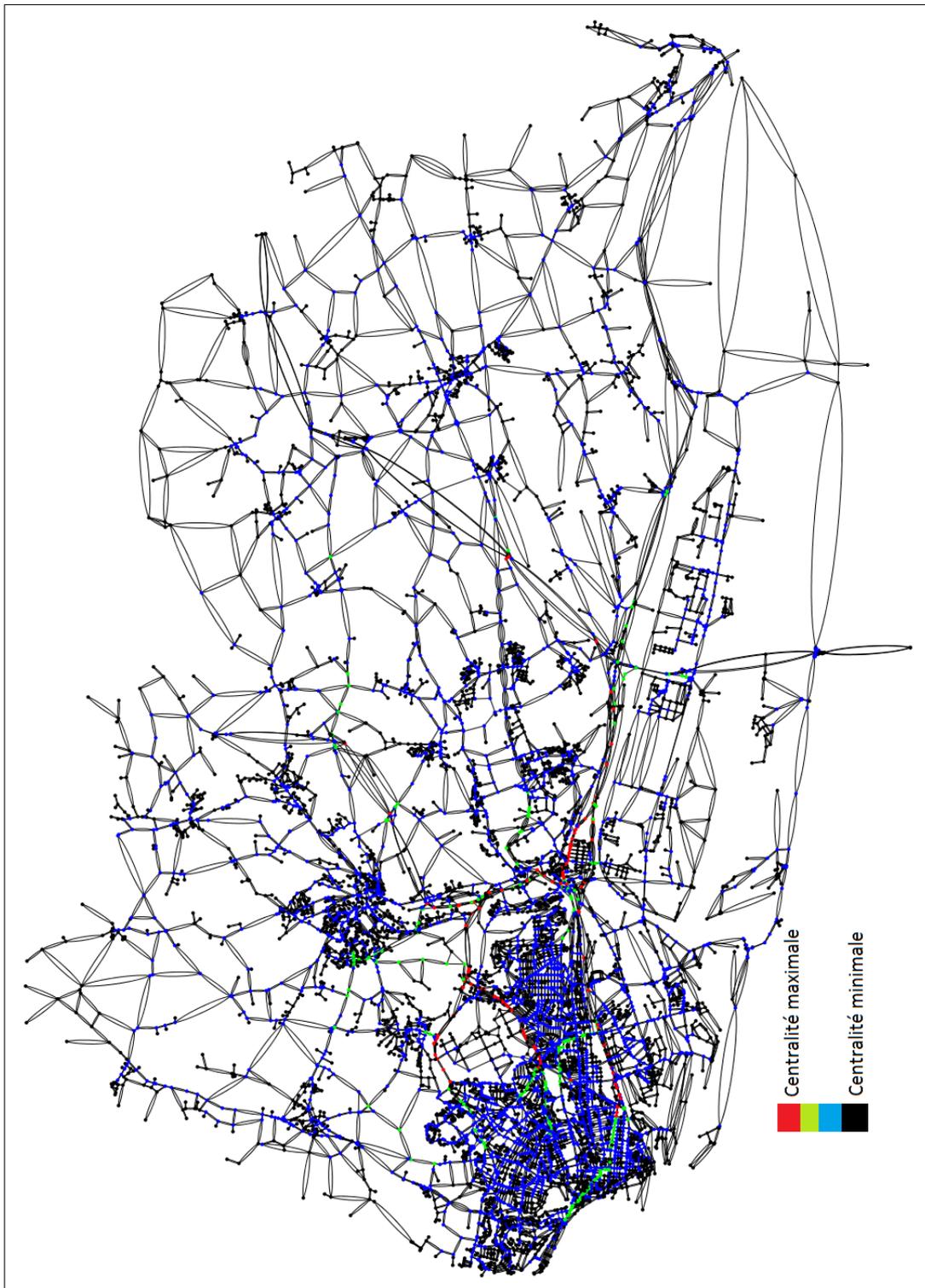
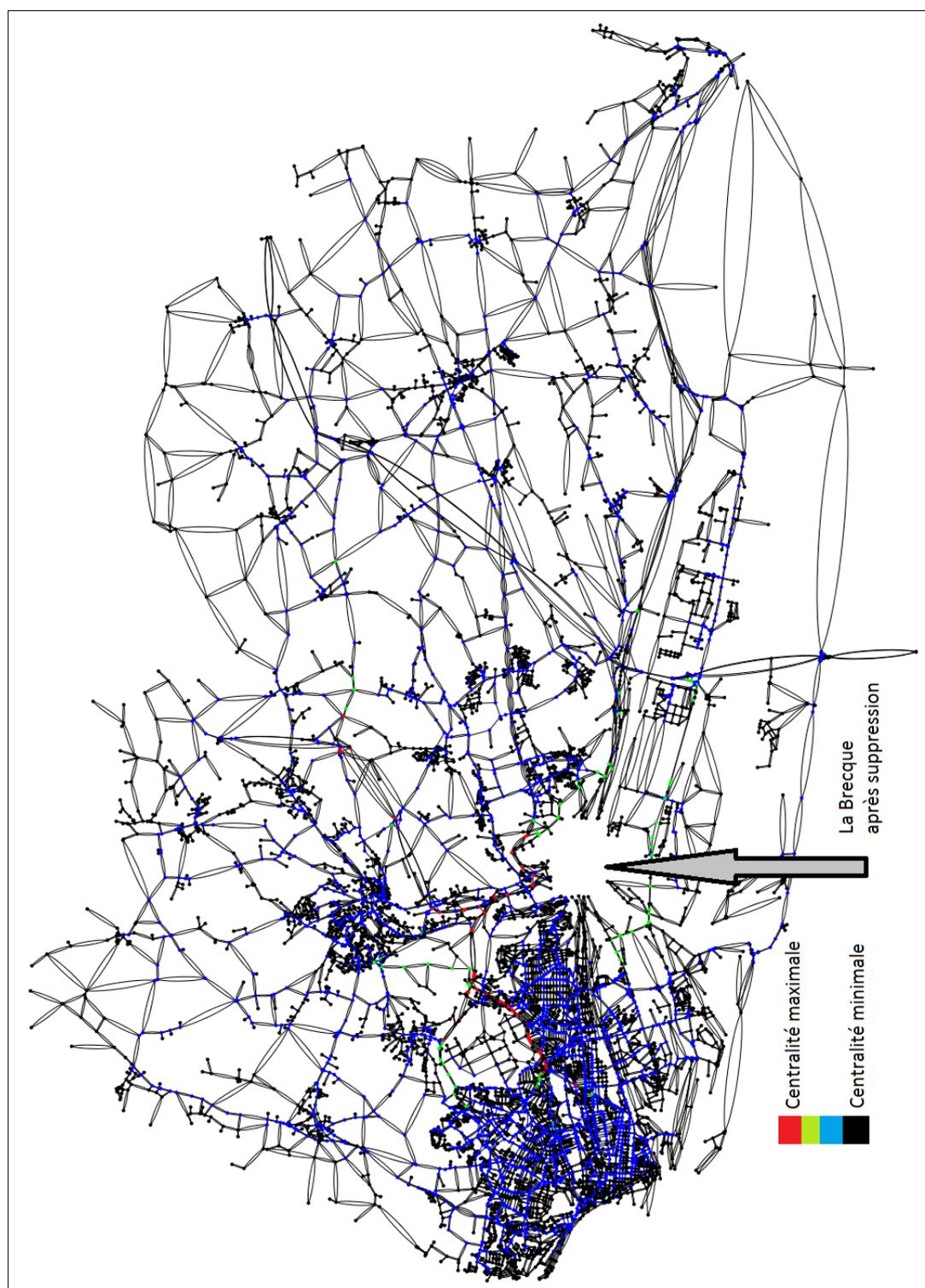


FIGURE 9.8: Application de l'algorithme de centralité d'intermédialité sur le multigraphe de l'estuaire de la Seine. L'échelle de passage d'une couleur à une autre est géométrique.



196 FIGURE 9.9: Application de l'algorithme de centralité d'intermédiarité sur le multigraphe de l'estuaire de la Seine après avoir supprimé l'entrée principale nommée la Brecque. L'échelle de passage d'une couleur à une autre est géométrique.

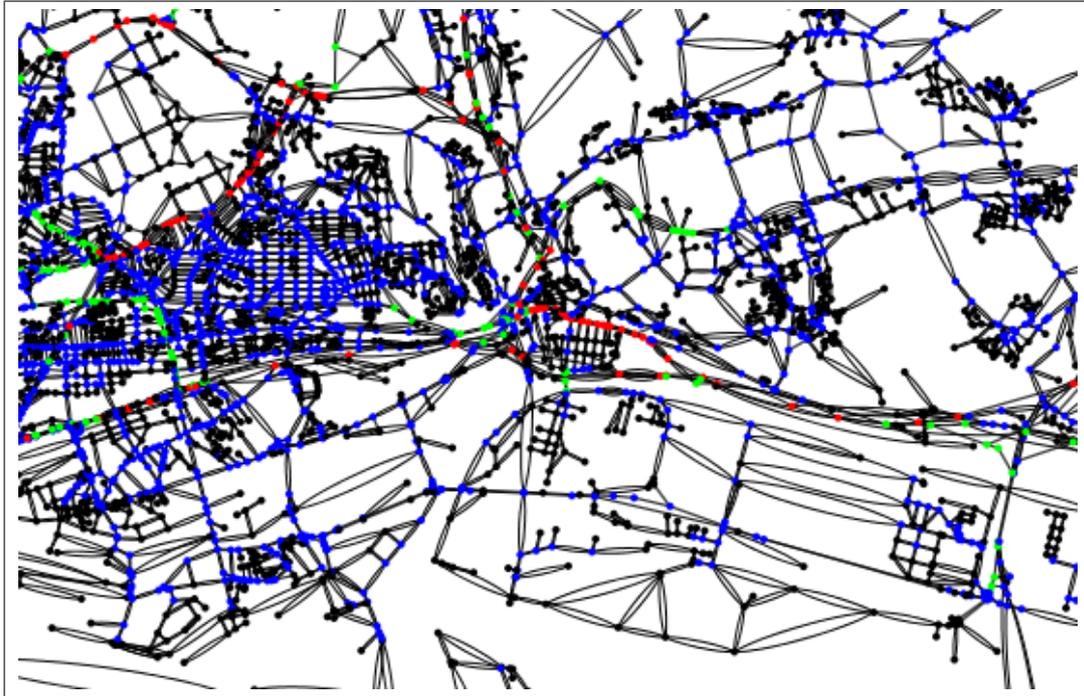


FIGURE 9.10: Zoom sur la Brecque et son entourage de la figure 9.8 avant sa suppression.

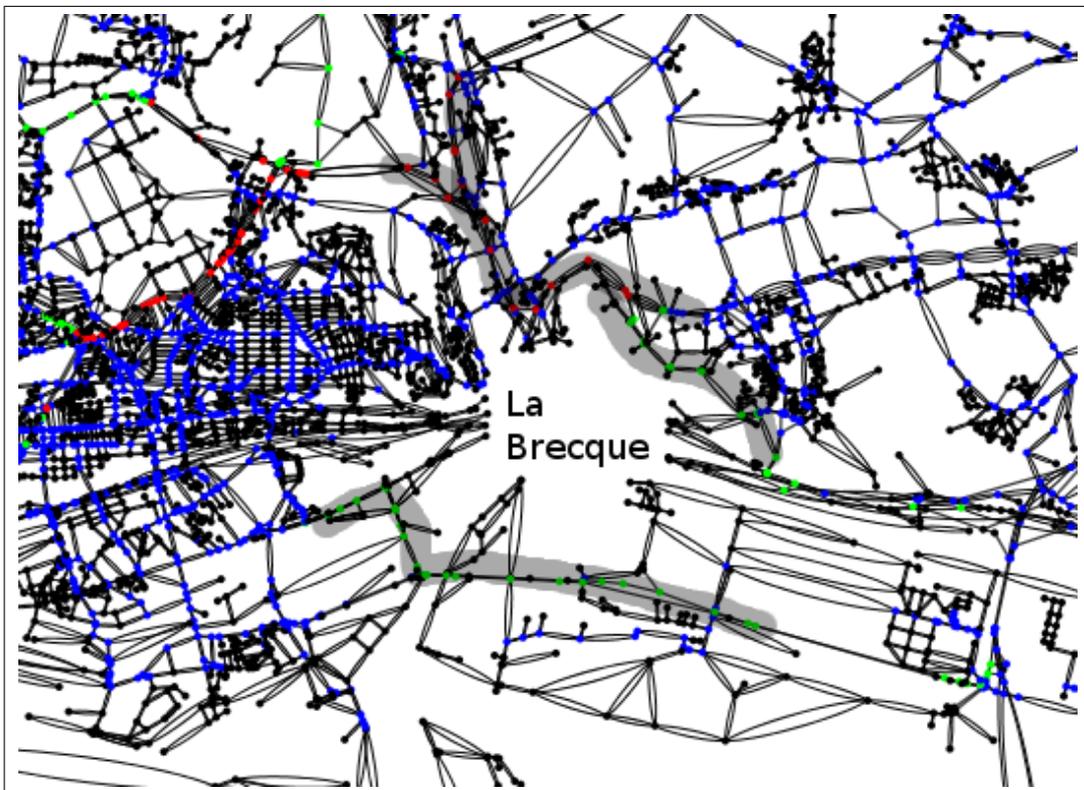


FIGURE 9.11: Zoom sur la Brecque et son entourage de la figure 9.9 après sa suppression. Les parties en bas et en haut de La Brecque mises en évidence sont plus marquées que dans la figure 9.10. Les plus courts chemins passent d'un côté et de l'autre de la Brecque après sa suppression.

n est le nombre de sommets, nous obtenons ainsi une valeur entre 0 et 1. La suppression de la Brecque coûte 0.4 contre 0.07 pour la moyenne de la perte en supprimant d'autres parties du graphe de taille équivalente à la Brecque. Le changement de centralité avant et après la suppression de la Brecque est mis en évidence dans les figures 9.10 et 9.11.

9.2.3 Influence au niveau macroscopique : clustering hiérarchique

Un lien du réseau se trouvant dans une zone fortement connectée peut être compensé en cas d'accident bloquant l'accès à ce lien, d'où l'idée de détecter les zones du réseau fortement connectées à l'intérieur, mais faiblement connectées avec le reste du réseau. En effet, nous avons développé un algorithme de détection de communautés par clustering hiérarchique identifiant des communautés dans un graphe (ou un multigraphe). Les liens inter-communautaires sont vulnérables du fait que leur perte peut provoquer des détours importants puisqu'ils ne se situent pas dans des zones fortement connectées. Plus de détails sur la méthode de clustering hiérarchique utilisée ont été développés dans le chapitre 7. Nous mesurons ci-après l'effet de la perte d'un arc sur le déroulement d'une évacuation.

9.3 Modèle d'évacuation

Nous nous intéressons particulièrement dans ce travail de thèse aux situations de crise nécessitant une évacuation. Cette dernière s'effectue principalement via le réseau viaire et particulièrement en empruntant le réseau routier. Les aspects « prévention des risques » et « gestion des crises » doivent être complémentaires. La structure du réseau contraint son fonctionnement et joue un rôle important influençant la fluidité des flux, en situation normale de trafic comme lors d'une crise. Après avoir exposé la partie liée à la structure du réseau et proposé de mesurer la vulnérabilité des connexions et des nœuds du réseau à différents niveaux d'échelle, nous proposons un modèle d'évacuation tenant compte de la structure du réseau mais aussi du comportement des évacués et des forces de l'ordre. Ce modèle est générique et peut s'appliquer sur un graphe indépendamment de sa structure. Avant de détailler les différentes étapes suivies lors d'une évacuation, nous précisons que le modèle en son état actuel ne tient pas compte de la nature du danger et n'intervient pas dans la décision d'évacuation ou de confinement, cette décision est prise par les décideurs pour l'instant. Une extension du modèle est envisagée afin d'aider les décideurs dans leur choix d'évacuation ou de confinement. Nous supposons aussi que la population se trouvant dans un endroit exposé à un risque est informée lors de l'occurrence du risque, les individus se trouvant en dehors de la zone peuvent ne pas être informés du risque. En effet, les autorités peuvent disposer de moyens suffisants pour alerter la population affectée par un danger en utilisant des sirènes, les radios, le « Call Broadcasting », des véhicules mobiles, la diffusion de SMS

voire même la diffusion de messages de proche en proche par des technologies WIFI ou BLUETOOTH n'utilisant pas d'infrastructures de communication [74] ...

