



HAL
open science

Extrêmes hydro-météorologiques et exposition sur les routes : Contribution à MobRISK : modèle de simulation de l'exposition des mobilités quotidiennes aux crues rapides

Mohamed Saif Shabou

► To cite this version:

Mohamed Saif Shabou. Extrêmes hydro-météorologiques et exposition sur les routes : Contribution à MobRISK : modèle de simulation de l'exposition des mobilités quotidiennes aux crues rapides. Sciences de la Terre. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. NNT : 2016GREAU031 . tel-01562815

HAL Id: tel-01562815

<https://theses.hal.science/tel-01562815>

Submitted on 17 Jul 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE la Communauté UNIVERSITÉ
GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **Géographie**

Arrêté ministériel : 7 Août 2006

Présentée par

Saif Shabou

Thèse dirigée par **Céline Lutoff**
et codirigée par **Isabelle Ruin**

préparée au sein **des laboratoires PACTE et LTHE**
et de **l'école doctorale TUE**

Extrêmes hydro-météorologiques & Exposition sur les routes

Contribution à *MobRISK* : Modèle de simulation de l'exposition des mobilités quotidiennes aux crues rapides

Thèse soutenue publiquement le **27 Octobre 2016**,
devant le jury composé de :

Mme, Anne-Catherine Favre

Professeure - Grenoble Institut National Polytechnique, UMR LTHE, Présidente

M, Thomas Thévenin

Professeur - Université de Bourgogne, Rapporteur

M, Emmanuel Bonnet

Chargé de recherche - IRD, UMI Résiliences, Rapporteur

Mme, Christiane Weber

Dir. de Recherche - Université de Strasbourg, Examinatrice

Mme, Karine Weiss

Professeure - Université de Nîmes, Examinatrice

Mme, Sandrine Depeau

Chargée de recherche - CNRS, Université de Rennes 2, Examinatrice

Mme, Céline Lutoff

Maître de conférences - Université de Grenoble Alpes, UMR PACTE, Directeur
de thèse

Mme, Isabelle Ruin

Chargée de recherche - CNRS, UMR LTHE, Grenoble, Co-Directeur de thèse



Remerciements

Je souhaite remercier en premier lieu mes deux directrices de thèse **Céline LUTOFF** et **Isabelle RUIN** pour leurs qualités scientifiques et humaines. Tout au long de la thèse, elles ont su orienter mes travaux et mes réflexions tout en me laissant l'autonomie suffisante pour suivre ma curiosité. Merci Céline de m'avoir proposé ce sujet passionnant et de m'avoir accompagné tout au long de la thèse par tes précieux conseils. Merci Isabelle pour ton aide au quotidien, pour ta réactivité et pour tes encouragements à me former et à explorer les différentes pistes que j'ai proposé.

Je tiens ensuite à adresser mes remerciements aux membres de mon jury. D'abord aux rapporteurs de mon travail, **Thomas Thévenin** et **Emmanuel Bonnet**, pour leurs pertinents commentaires et suggestions. Les examinatrices de mon manuscrit, **Christiane Weber**, **Karine Weiss** et **Sandrine Depeau**, qui ont témoigné leur intérêt à mon travail et partagé leurs remarques instructives. C'est un véritable honneur que de tels chercheurs aient accepté d'évaluer mes travaux.

Je souhaite aussi remercier **Sonia Chardonnel** et **Hervé Andrieu** qui ont fait partie des membres de mon comité de thèse. Merci Sonia de m'avoir guidé dans les travaux en Time Geography.

J'ai eu la chance de faire une thèse dans le cadre du projet **MobiClimEx** financé par l'**Agence Nationale de Recherche**. J'aimerais alors remercier tous les membres du projet pour les différents échanges intéressants qu'on a eu pendant les réunions. Je souhaite aussi remercier l'équipe du projet **HYMEX** qui m'a permis de tisser des liens avec plusieurs personnes travaillant sur les extrêmes hydro-météorologiques ainsi que toutes les personnes que j'ai rencontré pendant les enquêtes de retour d'expériences effectuées dans le sud de la France. Parmi ces personnes, j'aimerais remercier particulièrement **Olivier Payrastre** qui m'a éclairé sur plusieurs points concernant les travaux effectués sur les coupures des routes.

Je souhaite également remercier tous les collègues des deux laboratoires **PACTE** et **LTHE** avec qui j'ai pu échanger pendant les trois années de thèse. Je remercie particulièrement **Jean Dominique Creutin** pour ses précieux conseils qui ont fortement orienté mes travaux. Je souhaite adresser mes grands remerciements aux deux ingénieurs informatiques

qui se sont succédés pour assurer le développement informatique du modèle MobRISK. Merci **Samuel Debionne** pour tout ce que tu m'as fait découvrir en informatique et pour les agréables moments de travail qui nous ont permis de réussir ce travail. Merci **Xavier Beaufls** pour ta motivation impressionnante et ton enthousiasme pour poursuivre le développement de l'outil et d'assurer son bon fonctionnement.