Dans un premier temps, nous proposons de présenter le déroulement d'une évacuation en supposant qu'il n'y a aucune perturbation se produisant lors de l'évacuation. Ensuite, nous présentons le déroulement d'une évacuation en présence d'un accident qui se produit sur un lien vulnérable, permettant de valider l'hypothèse précédemment annoncée.

Nous avons établi notre modèle qui prend en compte les aspects suivants suite à l'occurrence d'un risque² :

- Déterminer la zone de danger et définir son périmètre.
- Envoyer les forces de l'ordre vers des nœuds stratégiques en dehors du périmètre de la zone pour empêcher les individus se trouvant à l'extérieur de la zone de rentrer à l'intérieur de la zone et pour guider les évacués vers l'extérieur de la zone. Il s'agit d'une étape très importante dans l'organisation de l'évacuation car des expériences passées nous ont appris qu'une partie d'individus tentent de rentrer à l'intérieur de la zone pour diverses raisons, allant de la récupération des enfants à l'école à la vérification de l'état de leurs biens ou par ignorance de la situation ...
- Alors que les véhicules se trouvant en sécurité (en dehors de la zone de danger) peuvent continuer à se comporter et à se déplacer normalement selon le modèle de trafic présenté dans le chapitre 8, les véhicules se trouvant dans la zone de danger se déplacent vers la sortie la plus proche de la zone. Nous supposons que cette information est communiquée par les autorités et que la plupart des automobilistes ont une connaissance globale de leur territoire.
- Un véhicule qui atteint l'une des sorties de la zone sera guidé par les forces de l'ordre vers l'extérieur de la zone.
- Si un accident se produit lors de l'évacuation et qu'une ou plusieurs routes sont bouchées par conséquent, les véhicules recalculent un chemin vers une autre sortie.
- L'évacuation se termine quand tous les véhicules auront évacués la zone. Le temps global d'une évacuation correspond au moment de sortie du dernier véhicule. Des véhicules peuvent rester coincés dans la zone pour plusieurs raisons (accident par exemple).

Nous décrivons par la suite chacune des étapes à suivre lors d'une évacuation, avec ou sans accidents, avant de valider notre approche liée à l'influence de la structure sur les flux. Nous définissons d'abord les principales entrées et sorties du modèle.

2. Une discussion a été menée en 2009 avec M. Gratien Le Darz, un ancien commandant de police ayant participé à l'organisation des plans de trafic et de gestion du mouvement de foule lors des événements et des manifestations (match de football, feu d'artifice, Armada, présence d'un incendie, ...) mais aussi à des évacuations grandeurs nature. Cette discussion nous a permis de définir les principales étapes à suivre pour s'assurer du bon déroulement d'une évacuation.

9.3.1 Entrées et sorties du modèle

Comme nous l'avons exprimé précédemment, notre modèle fonctionne en situation normale comme en situation de crise nécessitant une évacuation. Le minimum requis pour lancer la simulation est de préciser l'environnement correspondant à un graphe (ou un multigraphe) et le nombre de véhicules circulant dans l'environnement. Le graphe peut être défini par l'utilisateur ou généré automatiquement par le système, nous pensons en particulier aux graphes aléatoires (Erdős et Rényi [64]), aux graphes petit monde [96] ... L'environnement peut aussi correspondre à une couche de points et une couche de tronçons de format géographique *shapefile* qui est l'un des formats lus par les différents SIG existants. Dans ce cas, les informations nécessaires sont extraites de ces fichiers géographiques afin de construire un graphe (ou un multigraphe). La zone à évacuer peut être sélectionnée manuellement par l'utilisateur, mais peut correspondre à une communauté aléatoire ou définie comme faisant partie des communautés détectées par l'algorithme de clustering hiérarchique proposé dans le chapitre 7. La zone peut aussi correspondre à un *shapefile* représentant un nuage toxique généré par un logiciel comme SAFER présenté dans le chapitre 3 ou un autre logiciel de modélisation d'accidents basés sur une plate-forme SIG.

La sortie du modèle correspond à l'évaluation de la stratégie d'évacuation une fois que celle-ci est terminée. L'objectif principal est d'évacuer une zone de danger le plus rapidement possible, le temps global de l'évacuation constitue donc le facteur le plus important pour évaluer la stratégie d'évacuation. À un niveau plus local, d'autres facteurs peuvent être pris en compte comme le détour à faire par un véhicule suite à un événement inattendu lors d'une évacuation, nous pensons par exemple à une route bloquée faisant partie d'un chemin menant vers une sortie, obligeant le véhicule à recalculer un chemin vers une autre sortie, ce qui peut être coûteux.

Suite à la définition d'une zone de danger par l'une des méthodes décrites ci-dessus, la deuxième étape consiste à bloquer l'accès vers la zone. Nous présentons ci-après l'algorithme permettant de le faire.

9.3.2 Blocage d'une zone de danger

À notre connaissance, les méthodes actuelles suivies par les autorités françaises pour encercler une zone de danger se basent sur des expertises prenant en compte un rayon de sécurité autour de la zone.

Dans ce travail, nous proposons une méthode permettant d'encercler une zone de danger en optimisant le nombre de points stratégiques vers lesquels il faut envoyer les forces de l'ordre, la figure 9.12 est un exemple. La zone de danger contient des arcs de couleur rouge. Les points stratégiques sont ceux en jaune. Ils sont très importants dans le sens où ils se situent en dehors de la zone de danger mais constituent des lieux de passage obligatoire entre l'extérieur et l'intérieur de la zone.

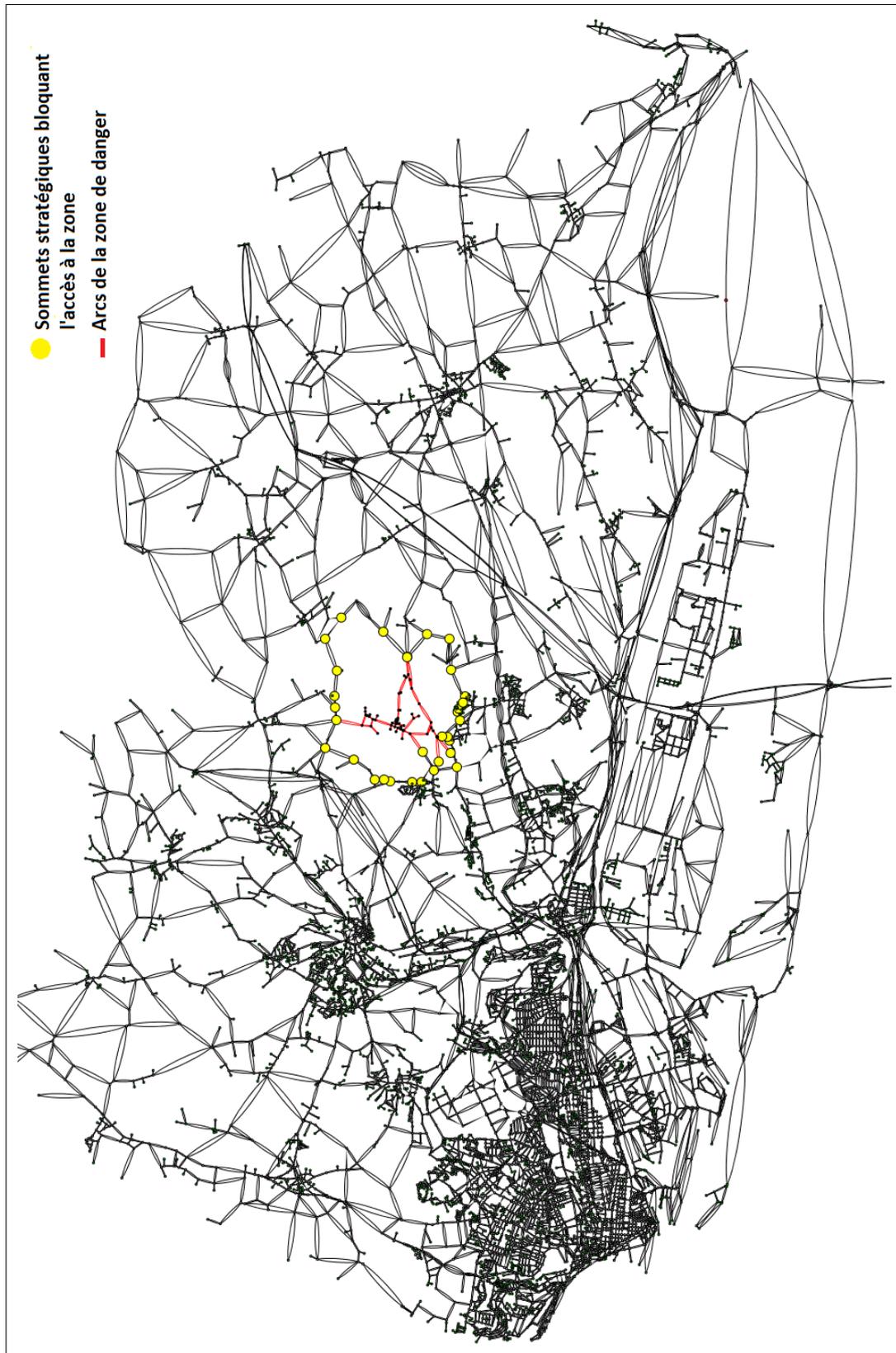


FIGURE 9.12: Exemple d'application de l'algorithme de blocage d'une zone de danger appartenant au multigraphe de l'estuaire de la Seine.

Algorithme 2: Algorithme de blocage de zone de danger.

```

Input : Graph  $g$ , Sommets[] zone, int profondeurMax
Output : Sommets[] frontiere
/* Une frontiere est un ensemble de sommets du graphe */
1 Sommets[] frontiere;
2 pour tout Sommet  $s \in$  zone faire
3   | si existArc( $s, j$ ) tel que  $j \notin$  zone alors
4   |   | frontiere.ajouter( $j$ );
5   | fin
6 fin
7 pour tout Sommet  $from \in$  frontiere faire
8   | pour tout Sommet  $to \in$  frontiere faire
9   |   | Chemin  $P =$  calcChemin( $from, to$ );
10  |   | si taille( $P$ ) < profondeurMax & !P.contient( $z \in$  zone) alors
11  |   |   | pour tout Sommet  $p \in P$  faire
12  |   |   |   | frontiere.ajouter( $p$ );
13  |   |   |   | fin
14  |   |   | fin
15  |   | fin
16 fin
17 pour tout Sommet  $f \in$  frontiere faire
18  | si adjacents( $f$ )  $\in$  frontiere alors
19  |   | frontiere.supprimer( $f$ );
20  | fin
21 fin

```

La première étape consiste à identifier la frontière de la zone ; il s'agit de l'ensemble des sommets de la zone qui partagent au moins un lien (un arc au sens du multigraphe) vers un sommet vers l'extérieur de la zone. Soit F l'ensemble de sommets correspondant à la frontière de la zone de danger. Nous ajoutons d'abord à F tous les sommets en dehors de la zone qui ont un lien vers au moins un autre sommet de la frontière. Pour chaque sommet s de F , nous calculons le plus court chemin (en nombre d'arcs) P_s vers tous les autres sommets de F ne passant pas par des arcs ni des sommets de la zone de danger. Soit $P = \{P_s | s \in F\}$ l'ensemble des sommets faisant partie des plus courts chemins entre les sommets de F . La deuxième étape consiste à choisir les sommets stratégiques appartenant à P . Nous supprimons les sommets de P ayant tous les sommets adjacents dans P . De cette façon, nous ne gardons dans P que les sommets partageant au moins un arc avec un sommet de l'extérieur de la zone. Afin d'éviter le calcul de plus courts chemins de taille importante entre les sommets de F , nous laissons le choix à l'utilisateur de fixer un seuil au-delà duquel le calcul de court chemin s'arrête. Ainsi, si i et j sont deux sommets de F et que le plus court chemin entre i et j dépasse un seuil fixé par l'utilisateur, nous arrêtons le calcul d'un chemin quand sa taille en nombre de sommets du chemin dépasse ce seuil. L'algorithme 2 montre les étapes de blocage d'une zone de danger.

9.3.3 Comportement des véhicules

Initialement, l'utilisateur précise l'environnement (graphe ou multigraphe) et le nombre de véhicules. Tant qu'il n'y a aucun risque nécessitant un changement de comportement, les véhicules se déplacent selon le modèle de trafic microscopique présenté dans le chapitre 8. Suite à l'occurrence d'un événement nécessitant l'évacuation d'une partie du réseau, les véhicules se situant en dehors de la zone de danger peuvent continuer à se déplacer comme lors d'une situation normale.

Nous traitons un phénomène réel sur un multigraphe représentant la structure d'un « vrai » réseau routier. Des parties du réseau d'étude peuvent correspondre à des impasses, *i.e.* des parties menant à des endroits déconnectés du réseau. Ceci peut correspondre à des endroits faisant la limite d'un territoire ayant une interface avec la mer, des endroits interdits aux véhicules, . . . , pouvant être d'une taille (en nombre de sommets) importante. Nous avons développé un algorithme permettant de détecter les impasses dont la taille en nombre de sommets est inférieure à un certain seuil. Une telle impasse peut être définie comme suit.

Définition 6 *À la base, une impasse est un chemin du graphe dont l'une des extrémités au moins a un degré de 1. Nous étendons cette notion à un sous-ensemble du graphe contenant un point d'articulation qui, supprimé, génère une composante connexe du graphe de taille $< n$, où n est un entier positif fixé à l'avance.*

La détection des zones est indispensable dans une situation normale de trafic et surtout en situation de crise nécessitant une évacuation, permettant d'éviter l'accumulation de véhicules dans des zones supposées être fluides, qui peut mettre en péril leur vie. L'algorithme parcourt le multigraphe à partir de chaque arc pour tester si le parcours de cet arc mène obligatoirement à une impasse. On arrête le parcours à partir d'un arc si on dépasse le seuil (*seuil* = 30 sommets par exemple) fixé pour qualifier une impasse (voir figure 9.13). Si on dépasse ce seuil pour un arc, il ne sera pas qualifié comme « menant à une impasse ».

Pour chaque arc du multigraphe menant vers une impasse, nous calculons un score lié à la taille de l'impasse. Si le seuil de qualification d'une impasse est fixé à 30, un arc menant à une impasse inférieure à 30 (20 par exemple) a un score correspondant à la taille de l'impasse. Si le parcours en profondeur dépasse le seuil, le score se fixe au double du seuil (60 pour cet exemple). Le score, utilisé par les véhicules pour choisir les routes à emprunter, est nécessaire pour limiter le nombre de véhicules se dirigeant vers les impasses. Ainsi, un automobiliste se trouvant en dehors de la zone sur un sommet i choisit un arc adjacent avec une probabilité dépendant du score de l'arc. De cette façon, on favorise l'utilisation des routes qui ne mènent pas vers des impasses sans toutefois empêcher que certains véhicules choisissent d'emprunter des impasses. Dans le cadre d'une aide à la décision apportée par notre outil de simulation, on pense que la détection d'impasses pourrait conduire à la mise en place de dispositif signalétique qui se

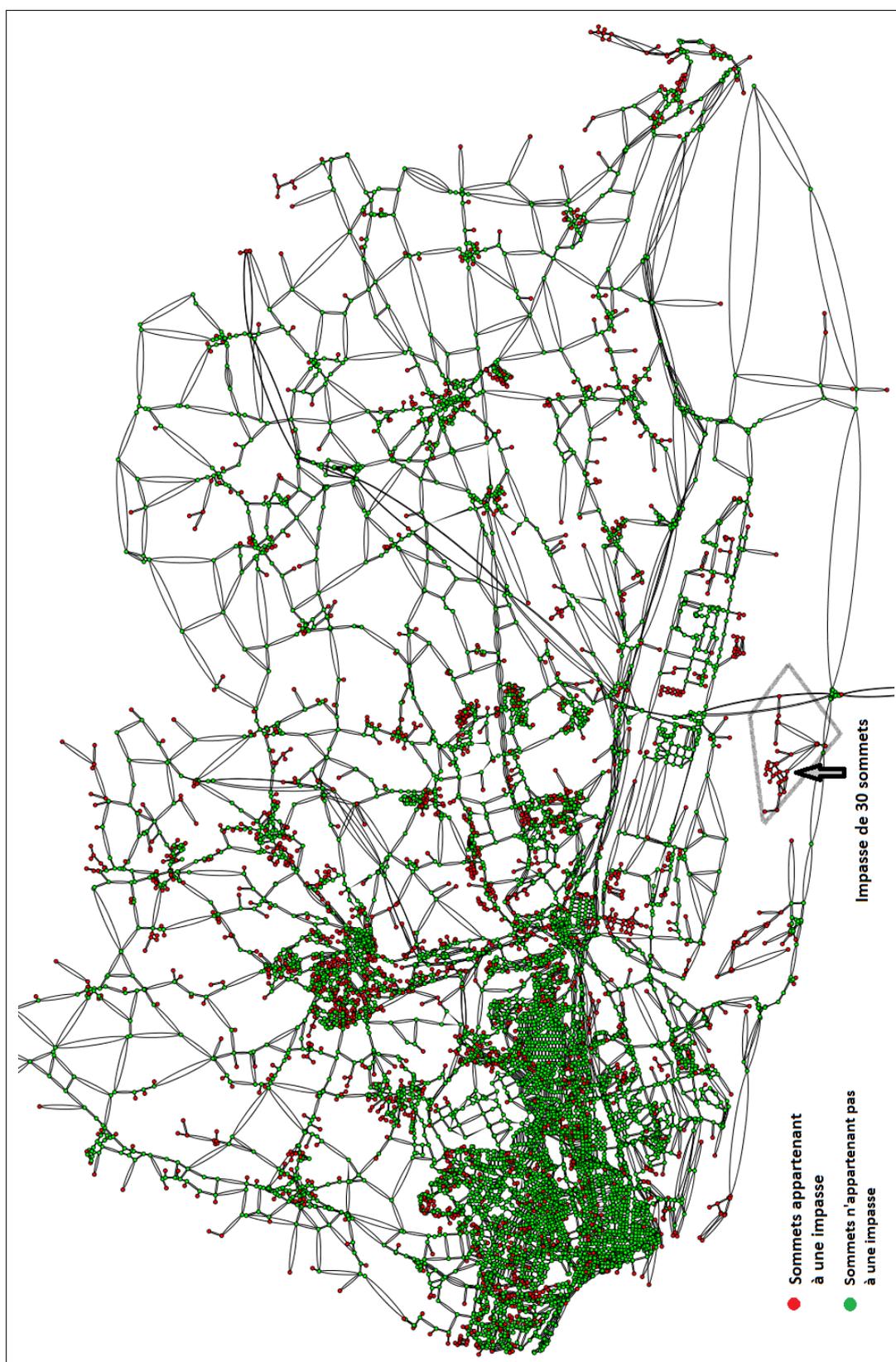


FIGURE 9.13: Détection des impasses de taille (en nombre de sommets) ≤ 30 .

mettrait en fonction lors de l'occurrence d'un risque pour fluidifier une évacuation. La probabilité du choix d'un arc diminue si le sommet « destination » de cet arc a déjà été visité. En effet, chaque véhicule a une mémoire des derniers sommets visités, les 20 derniers par exemple. Quant aux véhicules se trouvant à l'intérieur d'une zone à évacuer, nous rappelons qu'ils sont supposés être informés de la situation et qu'ils connaissent le plus court chemin à suivre pour atteindre le sommet le plus proche de leur lieu de présence, ce sommet appartient à la frontière F de la zone. Si un accident de la route se produit et bloque l'accès vers la sortie la plus proche, les véhicules recalculent un autre court chemin vers la deuxième sortie la plus proche. Nous supposons qu'un véhicule n'aperçoit un accident que lorsque son champ de vision le permet, en d'autres termes, lorsqu'il se trouve sur l'extrémité de(s) l'arc(s) bloqué(s) par l'accident.

9.4 Résultats de simulation

Nous avons effectué des tests de simulation afin de vérifier l'efficacité de la méthode de blocage des zones de danger, de la méthode de détection d'impasses et de l'influence de la structure du réseau sur la fluidité du trafic lors d'une évacuation, nous pensons à l'algorithme de détection de communautés. Pour valider la méthode de clôturation d'une zone de danger, il faut vérifier que les sommets de la frontière de la zone sont stratégiques et que par conséquent, aucun véhicule ne puisse rentrer. L'emplacement de la zone joue un rôle important sur l'évacuation. Ainsi, une zone située en centre-ville par exemple est probablement entourée de nombreuses sorties vu que le centre est fortement connecté, de multiples choix sont donc à disposition des évacués pour quitter la zone. En revanche, une zone moins connectée avec l'extérieur, présentant une interface avec la mer par exemple, limite les choix d'évacuation et ralentit les flux. Quant à l'algorithme de détection de communautés, il identifie des communautés dans le multigraphe (ou graphe) dont les sommets sont fortement connectés entre eux et faiblement connectés vers les sommets du multigraphe. Les liens faibles correspondent donc aux arcs connectant les communautés, ces arcs constituant des lieux de passage incontournable. Pour tester l'importance des liens faibles lors d'une évacuation, nous simulons l'évacuation d'une zone du multigraphe correspondant à une communauté. Ensuite, nous traçons la courbe illustrant le temps nécessaire pour évacuer la zone par rapport à un nombre de véhicules à évacuer. Les véhicules devant évacuer la zone (la communauté) passent obligatoirement par un arc reliant la communauté à l'une des communautés voisines. Pour chaque test lié à l'évacuation d'une communauté, nous bloquons un arc faible reliant la communauté vers l'extérieur et nous calculons le détour (en temps) effectué par les véhicules. Nous comparons donc la courbe d'évacuation sans accident avec celle correspondant au blocage d'un lien faible et nous analysons le résultat. Nous avons remarqué que l'influence du blocage de deux liens faibles partant d'une même communauté (le sommet origine de l'arc appartient à la commu-

nauté) n'a pas le même effet. Plusieurs raisons peuvent justifier ce constat. En effet, les véhicules qui arrivent juste au sommet adjacent à un arc bloqué aperçoivent qu'il est infranchissable et doivent recalculer un court chemin vers une deuxième sortie. Si cette deuxième sortie se trouve loin de l'arc adjacent bloqué, les véhicules se trouvent effectuer un détour important avant de quitter la zone. En revanche, si un lien faible se situe à proximité d'un autre lien faible, le détour à effectuer par les véhicules est normalement moins coûteux. D'autres paramètres également essentiels influencent l'évacuation ; ils dépendent de l'intérieur et de l'extérieur d'une communauté. Nous illustrons ces différents éléments pour plusieurs communautés du multigraphe d'étude.

9.4.1 Influence de l'emplacement de la zone

Nous cherchons dans cette section à valider l'hypothèse de la liaison entre le temps d'évacuation et l'emplacement de la zone incluant le nombre de sorties. Une comparaison entre l'évacuation de nombreuses zones de caractéristiques différentes sera présentée dans la section 9.4.6.

Considérons une communauté du centre-ville fortement connectée avec l'extérieur comme le montre la figure 9.14. Le fait que cette communauté comporte 15 liens vers l'extérieur permet d'éclater les flux et d'évacuer la zone rapidement, se traduisant donc par une évacuation rapide comme illustré dans la figure 9.15.

Le temps d'évacuation est rapide malgré la pression qu'exercent les véhicules se trouvant à l'extérieur de la zone sur les véhicules sortants. 45 000 véhicules sont observés pendant l'heure de pic de trafic de la fin de journée selon l'EMD. La figure 9.15 montre que même si on monte jusqu'à 60 000 véhicules, le temps d'évacuation reste rapide vu le grand nombre de sorties. 19 véhicules n'arrivent pas à sortir de la zone de danger dans le premier cas et 53 dans le second puisqu'ils se trouvaient dans une impasse.

Nous avons testé l'évacuation d'autres communautés fortement connectées et nous avons toujours obtenu le même résultat, confirmant que le temps d'évacuation d'une zone de danger correspondant à une communauté diminue quand le nombre de sorties augmente. Tentons maintenant d'évacuer une zone faiblement connectée vers l'extérieur comme celle de la figure 9.16 avec deux liens vers l'extérieur.

La zone (communauté) à évacuer (en jaune) a une interface avec la mer. Elle n'a que deux liens vers l'extérieur, ce qui explique le temps d'évacuation de l'ordre de 40 mn, long par rapport à d'autres communautés beaucoup plus connectées vers l'extérieur. L'augmentation du nombre de véhicules influence beaucoup plus l'évacuation dans le cas d'une zone peu connectée que dans une zone fortement liée à l'extérieur. Ce résultat est attendu puisque les véhicules choisissent les mêmes trajets, ce qui augmente l'interaction et ralentit les flux surtout si le nombre d'échappatoires de la zone est limité. Le temps d'évacuation augmente considérablement par rapport au nombre de véhicules à évacuer (cf. figure 9.17). Nous avons aussi testé l'évacuation d'autres communautés ayant une interface avec la mer ou correspondant à la fin du territoire. Nous avons ob-

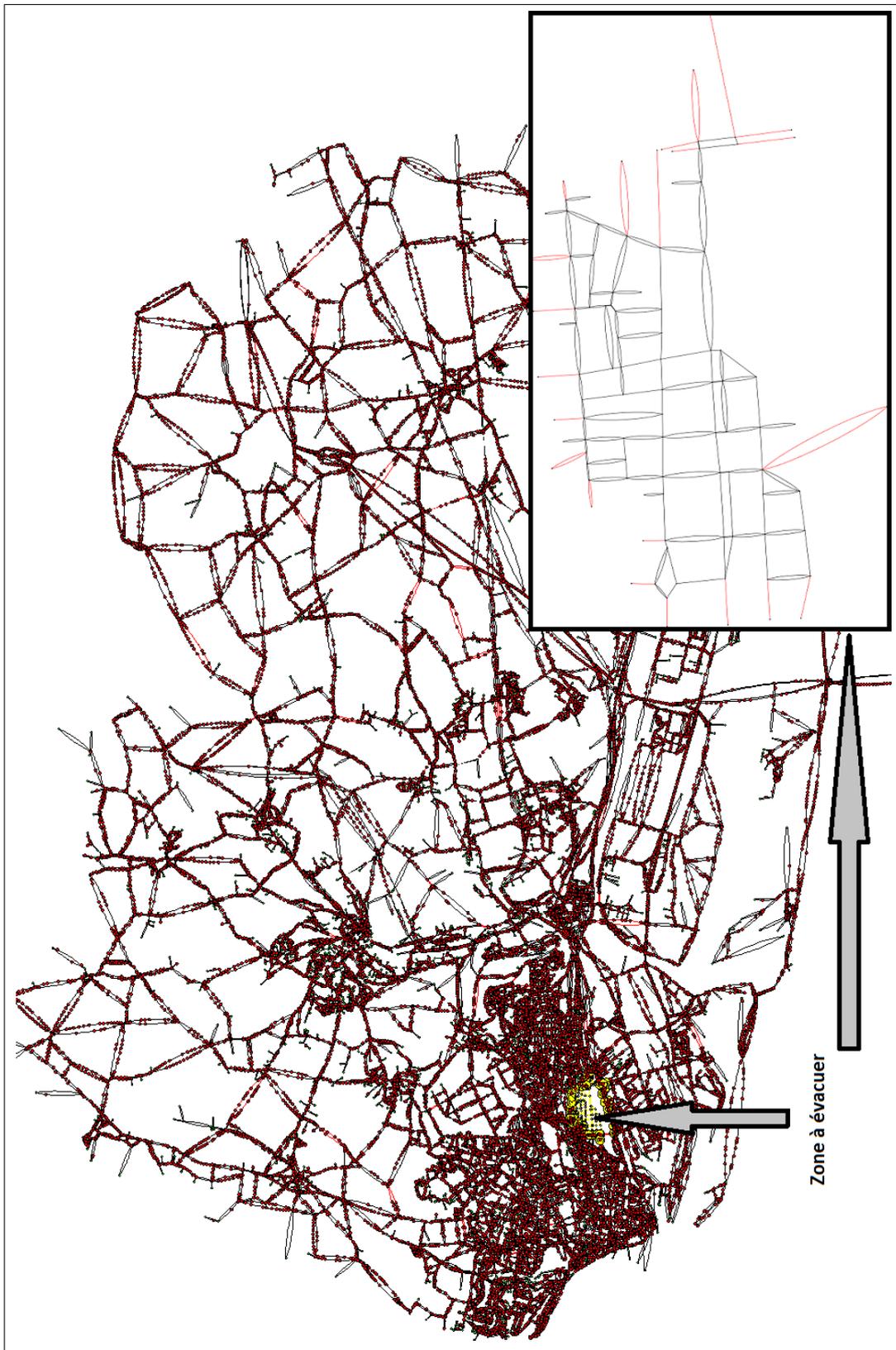


FIGURE 9.14: Évacuation d'une communauté appartenant au centre et ayant 15 liens vers l'extérieur. 45000 véhicules circulent dans tout le graphe. Les liens intercommunautaires sont colorés en rouge. La somme des capacités des liens sortants est de 450 véhicules. La communauté à évacuer est agrandie; les liens en rouges correspondent à ses entrées et sorties.

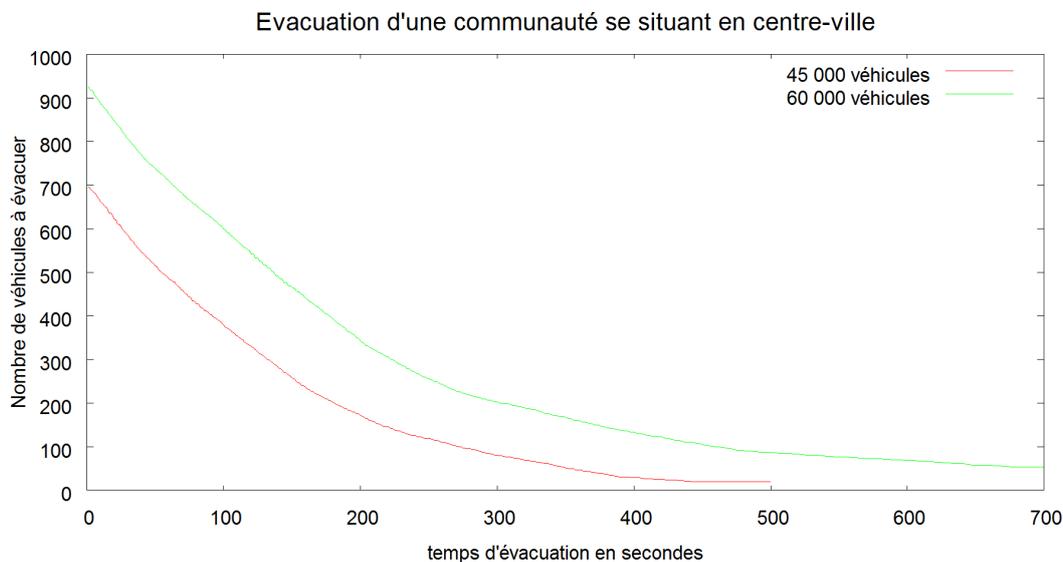


FIGURE 9.15: Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.14 pour le cas de 45 000 véhicules dont 695 se trouvent dans la communauté, le cas de 60 000 véhicules dont 925 dans la communauté.

tenu des résultats similaires validant l'hypothèse de l'influence du nombre de sorties et de l'emplacement d'une zone de danger sur l'évacuation.

9.4.2 Influence de la capacité des liens inter-communautaires

Dans cette section, nous analysons la sensibilité du système à la capacité des routes menant à l'extérieur d'une zone en danger. En effet, nous multiplions la capacité des liens inter-communautaires sortant d'une communauté par un coefficient et nous relançons la simulation afin de comparer l'effet global sur le temps d'évacuation. Nous avons remarqué que la capacité des sorties d'une communauté joue un rôle dans le temps d'évacuation sans qu'elle soit suffisante à elle seule de ralentir ou d'accélérer considérablement l'évacuation. Ainsi, en multipliant par 20 la capacité en nombre de véhicules (180 au lieu de 9) des deux liens vers l'extérieur de la communauté de la figure 9.16, le temps global change très peu ; la courbe de la figure 9.18 le confirme.

Maintenant, si nous doublons la capacité totale des 15 liens vers l'extérieur de la figure 9.14, ils pourront absorber 900 véhicules au lieu de 450. Nous apercevons l'influence de cette opération sur le temps global d'évacuation sans toutefois que cette opération ne provoque des changements considérables dans le déroulement de l'évacuation (*cf.* figure 9.19). Le nombre de liens d'une communauté vers l'extérieur a donc plus d'importance sur la fluidité d'une évacuation que la capacité totale de ces liens,

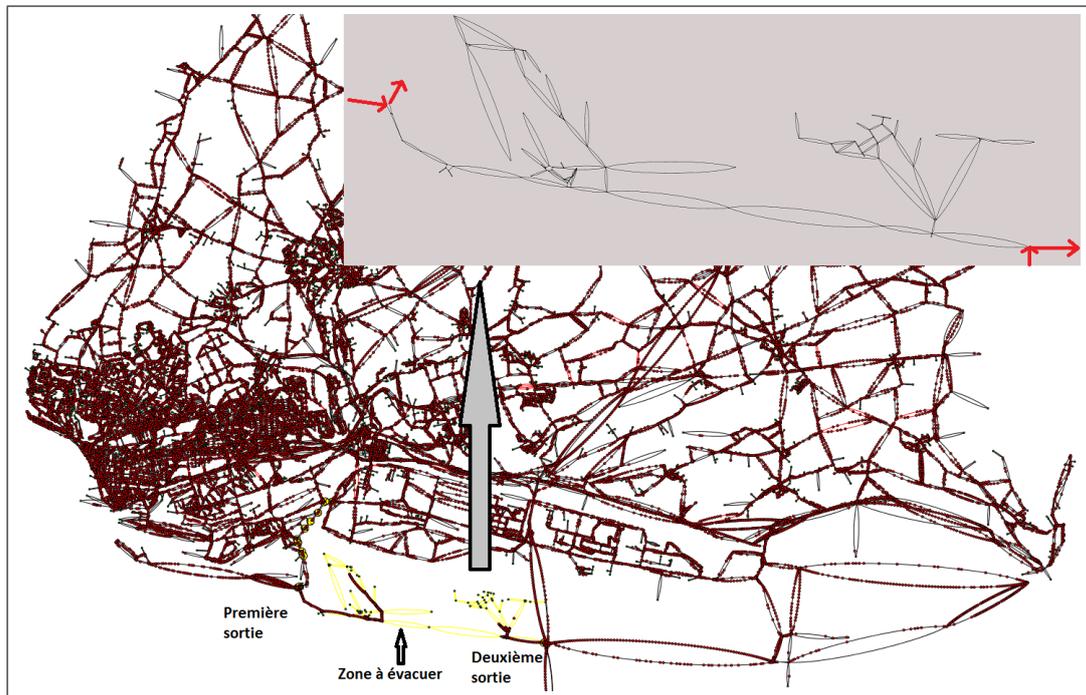


FIGURE 9.16: Évacuation en cours d'une communauté ayant une interface avec la mer et 2 liens vers l'extérieur. La somme des capacités des liens sortants est de 9 véhicules. 45 000 véhicules circulent dans tout le graphe. Les liens inter-communautaires sont colorés en rouge. La communauté à évacuer est agrandie; les liens en rouges correspondent à ses entrées et sorties.

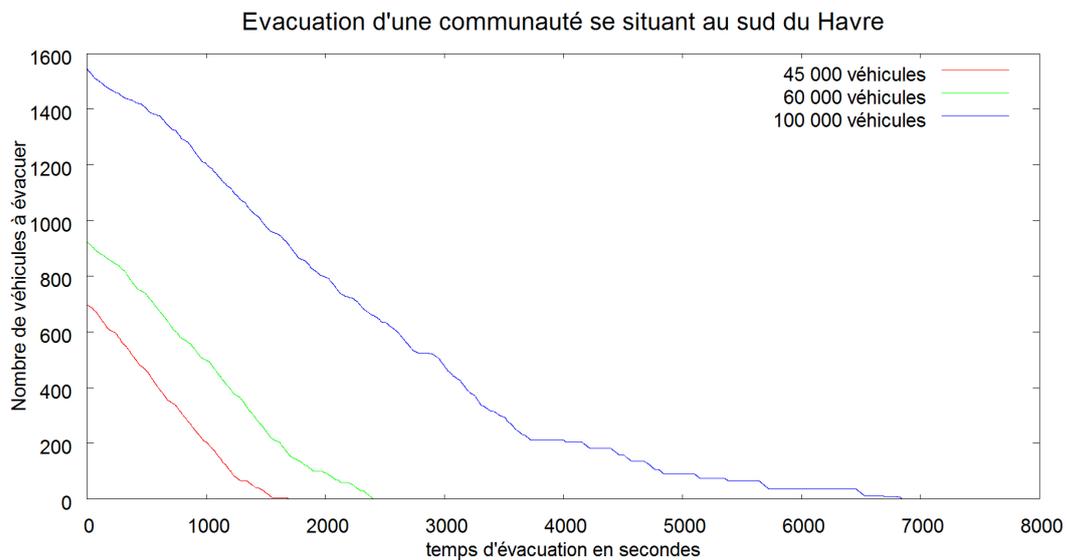


FIGURE 9.17: Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.16 pour le cas de 45 000 véhicules dont 696 se trouvent dans la communauté, le cas de 60 000 véhicules dont 922 et le cas de 100 000 dont 1545 dans la communauté.

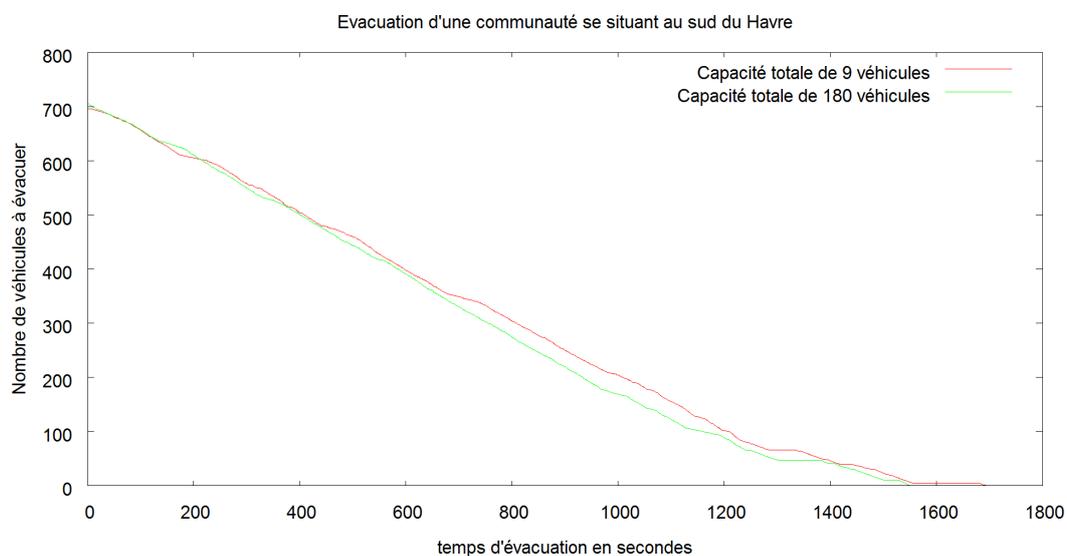


FIGURE 9.18: Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.16 entre le cas de liens inter-communautaires d'une capacité totale de 9 et de 180 véhicules. 45 000 véhicules circulent dans le graphe dont 695 se trouvent dans la communauté.

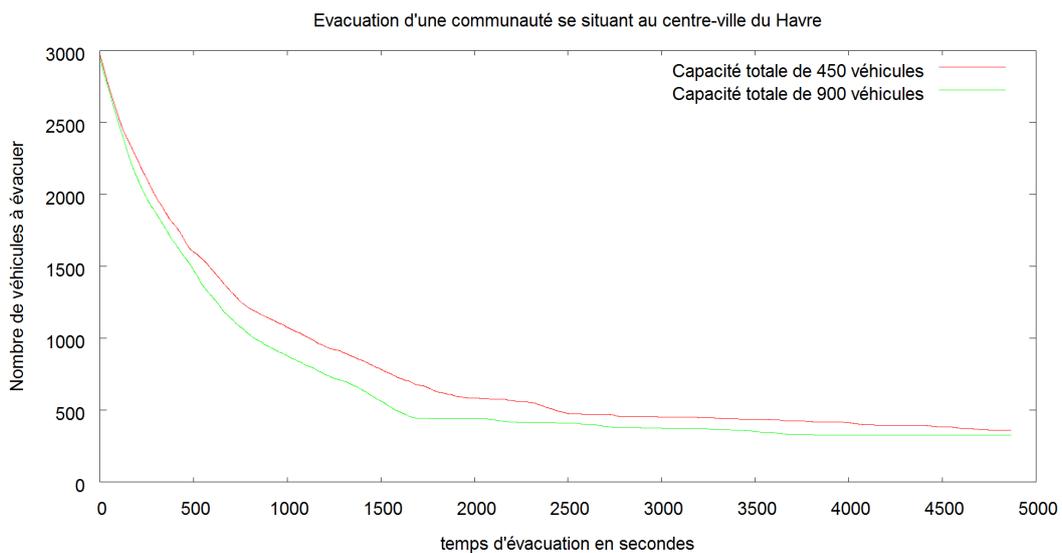


FIGURE 9.19: Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.14 entre le cas de liens inter-communautaires d'une capacité totale de 450 et de 900 véhicules. 45 000 véhicules circulent dans le graphe dont 3000 se trouvent dans la communauté.

résultat validé dans la section 9.4.6. Une question se pose sur l'effet minime de l'augmentation des capacités des voies menant vers l'extérieur sur l'évacuation. Nous avons donc tenté d'analyser l'influence des véhicules se trouvant hors de la zone de danger exerçant une pression sur les véhicules sortants.

9.4.3 Influence des flux à l'extérieur de la communauté

Les véhicules circulant en dehors de la zone de danger peuvent s'approcher de la frontière faute d'information de l'existence de danger et exercent par conséquent des pressions sur les véhicules évacuant la zone à cause du conflit résultant de l'interaction forte sur les points de sortie de la zone. Afin de comprendre l'effet de cette pression, nous avons lancé des tests pour lesquels aucun véhicule ne circule hors la zone.

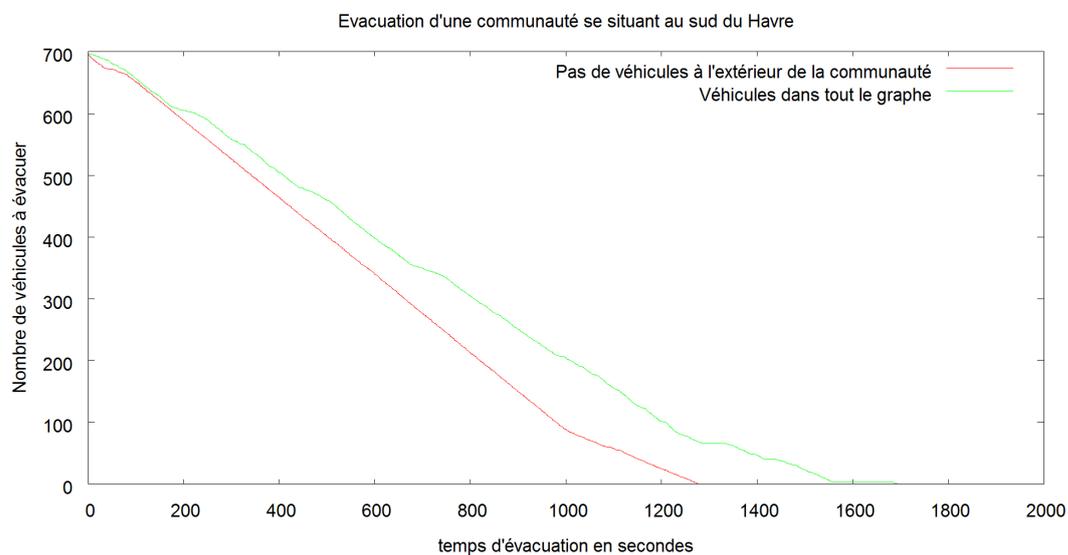


FIGURE 9.20: Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.16 entre le cas où 695 véhicules se trouvent dans la communauté mais aucun véhicule ne se trouve dans le reste du graphe et le cas de 45 000 véhicules circulant dans le graphe.

Les figures 9.20 et 9.21 comparent entre l'évacuation de communautés avec des véhicules se trouvant que dans ces communautés et des véhicules circulant dans tout le graphe. Elles montrent l'influence des flux à l'extérieur des communautés à évacuer sur les flux sortants.

Si les flux circulant à l'extérieur influencent une évacuation, nous montrons ci-après qu'il y a bien d'autres paramètres à prendre en compte, nous commençons par la distance séparant les liens inter-communautaires.

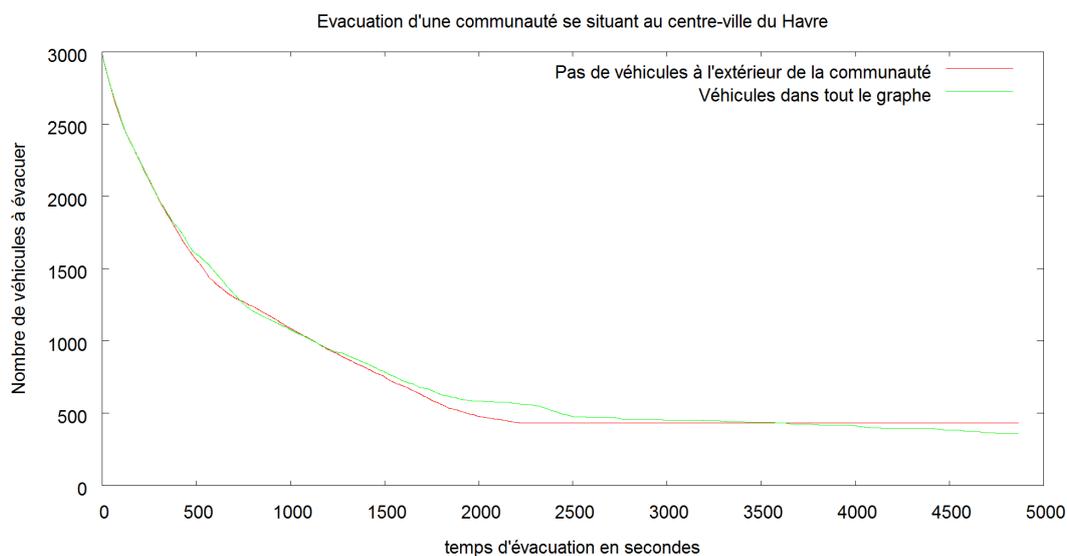


FIGURE 9.21: Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.14 entre le cas où 3000 véhicules se trouvent dans la communauté mais aucun véhicule ne se trouvent dans le reste du graphe et le cas de 45 000 véhicules circulant dans le graphe.

9.4.4 Influence de la distance séparant les liens inter-communautaires

Nous avons montré que l'emplacement et la forte ou la faible connectivité d'une communauté influencent le déroulement d'une évacuation. Nous avons aussi vu que la capacité des voies de sortie d'une communauté ainsi que les flux hors la communauté peuvent contraindre une évacuation. Dans cette section, nous exposons des résultats de simulation montrant que l'emplacement des liens inter-communautaires influencent le déroulement de l'évacuation.

La communauté de la figure 9.22 correspond à la zone industrielle au sud du territoire. Elle a une interface avec la mer et 6 liens vers l'extérieur. Si nous fermons dans chaque test un des liens du côté ouest de la communauté, les véhicules voulant évacuer la zone et arrivant à une sortie bloquée choisiront le plus court chemin vers la sortie la plus proche. Puisque les liens inter-communautaires du côté ouest de la communauté sont proches, le détour à faire par un véhicule est faible et le temps d'évacuation de la communauté ne varie pas considérablement.

Maintenant, si on bloque le lien inter-communautaire se situant au centre de la partie nord de la communauté et menant vers l'autoroute A131, le détour devient important car les véhicules n'ont aucun échappatoire outre la partie ouest, ils seront donc obligés à emprunter le plus court chemin entre le lien bloqué et l'une des autres sorties qui se trouvent toutes loin de la sortie bloquée (cf. figure 9.23).

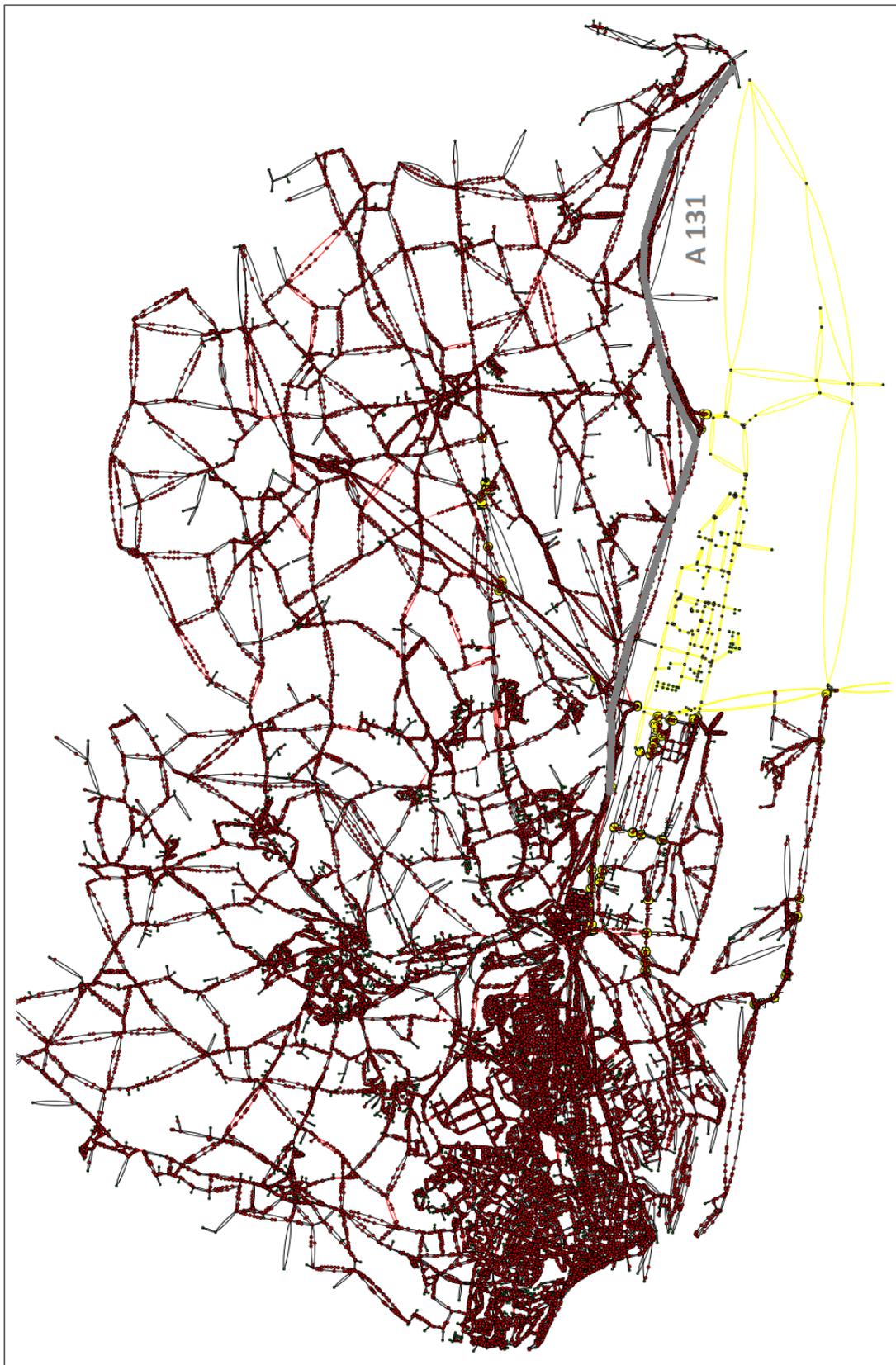


FIGURE 9.22: Évacuation en cours d'une communauté ayant une interface avec la mer et 6 liens vers l'extérieur. La somme des capacités des liens sortants est de 316 véhicules. 45 000 véhicules circulent dans tout le graphe.

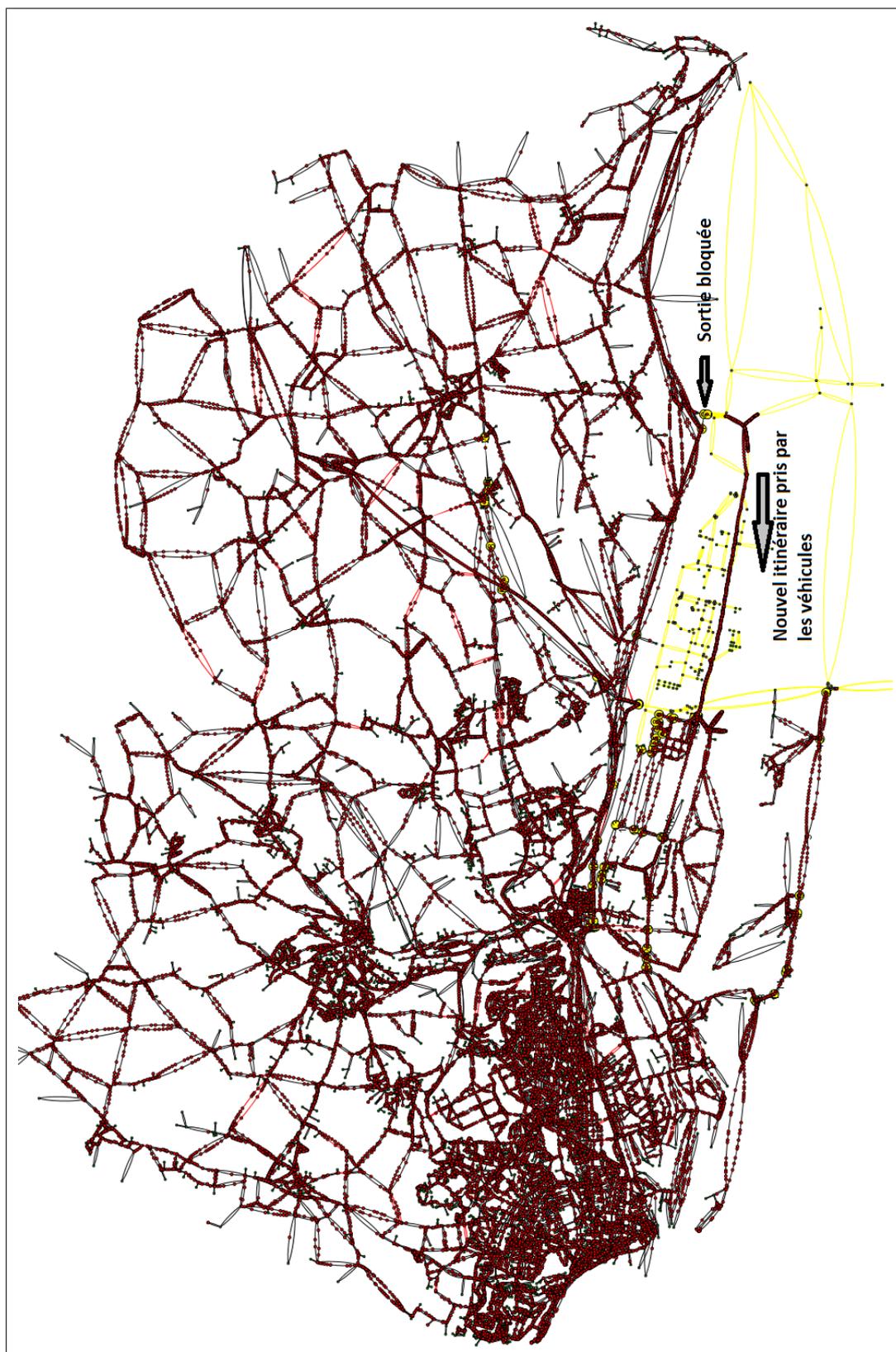


FIGURE 9.23: Évacuation en cours d'une communauté ayant une interface avec la mer et 6 liens vers l'extérieur. La somme des capacités des liens sortants est de 316 véhicules. 45 000 véhicules circulent dans tout le multigraphe. Le lien inter-communautaire au nord de la communauté (au milieu) est bloqué. Les liens inter-communautaires sont colorés en rouge.

Suite au blocage du lien vers l'autoroute A131, on observe des véhicules ayant choisi cette sortie avant d'apercevoir qu'elle était bloquée. À ce moment, ils se suivent pour rejoindre l'une des sorties du côté ouest, ce qui ralentit l'évacuation. Nous observons dans la figure 9.23 un flux de véhicules après avoir modifié leur itinéraire pour évacuer la zone. Ce détour est important puisque la sortie la plus proche se trouve à 9517m de la route bloquée et à 391 secondes pour un véhicule qui roule à vitesse maximale autorisée ; 1130 véhicules sont amenés à faire le détour. Ce dernier provoque le rallongement du temps d'évacuation de la communauté comme le montre la figure 9.24. Les véhicules ayant fait le détour se trouvaient à proximité de la sortie bloquée. Le nombre de véhicules se dirigeant initialement vers la sortie est d'autant plus grand que la sortie est proche d'un grand nombre de sommets de la zone.

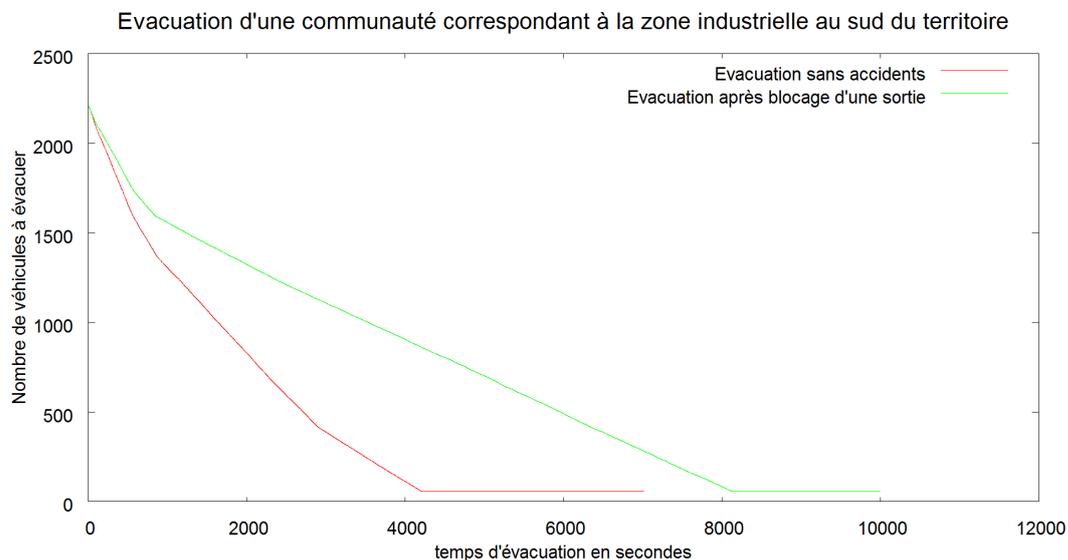


FIGURE 9.24: Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.23 avant et après le blocage de la sortie nord. 45 000 véhicules circulent dans le multigraphe. Les liens inter-communautaires sont colorés en rouge.

Alors que l'évacuation normale de la communauté de la zone industrielle (zone en jaune de la figure 9.23) s'effectue en 4210 secondes, elle prend 8125 après le blocage du lien faible qui relie la communauté à l'autoroute. Nous remarquons dans les deux cas que 55 véhicules restent coincés dans la zone car ils se trouvaient dans une impasse juste avant l'occurrence du risque et ils n'avaient pas moyen de faire demi-tour. Nous avons testé sur d'autres communautés du graphe ayant plusieurs liens vers l'extérieur et nous avons eu des résultats proches montrant un lien fort entre la distance inter-sorties et le temps d'évacuation si une ou plusieurs sorties sont bloquées au cours de l'évacuation.

9.4.5 Influence de la capacité des chemins séparant les liens inter-communautaires

Si le nombre de véhicules à évacuer, le nombre de sorties d'une communauté vers l'extérieur, le nombre de véhicules à faire un détour, la distance inter-sorties et l'interaction avec les flux à l'extérieur de la communauté influencent la fluidité des flux lors d'une évacuation et peuvent rallonger le temps d'évacuation, un paramètre lié à la capacité en nombre de véhicules pour un chemin de détour peut à son tour contraindre les flux surtout si un nombre considérable de véhicules empruntent le même chemin. Afin d'illustrer ce propos, nous donnons un exemple montrant l'importance de la capacité des arcs faisant partie d'un plus court chemin sur le déroulement de l'évacuation, il s'agit d'une communauté se situant au nord-ouest du territoire (figure 9.25). Pour la communauté de la figure 9.25, nous numérotions les sorties de 0 à 7 et nous bloquons dans le premier test, la sortie numéro 0 et dans le deuxième test, la sortie numéro 1. Le blocage de la sortie numéro 0 ainsi que le blocage de la sortie numéro 1 oblige aux alentours de 330 véhicules à faire un détour. Le chemin de détour de la sortie 0 est capable d'absorber deux fois plus de véhicules que celui lié au blocage de la sortie numéro 1. Par contre, le chemin partant de la sortie 0 est beaucoup plus coûteux en temps que le chemin correspondant au blocage de la sortie 1. Pourtant le temps d'évacuation est le même dans les deux cas. Le chemin de la sortie 0 absorbe beaucoup plus de flux que le chemin de la sortie 1, ce qui peut fluidifier les flux et diminuer le temps d'évacuation. Ces deux tests, ainsi que d'autres tests effectués pour des cas de figure similaires montrent bien que la capacité des chemins suite à des détours liés à des accidents pendant l'évacuation influence cette dernière et peut la ralentir dans certains cas.

9.4.6 Comparaison du temps d'évacuation selon le nombre de sorties

Dans cette section, nous comparons les tests d'évacuation des communautés des figures 9.14, 9.16, 9.22 et 9.25 avec 45 000 véhicules circulant sur l'ensemble du territoire. Pour chaque test, le même nombre de véhicules se trouvent initialement dans la zone de danger avant d'être évacués. Les courbes montrant l'avancement de l'évacuation de chacun des tests sont comparées dans la figure 9.27. 700 véhicules sont à évacuer pour chacun des tests. Le résultat de la figure 9.27 montre que le temps d'évacuation dépend fortement du nombre de sorties de la zone. La communauté ayant deux sorties s'évacue en 1700 itérations (d'une seconde) alors que la communauté du centre ayant 15 liens vers l'extérieur s'évacue en 475 itérations.

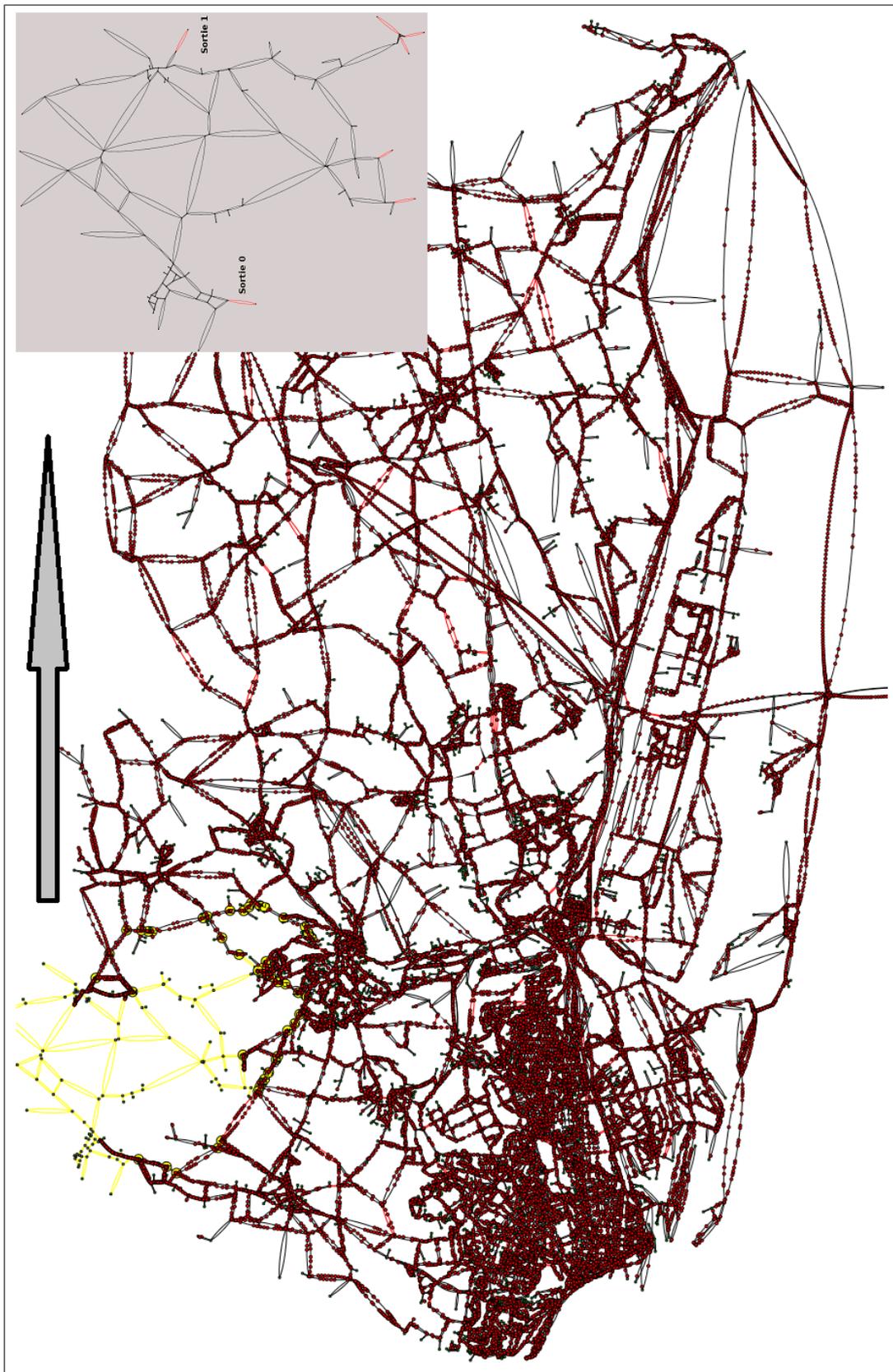


FIGURE 9.25: Évacuation en cours d'une communauté de situant au nord-ouest du territoire et ayant 8 liens vers l'extérieur. La somme des capacités des liens sortants est de 212 véhicules. 45000 véhicules circulent dans tout le multigraphe. Les liens intercommunautaires sont colorés en rouge. La communauté à évacuer est agrandie; les liens en rouges correspondent à ses entrées et sorties.

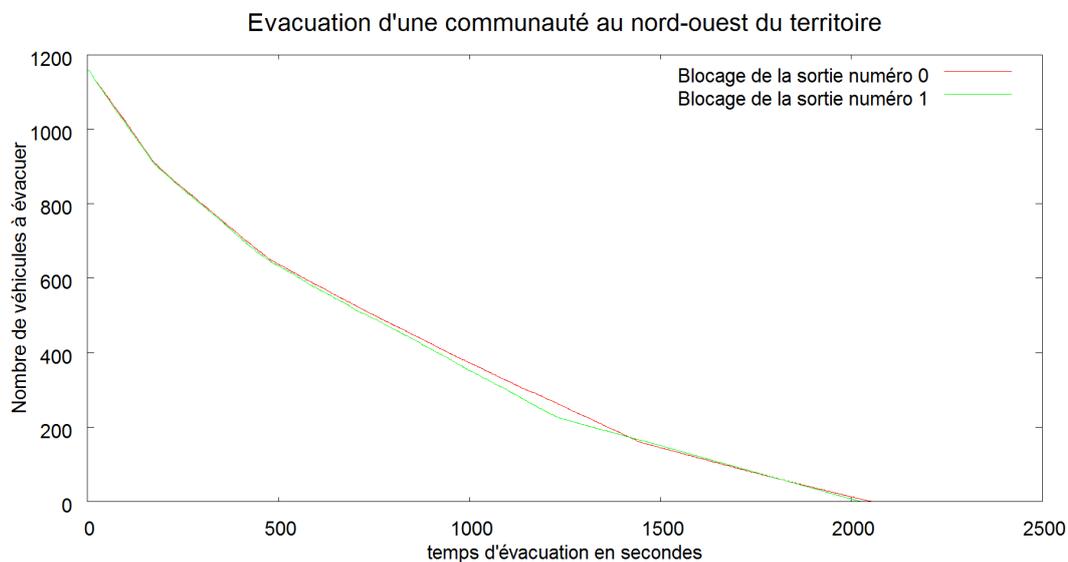


FIGURE 9.26: Comparaison du temps d'évacuation de la communauté de la figure 9.25 après blocage de la sortie 0 pour le premier test et la sortie 1 pour le second. 45 000 véhicules circulent dans le multigraphe.

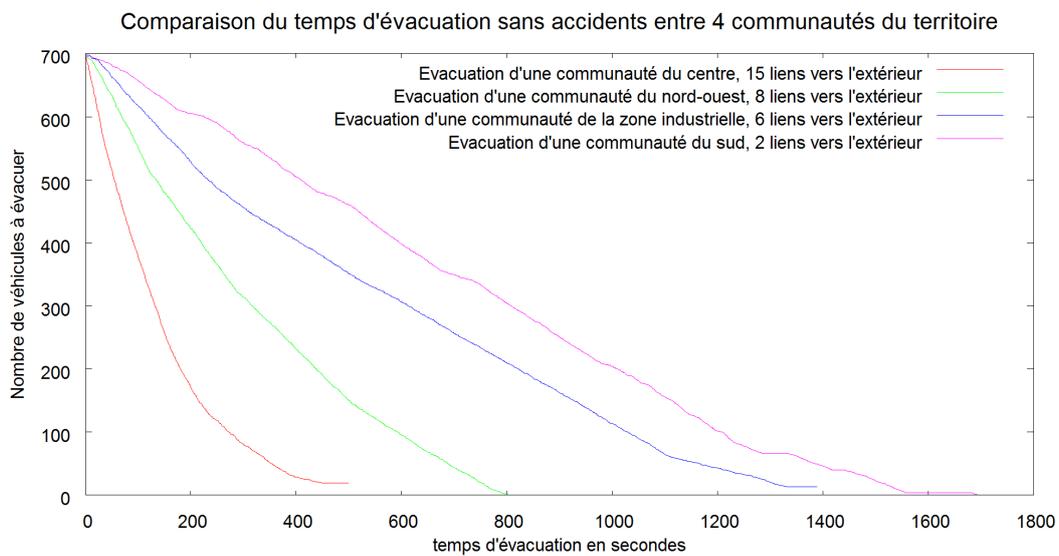


FIGURE 9.27: Comparaison du temps d'évacuation des quatre communautés précédemment exposées (figures 9.14, 9.16, 9.22 et 9.25). 45 000 véhicules circulent dans le multigraphe.

9.5 Récapitulatif

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle permettant l'aide à la décision dans les situations nécessitant une évacuation. Une partie liée à la prévention des risques a été étudiée en utilisant une approche multi-échelle d'analyse de structure dans un réseau d'interaction correspondant au réseau routier. Nous avons aussi proposé un modèle permettant de planifier une évacuation en allant de l'occurrence d'un risque jusqu'à l'évacuation de la population.

Enfin, nous tenons à préciser que le modèle d'aide à la décision fonctionne si la zone de danger correspond à une communauté ou à une zone définie par l'utilisateur ou venant d'un logiciel de modélisation d'accidents. Nous avons pris le choix dans ce chapitre de se concentrer sur l'évacuation de communautés pour mettre en évidence l'influence de la structure du réseau et des liens faibles vulnérables sur le déroulement d'une évacuation. Nous pensons avoir démontré la liaison entre structure et usage du réseau en situation normale comme en situation de crise et que la prévention du risque est complémentaire avec la gestion des crises. Nous avons aussi mis en évidence les principaux paramètres pouvant influencer une évacuation voire même changer la trajectoire du système comme annoncé dans le chapitre 4 :

- L'emplacement de la zone de danger : les tests ont montré que l'emplacement d'une zone et le nombre de sorties peuvent contraindre son évacuation. Ainsi, une zone présentant une interface avec la mer par exemple ou ayant un nombre limité de sorties peut retarder l'évacuation.
- La capacité des liens inter-communautaires : les voies de sorties d'une zone de danger peut faciliter l'évacuation si elles peuvent absorber un nombre important de véhicules.
- Les flux hors de la zone de danger : les véhicules sortant d'une zone de danger interagissent avec les véhicules hors la zone, ce qui peut augmenter les conflits liés à l'accès à des routes de la frontière de la zone et retarder l'évacuation.
- La distance et la capacité séparant les points de sorties d'une zone : si des véhicules se dirigeant vers une sortie changent de trajets suite à un accident éventuel, ils doivent recalculer un chemin vers une autre sortie. La capacité de ce chemin ainsi que le temps à le parcourir peuvent ralentir l'évacuation.
- Le nombre de véhicules à évacuer influence aussi l'évacuation ; l'augmentation du nombre de véhicules à évacuer multiplie les interactions entre les véhicules et ralentit les flux.

Ces paramètres peuvent plus ou moins influencer l'évacuation selon les caractéristiques de la communauté ou la zone à évacuer et selon les flux circulant à l'extérieur. Ces paramètres d'ordre local ou global dessinent la trajectoire de notre système de nature complexe sans toutefois être capable de la déterminer et la prévoir à l'avance. Toutefois, pour les tests effectués, deux paramètres influencent d'une manière considérable l'évacuation bien qu'ils ne suffisent pas pour déterminer le déroulement de l'évacuation ;

9. MODÈLE DE MICRO-ÉVACUATION

nous parlons du nombre de véhicules à évacuer et du nombre de liens sortant d'une zone de danger.

CONCLUSION

Nous avons présenté une approche pluridisciplinaire d'aide à la décision face à un problème réel que constitue la gestion des risques. Les contributions relèvent du domaine de la prévention des risques et de la gestion de crises, par des processus dynamiques et des méthodes d'analyse de structures multi-échelles sur le réseau d'interaction que constitue en particulier le réseau viaire. La pluridisciplinarité revendiquée est liée au carrefour que constitue ce travail entre la science de l'informatique, la géographie et la cyndinique.

En amont du travail applicatif, nous avons inscrit ce travail en science des systèmes complexes. Le territoire est analysé par une approche systémique dont la question de robustesse et de résilience se pose fortement du fait de son exposition au risque.

Dans le cadre applicatif, notre contribution est liée à la prévention des risques comme au traitement des crises. La prévention des risques a été étudiée en analysant la vulnérabilité du réseau par sa structure, à différents niveaux d'échelle : microscopique, mésoscopique et macroscopique grâce à des processus dynamiques sur des graphes d'interaction. La dynamique de la population empruntant le réseau routier a été représentée en développant un modèle microscopique simple de trafic. La gestion de crises lors d'une évacuation a été étudiée et le modèle proposé nous semble avoir apporté une contribution dans la gestion d'évacuation en analysant les paramètres pouvant l'influencer ; nous espérons ainsi qu'il constitue un moyen permettant d'amener des éléments de réponse pour les décideurs gérant le risque.

Du fait de la pluridisciplinarité du travail et des méthodes de résolution, nous proposons d'exposer dans ce qui suit les principales contributions liées à ce travail par rapport aux

domaines traités avant de terminer par les perspectives à court et à long terme.

Contributions en informatique : morphodynamique des réseaux

La morphodynamique des réseaux d'interaction est fortement liée à leurs évolutions structurelle et fonctionnelle qui sont indissociables. Ainsi, la structure d'un réseau influence sa dynamique et inversement.

Nous avons analysé la structure des réseaux d'interaction en étudiant l'importance des liens à différents niveaux d'échelle micro, méso et macro. Pour nous, l'importance d'un lien est liée aux répercussions de sa perte et en particulier aux dysfonctionnements engendrés aux niveaux d'échelle annoncés, contraignant ainsi l'usage du réseau.

Au niveau local, nous avons proposé deux méthodes simples reposant sur le coefficient de clustering et la mesure des détours à faire suite à la perte d'un arc.

Au niveau mésoscopique, nous avons présenté une mesure quantifiant l'effet local et global du dysfonctionnement d'un réseau, en utilisant un algorithme de calcul de centralité d'intermédiarité dans un graphe (adapté sur un multigraphe). La mesure a l'avantage de permettre la comparaison entre la perte de plusieurs parties du réseau voire même la comparaison entre deux graphes différents.

Au niveau macroscopique, des lieux de passage incontournables du réseau sont détectés grâce à un algorithme de détection de communautés ayant l'avantage d'être appliqué sur un multigraphe. Ainsi, le nombre d'arcs entre deux sommets adjacents est indispensable dans le calcul de la distance inter-communautaire.

L'influence de la structure sur son usage a été analysée par une méthode de marche aléatoire permettant de détecter des parties du réseau susceptibles d'absorber des flux importants. L'avantage de cette méthode est qu'elle est générique et n'a besoin d'aucune information supplémentaire à part la structure d'un graphe; l'utilisation de phéromones numériques et d'un mécanisme d'évaporation permet au système de s'adapter aux changements environnementaux modifiant la structure du graphe lors de la simulation.

L'usage du réseau change sa morphologie. Ainsi, des processus dynamiques contribuent à modifier à court ou à long terme la morphologie des réseaux. Ainsi, nous proposons de représenter les flux par un modèle microscopique avec une loi de poursuite inspirée du Code de la route français.

Un événement interne ou externe vient perturber les flux sur le réseau et change sa morphologie. Le comportement des entités évolue et les interactions s'amplifient, modifiant ainsi le comportement global du système pouvant changer de trajectoire. Nous analysons les paramètres influençant les flux en mode normal comme lors d'une perturbation.

Application dans le cadre des gestions des risques

Les contributions au niveau des réseaux d'interaction et des dynamiques liées à leur usage ont été appliquées sur la gestion des risques se déclinant en un aspect préventif et en un autre aspect lié à la gestion des crises, plus particulièrement dans le cadre des évacuations. Ce domaine d'application a été choisi pour répondre aux attentes de la **CO-DAH** cherchant à gérer la dynamique des flux lors d'une situation de crise.

En effet, l'évacuation de la population s'effectue principalement via le réseau viaire, d'où l'attention particulière dans le cadre de la thèse consacrée à l'étude de la structure et du fonctionnement du réseau viaire.

Pour l'aspect préventif, il est nécessaire d'analyser la vulnérabilité du réseau avant même l'occurrence d'un risque. Les méthodes de mesure de l'importance des liens du réseau nous ont permis d'étudier leur vulnérabilité à différents niveaux d'échelle.

Quant à la gestion de crises, nous considérons le risque comme un événement perturbateur venant modifier le comportement et les interactions des entités. Nous avons donc proposé un modèle permettant de planifier une évacuation allant du blocage de l'accès à une zone dangereuse jusqu'à l'évacuation des véhicules, en analysant les principaux paramètres influençant l'évacuation.

Perspectives

Le modèle de microsimulation de trafic proposé, bien que simple et ne prenant pas en compte des comportements de conduite diversifiés, est conforme aux diagrammes fondamental et espace-temps et permet de retrouver des vitesses et densités moyennes de véhicules, proches de celles observées sur un territoire connu pour nous correspondant à l'estuaire de la Seine. Ce choix de parcimonie a été pris afin de faciliter le contrôle du système. La loi de poursuite comme le comportement des évacués devront certainement être plus sophistiqués afin de prendre en compte plus de paramètres. Pourtant, cela ne change en aucun cas l'utilité des méthodes d'analyse de structure et de vulnérabilité en utilisant la méthode locale de calcul de détours, les coefficients de clustering, la centralité d'intermédierité et les méthodes de détection de communautés dans les graphes.

Nous travaillons sur la mise en place d'un algorithme de détection de communautés prenant en compte la connectivité du multigraphe mais aussi la spatialisation ; une communauté partageant n arcs avec une seule autre communauté est différenciée d'une communauté partageant n arcs avec n communautés différentes par exemple. Du point de vue « risque », un événement a plus de probabilité de toucher n arcs spatialement proches, se trouvant donc entre deux communautés que de toucher n arcs partagés entre n communautés spatialement moins proches. Une mesure de vulnérabilité des communautés devra aussi être mise en place, exprimant la difficulté de son évacuation en cas de risque.

Le modèle de micro évacuation devrait à terme être couplé à un système d'aide à la décision pour suggérer :

- des évacuations si le temps d'évacuation est inférieur au temps d'arrivée du risque,
- des confinements sinon,
- mais surtout grâce à l'analyse multi-échelle des communautés, de mixer selon la situation, les deux stratégies consistant à évacuer certaines communautés et en confiner d'autres.

Le mouvement de foule ainsi que leur interaction avec les véhicules peut jouer un rôle dans le ralentissement d'une évacuation. Une des perspectives à venir est d'intégrer les mouvements de foule, une thèse est en cours dans notre laboratoire sur ce sujet menée par Haifa AbdelHak.

Notre travail a été développé conjointement avec la thèse [CIFRE](#) de Julien Franzolini se passant en collaboration avec notre laboratoire et la [CODAH](#). En phase de finalisation, elle doit permettre l'envoi de messages de proche en proche par des technologies WIFI s'affranchissant d'infrastructure de communication. Une prise de décision générée par notre système sera donc transmise de proche en proche à la population afin de l'informer des consignes à suivre en cas de risque.

Nous avons montré dans ce travail le lien étroit entre la structure d'un réseau et son fonctionnement. Ainsi, nous sommes capables d'analyser l'impact d'une perturbation locale de la structure. Dans le cadre de la cyndinique cette approche permet entre autre de fournir des éléments de réponses fonctionnelles concernant la suppression ou la restauration, voire l'ajout de partie d'un réseau. Une vision plus large de ce travail permet également d'envisager de l'utiliser pour l'aménagement d'une ville ou d'un quartier en fonction de contraintes de mobilité ou de spatialisation par exemple. La question de la robustesse du réseau viaire a été considérée selon une approche multi-échelle d'analyse de structure, mais d'autres mesures peuvent être mises en place permettant non seulement de qualifier la robustesse d'un réseau, mais aussi de pouvoir comparer des réseaux de structures différentes, nous pensons à des techniques s'appuyant sur des mesures de transitivité dans un graphe comme par exemple la fermeture transitive des communautés ou encore la différence entre le réseau routier réel et un réseau supposé plus idéal basé sur une triangulation de Delaunay.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Actu-Environnement. Catastrophe de Bhopal, quelques enseignements après un quart de siècle. http://www.actu-environnement.com/ae/news/25e_anniversaire_catastrophe_bhopal_9062.php4, 02 décembre 2009.
- [2] P. Amar, J.-P. Cornet, F. Képès, and V. Norris, editors. *Proceedings of the Evry Spring School on "Modelling and Simulation of Biological Processes in the Context of Genomics"*, 2004.
- [3] A. Meslem and H. Corbé. Armero, pourquoi une "petite éruption" a-t-elle tuée 25 000 personnes? In *Catastrophes Naturelles* : http://www.prevention2000.org/cat_nat/risques/mvtter/mvt_arm.htm.
- [4] W. B. Arthur, S. Durlauf, and D. A. Lane. *The Economy as an Evolving Complex System II*, chapter Introduction : Process and Emergence in the Economy, pages 1–14. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1997.
- [5] G. Arturson. The los alfaques disaster : A boiling-liquid, expanding-vapour explosion. *Burns*, 7(4) :233 – 251, 1981.
- [6] P. Bak. *How Nature works : the science of self-organized criticality*. Springer-Verlag, 1996.
- [7] A. Banos. À la conquête de la fourmilière urbaine : quand le géographe se fait explorateur de mondes artificiels, Saint-Dié des Vosges, France. Actes du Festival International de Géographie, octobre 2005.
- [8] J. R. Barthelemy, P. Blancher, and C. Marris. Aménagement de l'espace et gestion des risques aux Pays-Bas. *2001 PLUS*, 41, 1998.
- [9] M. Batty. Modelling cities as dynamic systems. *Nature*, 231(5303) :425–428, June 1971.
- [10] M. Batty. *Cities and Complexity : Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*. The MIT Press, September 2005.

- [11] E. Ben-Jacob and H. Levine. Des fleurs de bactéries. *Pour la Science - Les formes de la vie*, HS-44 :78–83, 2004.
- [12] C. Bertelle, A. Dutot, F. Guinand, and D. Olivier. Organization detection using emergent computing. *International Transactions on Systems Science and Applications*, 2(1) :61 – 70, 2006.
- [13] C. Bertelle, A. Dutot, F. Guinand, and D. Olivier. Organization detection for dynamic load balancing in individual-based simulations. *Multi-Agent and Grid Systems*, 3(1) :42, 2007.
- [14] C. Bertelle, A. Dutot, M. Nabaa, and D. Olivier. Complexe cité. Non publié, 2009.
- [15] P. Blancher. Risques, ville et réseaux techniques urbains. In *Risques et réseaux techniques urbains*, volume 18, pages 13 – 24. Collections du CERTU, 1998.
- [16] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz. *Swarm Intelligence : from natural to artificial systems*. Oxford University Press, 1999.
- [17] E. Bonabeau, G. Theraulaz, J.-L. Deneubourg, and S. Camazine. Self-organisation in social insects. *Trends in Ecology and Evolution*, 12(5) :188–193, 1997.
- [18] E. Bonnet. Risques industriels : les territoires vulnérables de l’estuaire de la Seine. *Mappemonde*, 76 :1–6, 2004.
- [19] F. Bosque and X. Pages. La prise en compte du risque industriel : état et perspectives. *OCL. Oléagineux, corps gras, lipides*, 10(1) :5–10, 2003.
- [20] J.C. Bourcier and P. Mallet. Allocation spatio-temporelle de la population exposée aux risques majeurs. Contribution à l’expologie sur le bassin de risques majeurs de l’estuaire de la Seine : modèle PRET-RESSE. *Revue internationale de Géomatique*, 16(10) :457–478, 2006.
- [21] P. Bourdieu. *Questions de sociologie*. Les Editions de Minuit, October 2002.
- [22] E. Bourrel and V. Henn. Mixing micro and macro representation of traffic flow : a first theoretical step. In *Proceeding of the 9th Meeting of the Euro Work-ing Group on transportation*, 2002.
- [23] E. Bourrel and J.B Lesort. Mixing micro and macro representations of traffic flow : a hybrid model based on the LWR theory. *Transportation Research Record*, 1852 :193–200, 2003.
- [24] B. Bowonder. The Bhopal accident. *Technological Forecasting and Social Change*, 32(2) :169 – 182, 1987.

-
- [25] U. Brandes. A faster algorithm for betweenness centrality. *Journal of Mathematical Sociology*, 25(2) :163 – 177, 2001.
- [26] U. Brandes. On variants of shortest-path betweenness centrality and their generic computation. *Social Networks*, 30(2) :136 – 145, 2008.
- [27] U. Brandes, D. Dellinger, M. Gaertler, R. Goerke, M. Hofer, Z. Nikoloski, and D. Wagner. Maximizing Modularity is hard. *ArXiv Physics e-prints*, August 2006.
- [28] U. Brandes and T. Erlebach. *Network Analysis : Methodological Foundations*, volume 3418. Springer, 2005.
- [29] C. Brassac and S. Pesty. La Pelouse Fourmilière. De la coaction à la coopération. In Muller and Quinqueton, editors, *4èmes Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents*, pages 250–263. Hermes, 1996.
- [30] P. Bretin, I. Capek, P. A. Cabanes, F. Marcel, and M. Merchat. Épidémie de légionellose dans le Pas-de-Calais, novembre 2003 à janvier 2004, rapport de la mission d'appui, juillet 2004.
- [31] J.F. Brihac and K. Favro. *Planifier le risque industriel Prévention - PPI - PPRT - Contrôle - Responsabilité - Zonage - Démarche volontaire des entrepreneurs*. Collection Environnement. Victoires Editions, November 2009.
- [32] S. Bura, F. Guerin-Pace, H. Mathian, D. Pumain, and L. Sanders. Multi-agents system and the dynamics of a settlement system. *Geographical Analysis*, 28(2) :162–178, 1996.
- [33] J. Cambon. *Vers une méthodologie de mesure de la performance des systèmes de management de la santé-sécurité au travail*. PhD thesis, École des Mines de Paris, 2007.
- [34] R. Cans. Catastrophes : les secours grippés, le monde, 27 avril 1988. <http://www.patricklagadec.net/fr/pdf/clsg.pdf>.
- [35] CERTU. Méthodes d'estimations de population - Comparaison et seuils de validité et morphologie du bâti, Collection Les Rapports d'Étude, Lyon, Centre d'études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques 2005.
- [36] J. Chakraborty, G. A. Tobin, and B. E. Montz. Population evacuation : Assessing spatial variability in geophysical risk and social vulnerability to natural hazards. *Natural Hazards Review*, 6(1) :23–33, 2005.
- [37] H. Chamussy. Les géographes au risque de la complexité. *Géocarrefour*, 78(1) :61–70, January 2003.

- [38] H. Chaté and G. Grégoire. La forme des groupements animaux. *Pour la Science - Les formes de la vie*, HS-44 :57–61, 2004.
- [39] R.L. Church and T.J. Cova. Modelling community evacuation vulnerability using gis. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(8) :763–784, 1997.
- [40] R.L. Church and T.J. Cova. Mapping evacuation risk on transposition networks using a spatial optimization model. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 8(1-6) :321–336, 2000.
- [41] A. Clauset, M. E. J. Newman, and C. Moore. Finding community structure in very large networks. *Physical review. E* 70, 6 :066111.1–066111.6, 2004.
- [42] J.F. Coulombel. Modélisation du trafic routier : une brève introduction. Technical report, Laboratoire de mathématiques Paul Painlevé. Université Lille 1, 2006.
- [43] S.L. Cutter, J.T. Mitchell, and M.S. Scott. Revealing the vulnerability of people and places : a case study of Georgetown County, South Carolina. *Annals of the Association of American Geographers*, 90(4) :713–737, 2000.
- [44] Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels (BARPI). L'accident de Seveso : rejet à l'atmosphère de dioxines dans une usine chimique à Meda (Italie), le 10 juillet 1976, Février 2008.
- [45] Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels (BARPI). Explosion dans une usine d'engrais le 21 septembre 2001. Grande Paroisse Toulouse - [Haute-Garonne] France, Mars 2009.
- [46] L. Danon, J. Duch, A. Arenas, and A. Díaz-guilera. Comparing community structure identification. *Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment*, 9008 :09008, 2005.
- [47] E. Daudé. *Systèmes multi-agents pour la simulation en géographie : vers une Géographie Artificielle*, chapter 13, pages 355–382. Hermès, Paris, 2005.
- [48] A. Dauphiné. *Les théories de la complexité chez les géographes*. Economica, September 2003.
- [49] A. Dauphiné. *Risques et catastrophes : Observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Armand Colin, September 2003.
- [50] A. Dauphiné. *Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Armand Colin, Paris, 2003.

-
- [51] Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie. Lutte contre les inondations. Méthode sommaire d'évaluation des critères économiques. Technical report, Direction de la Prévention des Pollutions, Service de l'Eau, Sous-Direction des Eaux Continentales, 1980.
- [52] Direction de l'Information Légale et Administrative (DILA). La prévention des risques technologiques et industriels majeurs (1976-2001), juillet 2004.
- [53] J. de Rosnay. *Le Macroscopie, vers une vision globale*. Seuil, 1975.
- [54] F. de Saussure. *Cours de linguistique générale*. Payot, Geneva, 1931.
- [55] Groupe de travail Canada États-Unis sur la panne de courant. Rapport final sur la mise en oeuvre des recommandations du groupe de travail, Septembre 2010.
- [56] Office des Risques Majeurs de l'Estuaire de la Seine (ORMES). Plan particulier d'intervention (ppi).
- [57] Centre d'Etudes sur les Réseaux les Transports l'Urbanisme et les constructions publiques (CERTU). L'enquête ménage-déplacements " standard CERTU ", 2006.
- [58] R. Diestel. *Graph theory (Graduate Texts in Mathematics)*. Springer, 2005.
- [59] Les Echos. Feyzin, Seveso, Bhopal : les enseignements tirés des catastrophes, 17 Mars 1999.
- [60] I. Eckerman. The Bhopal saga : causes and consequences of the world's largest industrial disaster. University Press, New Delhi, India, 2005.
- [61] A. Stanley Eddington. *Espace, temps et gravitation*. J. Hermann, 1921.
- [62] M.S. EL Hmam, H. Abouaissa, and D. Jolly. Modélisation hybride du flux de trafic. In *e-STA, SEE - Société de l'Electricité, de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication, e-STA*, 2006.
- [63] S. Ephimenco. L'inondation de la zélande en février 1953 demeure dans toutes les mémoires. <http://www.liberation.fr/evenement/0101134046-l-inondation-de-la-zelande-en-fevrier-1953-demeure-dans-toutes-les-memoires>, 2 Février 1995.
- [64] P. Erdős and A. Rényi. On Random Graphs. *Publicationes Mathematicae*, 6 :290 – 297, 1959.
- [65] T. Lay et al. The Great Sumatra-Andaman Earthquake of 26 December 2004. *Science*, 308(5725) :1127–1133, 2005.

- [66] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos. On power-law relationships of the internet topology. In *the international ACM conference SIGCOMM*, pages 251–262, 1999.
- [67] F.R. Farmer. Today's risks : thinking the unthinkable. *Nature*, 267 :92–93, 1977.
- [68] L. Fèbvre. Pour l'histoire d'un sentiment : le besoin de sécurité. *Annales, Économies, sociétés, civilisations*, 11, 1956.
- [69] C.M Fiduccia and R.M. Mattheyses. A linear-time heuristic for improving network partitions. In *Design Automation, 1982. 19th Conference*, volume 175-181, 1982.
- [70] M. Fiedler. Algebraic connectivity of graphs. *Czechoslovak Math*, 23 :298–305, 1973.
- [71] J. W. Forrester. *Urban Dynamics*. MIT Press, February 1969.
- [72] S. Fortunato and M. Barthélemy. Resolution limit in community detection. In *Proc Natl Acad Sci USA*, volume 104, pages 36–41, 2006.
- [73] S. Fortunato, V. Latora, and M. Marchiori. Method to find community structures based on information centrality. *Physical Review E*, 70 :056104, 2004.
- [74] J. Franzolini, F. Guinand, D. Olivier, and Y. Pigné. Information gathering and sharing in dt-manets. In *International Conference on Pervasive Services (ICPS'2008, Demo session)*, Sorrento, Italy, 2008.
- [75] L.C. Freeman. A set of mesures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, 40 :35 – 41, 1977.
- [76] L.C. Freeman. Centrality in social networks : conceptual classification. *Social networks*, 1(3) :215–239, 1979.
- [77] J. Frot. Les causes de l'événement Tchernobyl, Novembre 2000.
- [78] M. Girvan and M.E.J Newman. Community structure in social and biological networks. *Proc Natl Acad Sci USA*, 99(12) :7821–7826, 2002.
- [79] J.F. Gleyze. Fonctionnalité et vulnérabilité des réseaux de transport. Le cas du métro parisien. In *6ème Rencontres de Théo Quant*, page 13, 2003.
- [80] J.F. Gleyze. *La vulnérabilité structurelle des réseaux de transports dans un contexte de risque*. PhD thesis, Université Paris VII Laboratoire COGIT-IGN, 2005.
- [81] J. P. Gout. *Prévention et gestion des risques majeurs. Les risques d'origine naturelle*. Les éditions de l'environnement, 1993.

-
- [82] M. Gralepois. *Les risques collectifs dans les agglomérations françaises. Contours et limites d'une approche territoriale de prévention et de gestion des risques à travers le parcours des agents administratifs et locaux*. PhD thesis, Université Paris-Est, 2008.
- [83] A. Hale, F. Guldenmund, and L. Bellamy. An audit method for the modification of technical risk assessment with management weighting factors. In *International Association for Probabilistic Safety Assessment and Management 4*, pages 13 – 19, 1998.
- [84] M.S. El Hmam, H. Abouaïssa, D. Jolly, and A. Benasser. Simulation hybride de flux de trafic basée sur les systèmes multi-agents. In *International Association for Probabilistic Safety Assessment and Management 4*. In 6e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation - MOSIM 06, 2006.
- [85] C. S. Holling. Engineering resilience vs. ecological resilience. In *Engineering Within Ecological Constraints*, pages 32–43. P. C. Schulze, Washington, D.C., national academy press edition.
- [86] C. S. Holling. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1) :1–23, 1973.
- [87] E. Hollnagel. *Barriers and accident prevention*. Ashgate, 2004.
- [88] R. Holzmann, L. Sherburne-Benz, and E. Tesliuc. Gestion du risque social : la banque mondiale et la protection sociale dans un monde en voie de mondialisation. *Tiers-Monde*, 44(175) :501 – 526, 2003.
- [89] Territoires Conseil Associés Hydratec, SIEE. Évaluation des dommages liés aux crues en région ile-de-france. Technical report, 1998.
- [90] J. Jacobs. *The Death and Life of Great American Cities*. Random House, December 1992.
- [91] J. Jacobs. *The Death and Life of Great American Cities*. Vintage, December 1992.
- [92] A. K. Jain, M. N. Murty, and P. J. Flynn. Data clustering : a review. *ACM Comput. Surv.*, 31(3) :264–323, 1999.
- [93] C.A Janeway, P. Travers, M. Walport, and M. Shlomchik. *Immunobiology - International Editon : The Immune System in Health and Disease*. Harcourt Publishers Ltd, 2001.
- [94] B. W. Kernighan and S. Lin. An efficient heuristic procedure for partitioning graphs. *Bell System Technical Journal*, 49(2) :291–308, 1970.

- [95] J. Kim. Making Sense of Emergence. *Philosophical studies*, 95 :3–36, 1999.
- [96] J. Kleinberg. Navigation in a small world. *Nature*, 406 :845, 2000.
- [97] D. Krajzewicz. Using the road traffic simulation "sumo" for educational purposes. In *German Aerospace Centre*, 2004.
- [98] S. Krauß. *Microscopic Modeling of Traffic Flow : Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*. PhD thesis, University of Cologne, Germany, 1997.
- [99] P. Lagadec. *La civilisation du risque. Catastrophes technologiques et responsabilité sociale*. Pergamon Press, Paris, 1981.
- [100] A. Langlois and M. Phipps. *Automates cellulaires : Application à la simulation urbaine*. Hermes Sciences Publicat., April 1997.
- [101] J.L. Le Moigne. *La modélisation des systèmes complexes*. Bordas, 1990.
- [102] C. Lesclingand. Nevado del Ruiz, 13 novembre 1985, des lahars dans la ville. *L.A.V.E*, 1, 1986.
- [103] A. Leveau-Vallier. Bhopal : « après 25 ans, le nombre des victimes augmente ». [http ://www.rue89.com/2010/06/13/bhopal-apres-25-ans-le-nombre-des-victimes-augmente-154696](http://www.rue89.com/2010/06/13/bhopal-apres-25-ans-le-nombre-des-victimes-augmente-154696), 13 juin 2010.
- [104] M.J. Lighthill and G. B. Whitham. On kinematic waves II. A theory of traffic flow in long crowded roads. In *Proceedings of the Royal Society A 229*, pages 317 – 345, 1955.
- [105] C. Liu and M. Tuttle. Emergency evacuation plan maintenance. In *Encyclopedia of GIS*, pages 267–271. Springer, 2008.
- [106] L. Lovász. Random walks on graphs : a survey. *Combinatorics, Paul Erdős is Eighty*, 2 :1–46, 1993.
- [107] Time Magazine. Spain : It was like napalm. [http ://www.time.com/time/magazine/article/0,9171,946862,00.html](http://www.time.com/time/magazine/article/0,9171,946862,00.html), July 24 1978.
- [108] L. Magne, S. Rabut, and J. F. Gabard. Toward an hybrid macro and micro traffic flow simulation model. In *INFORMS spring 2000 meeting*, 2000.
- [109] F. Mancebo. Katrina et la Nouvelle-Orléans : entre risque "naturel" et aménagement par l'absurde. *Cybergeo*, 353, 2006.
- [110] A.H. Maslow. *Vers une psychologie de l'Être*. Fayard, Paris, 1972.

-
- [111] H. R. Maturana and F. Varela. *L'arbre de la connaissance*. Addison-Wesley, 1994.
- [112] I. Merle. *La fiabilité à l'épreuve du feu. La prévention des risques d'accidents majeurs dans une usine Seveso II*. PhD thesis, Institut d'études Politiques de Paris, 2010.
- [113] J. Merleau-Ponty. *Philosophie et théorie physique chez Eddington*. Presses Univ. Franche-Comté, 1965.
- [114] DERAL Midi-Pyrénées. Campagne d'information 2004-2009 sur les risques industriels majeurs, en Midi-Pyrénées. "Nous devons savoir pour réagir", Janvier 2005.
- [115] J.L. Le Moigne, E. Morin, and Collectif. *Intelligence de la complexité : Epistémologie et pragmatique - Colloque de Cerisy*. Éditions de l'Aube, February 2007.
- [116] A. Moine. Le territoire comme un système complexe : un concept opératoire pour l'aménagement et la géographie. *L'espace géographique* 2, pages 115–132, 2006.
- [117] Perspective Monde. 29 août 2005, déferlement de l'ouragan katrina sur le sud des États-unis. <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/bmeve?codeeve=937>.
- [118] E. Morin. *La méthode - 1 - La nature de la nature*. Seuil, Nouvelles Éditions, 1981.
- [119] E. Morin. *Introduction à la pensée complexe*. ESF éditeur, 1990.
- [120] Alertes Météo. L'Éruption Du Nevado Del Ruiz, 08 Octobre 2008.
- [121] M. Nabaa, C. Bertelle, A. Dutot, D. Olivier, and P. Lions. Exploitation of a displacement survey to detect road network use vulnerability. In *3rd International Conference on Complex Systems and Applications (ICCSA'09)*, pages 151–155, 2009.
- [122] M. Nabaa, C. Bertelle, A. Dutot, D. Olivier, and P. Mallet. Communities detection algorithm to minimize risk during an evacuation. In *Systems Conference, 2010 4th Annual IEEE*, pages 323 – 328, 2010.
- [123] R. Najlis and M. J. North. Repast for GIS. University of Chicago and Argonne National Laboratory, IL, USA, 2004. In *Proceedings of Agent 2004 : Social Dynamics : Interaction, Reflexivity and Emergence*.
- [124] M. E. J. Newman. Detecting community structure in networks. *Eur. Phys. J.*, 38 :321–330, 2004.
- [125] M. E. J. Newman. Fast algorithm for detecting community structure in networks. *Phys. Rev.*, 69 :066133, 2004.

- [126] M. E. J. Newman and M. Girvan. Finding and evaluating community structure in networks. *Phys. Rev. E*, 69(2) :026113, Feb 2004.
- [127] news.cn. Chine/inondations : rupture d'une digue de la rivière fuhe. http://french.news.cn/environnement/2010-06/23/c_13365009.htm, 23 juin 2010.
- [128] Department of Geological Sciences at San Diego State University (CSU). How volcanoes work - nevado del ruiz eruption (1985). http://www.geology.sdsu.edu/how_volcanoes_work/, September 2008.
- [129] Deltawerken online. Les inondations de 1953 (consulté le 16/02/2011). <http://www.deltawerken.com/les-inondations-de-1953/1537.html>, 2004.
- [130] Deltawerken online. Les inondations de la Sainte-Elizabeth (consulté le 16/02/2011). <http://www.deltawerken.com/Les-inondations-de-la-Sainte-Elizabeth/1103.html>, 2004.
- [131] D. C. Parker. Integration of geographic information systems and agent-based models of land use. *D. J. Maguire, M. F. Goodchild, and M. Batty, eds. GIS, Spatial Analysis and Modeling. ESRI Press, Redlands, CA.*, pages 403–422, 2005.
- [132] H.J. Payne. Models of freeway traffic and control. *Mathematical Models of Public Systems*, 1(1) :51 – 61, 1971.
- [133] M. Pidd, F.N. de Silva, and R.W. Eglese. A simulation model for emergency evacuation. *Eur. J. Oper. Res.*, 90(3) :413–419, 1996.
- [134] T. C. Pierson, R. J. Janda, J. C. Thouret, and C. A. Borrero. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1 - 4) :17 – 66, 1990.
- [135] S. L. Pimm. The complexity and stability of ecosystems. *Nature*, 307(5949) :321–326, January 1984.
- [136] P. Pons. Détection de structures de communautés dans les grands réseaux d'interactions. Giens, France, 2005. Septièmes Rencontres Francophones sur les aspects Algorithmiques des Télécommunications.
- [137] P. Pons. *Détection de communautés dans les grands graphes de terrain*. PhD thesis, Université Paris 7- Denis Diderot, 2007.
- [138] P. Pons and M. Latapy. Computing communities in large networks using random walks. *Journal of Graph Algorithms and Applications*, 10(2) :191–218, 2006.

-
- [139] I. Prigogine. *Le loi du chaos*. Flammarion, Janvier 1999.
- [140] I. Prigogine and I. Stengers. *Order out of Chaos. Man's New Dialogue with Nature*. Harper Collins Publications, New-York, 1985.
- [141] P. Périllon. MOSAR : présentation de la méthode. Techniques de l'Ingénieur, traité sécurité et gestion des risques, Octobre 2003.
- [142] D. Provitolo. *Risque urbain, catastrophes et villes méditerranéennes*. PhD thesis, Université de Nice Sophia-Antipolis, UMR 6012 ESPACE, Janvier 2002.
- [143] D. Provitolo. Structural and dynamic complexities of risk and catastrophe systems : an approach by system dynamics modelling. In *Actes du colloque international The European Simulation and Modelling conference*, Toulouse, 2006.
- [144] D. Provitolo. A proposition for a classification of the catastrophe systems based on complexity criteria. In *European Conference Complex Systems-EPNACS 07, Emergent Properties*, Dresden, 2007. In Natural and Artificial Complex Systems.
- [145] D. Provitolo, J. P. Müller, and E. Dubos-Paillard. Validation of an ontology of risk and disaster through a case study of the 1923 great kanto earthquake. In Xinzhi Liu Cyrille Bertelle and M.A Aziz-Alaoui (Eds), editors, *ICCSA Proceedings Special Sessions 3rd International Conference on Complex Systems and Applications*, pages 140–150, Le Havre France, 2009.
- [146] D. Provitolo, J. P. Müller, and E. Dubos Paillard. Ontologie des risques et des catastrophes : quelques pistes de réflexion. XVI èmes rencontres de Rochebrune, Du 19 au 23 janvier 2009, Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, 2009.
- [147] D. Provitolo, J.P. Müller, and E. Dubos-Paillard. Vers une ontologie des risques et des catastrophes : le modèle conceptuel. In *Journées de Rochebrune : Rencontres Interdisciplinaires sur les Systèmes Complexes Naturels et Artificiels*, page 16, Rochebrune, France, January 2009.
- [148] D. Pumain. Une approche de la complexité en géographie. *Géocarrefour*, 78(1) :25–31, January 2003.
- [149] F. Radicchi, C. Castellano, F. Cecconi, V. Loreto, and D. Parisi. Defining and identifying communities in networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(9) :2658–2663, March 2004.
- [150] E. Ravasz and A. L. Barabási. Hierarchical organization in complex networks. *Physical Review E* 67, 026112, 2003.

- [151] E. Ravasz, A. L. Somera, D. A. Mongru, Z. N. Oltvai, and A. L. Barabási. Hierarchical organization of modularity in metabolic networks. *Science*, 297 :1551–1555, 2002.
- [152] SAFER Real-time. Guide de l'administrateur, version 9, 97p.
- [153] J. Reason. A systems approach to organizational error. *Ergonomics*, 38(8) :1708 – 1721, 1995.
- [154] J. Reason. *Managing the Risks of Organizational Accidents*. Aldershot, UK : Ashgate, 1997.
- [155] M. Reghezza. *Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine : la métropole parisienne face au risque de crue centennale*. PhD thesis, Université Paris x - Nanterre, 2006.
- [156] C.W. Reynolds. Flocks, Herds, and Schools : A Distributed Behavioral Model. *Computer Graphics*. volume 21(4), pages 25–34. SIGGRAPH 87 Conference, 1987.
- [157] M. Roux. *Géographie et complexité : les espaces de la nostalgie*. Editions L'Harmattan, 1999.
- [158] L. Sanders. Les modèles agent en géographie urbaine. In Phan D. Amblard F., editor, *Modélisation et simulation multi-agents ; applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, pages 151–168. Hermes-Lavoisier, 2006.
- [159] S. E. Schaeffer. Graph clustering. *Comuter science review*, 1 :27 – 64, 2007.
- [160] T. C. Schelling. Models of segregation. *The American Economic Review*, 59(2) :488–493, May 1969. ArticleType : research-article / Issue Title : Papers and Proceedings of the Eighty-first Annual Meeting of the American Economic Association / Full publication date : May, 1969 / Copyright © 1969 American Economic Association.
- [161] D. Serre. *Évaluation de la performance des digues de protection contre les inondations. Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique*. PhD thesis, Université de Marne-La-Vallée, 2005.
- [162] R. Simon. *Éthique de la responsabilité*. Cerf, April 1993.
- [163] Z. Sinuany-Stern and E. Stern. Simulating the evacuation of a small city : The effects of traffic factors. *Socio. Econ. Plan. Sci.*, 27(2) :97–108, 1993.
- [164] E. Steiger. L'ouragan Katrina : les leçons d'un échec. Les faiblesses du dispositif de sécurité intérieure des États-Unis. [http ://www.diploweb.com/L-ouragan-Katrina-les-lecons-d-un.html](http://www.diploweb.com/L-ouragan-Katrina-les-lecons-d-un.html), 1 janvier 2008.

-
- [165] E. Stern, Z. Sinuany-Stern, and Z. S. Holm. Congestion-related information and road network performance. *J. Transport Geogr*, 4(3) :169–178, 1996.
- [166] Safer system. Safer real-time brochure, 2009.
- [167] T. Tang and M. Wannemacher. GIS Simulation and Visualization of Community Evacuation Vulnerability in a Connected Geographic Network Model. In *Middle States Geographer*, volume 38, pages 22–30, 2005.
- [168] A. Villemeur. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. In *Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France*. Éditions Eyrolles, 1988.
- [169] H. Walter. *L'aventure des langues en occident*. Robert Laffont, 1994.
- [170] J.H. Ward. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Amer. Stat. Assoc*, 58 :236–244, 1963.
- [171] W. Weaver. Science and complexity. *American Scientist*, 36(4) :536, 1948.
- [172] B. Wilpert and B. Fahlbruch. *Safety related interventions in inter-organisational fields*, chapter 14, pages 235 – 248. Pergamon, 1998.
- [173] A.G. Wilson. *Catastrophe Theory and Bifurcation : Applications to Urban and Regional Systems*. University of California Press, July 1981.
- [174] S. Wolfram. Universality and complexity in cellular automata. *Physica D*, 10 :91–125, 1984.