Pendant ces trois années de thèse, j'ai partagé mon quotidien avec l'équipe **HMCIS** du LTHE. Je remercie tous les membres de l'équipe : **Sandrine Anquetin** pour ses remarques instructives, **Anne-Catherine Favre** et **Juliette Blanchet** pour leurs soutiens en statistiques, **Benoit Hingray** avec qui j'ai partagé mon bureau les deux premières années de ma thèse, **Brice Boudevillain** et **Guy Delrieu** qui ont été très collaboratifs pour m'aider à exploiter les données de l'OHMCV, **Bruno Wilhelm**, **Gilles Molinié**, **Sandra Rome** et **Karine Beranger** pour leurs conseils lors de mes présentations au sein du laboratoire.

Et bien-sur je remercie tous les doctorants et les post-doctorants avec qui j'ai partagé des moments inoubliables : **Damien**, **Aurélien**, **Galatea**, **Audrey**, **Victor**, **Baptiste**, **Gildas**, **Adeline**, **Stéphanie**, **Mélody**, **Jeremy**, **Olivier** et **Guillaume**.

Enfin je remercie mes amis proches qui m'ont encouragé durant cette aventure et qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours : depuis l'école d'Architecture en Tunisie, passant par le master de Psychologie Environnementale à Nîmes et finissant par cette thèse en Géographie. Je remercie particulièrement **Jihene Ben Jannet** et **Aymen Montassar** pour votre soutien moral.

Et bien-sûr, je souhaite finir par remercier mes parents et mon frère qui n'ont pas hésité à m'aider pendant tout mon parcours et qui ont cru en moi.

Résumé

Les crues rapides sont considérées parmi les catastrophes naturelles les plus dangereuses en raison de leur imprévisibilité et la rapidité de leurs dynamiques spatio-temporelles. Même si ces évènements touchent généralement des petites étendues spatiales, elles causent un nombre important de victimes. Les différentes analyses des impacts des crues rapides pointent la mobilité quotidienne comme un facteur principal augmentant l'exposition et la vulnérabilité des individus : près de la moitié des victimes sont des automobilistes surpris par les submersions des routes durant leurs trajets quotidiens. C'est dans ce contexte que plusieurs travaux ont été conduits afin de développer des outils de prévision des coupures des routes par submersion dans le département du Gard, fréquemment exposé à des évènements hydro-météorologiques extrêmes. Ces études ont permis d'identifier les points de coupure, situés aux niveaux des intersections routes/rivières, vulnérables aux crues rapides et de développer des méthodes d'estimation du risque de submersion des routes.

Cette thèse s'inscrit dans la continuité de ces travaux dans le but de quantifier et de caractériser l'exposition des individus aux crues rapides durant leurs mobilités. Pour cela, nous avons contribué au développement de *MobRISK* : un modèle de simulation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes lors d'évènements de crues rapides. Une première application de *MobRISK* est présentée dans le but d'évaluer l'exposition d'une population d'une zone d'étude, située au nord-ouest du Gard, à l'évènement de crue rapide des 8-9 Septembre 2002.

Les résultats de ce cas d'étude ont permis d'identifier un décalage entre les dynamiques temporelles du trafic simulé au niveau des points de coupure et des niveaux de submersion de ces points. Ce décalage temporel a probablement constitué un facteur de réduction du nombre de victimes sur la route. La combinaison des estimations de submersion des routes avec le trafic simulé a permis de localiser les routes qui ont présenté le plus de danger pour les automobilistes lors de cet évènement. Ensuite, l'évaluation de l'exposition individuelle aux submersions routières a permis d'identifier les profils socio-démographiques des automobilistes les plus exposés constitués majoritairement de jeunes actifs de sexe masculin.

Enfin, différents scénarios de comportements en situation de crise ont été construits et testés à travers l'intégration des décisions d'adaptation des déplacements face aux perturbations environnementales. La comparaison des effets des scénarios de comportements a permis de souligner le rôle important des règles adoptées dans les prises de décision et dans l'évaluation du danger dans la réduction l'exposition des automobilistes.

Au final, cette thèse souligne les potentialités et les performances de *MobRISK* comme un outil innovant et prometteur pour la simulation de l'exposition sociale aux crues.

Mots clés : Exposition ; Submersion des routes ; Crues rapides ; Comportements de mobilité ; Décisions d'adaptation.

Abstract

Flash floods are considered as ones of the most dangerous natural hazard due to their rapidness and suddenness that leave little time for exposed people to protect themselves. Although the relatively small spatial extension of those events, several studies showed strong human impacts regarding the number of affected people. Recently, daily mobility is pointed at as important social factor increasing individual exposure and vulnerability to flash flooding : almost half of the victims are motorists trapped while travelling on flooded roads. Therefore, several studies have been conducted for assessing roads' sensitivity to flooding in the Gard area, frequently exposed to sever flash flood events.

This thesis goes a step further by integrating social dimension in order to quantify and analyze road users' exposure to flash flood during their itineraries. It contributes to the development of *MobRISK* : A simulation model for assessing motorists' exposure to roads submersion by integrating individual travel-activity patterns and behavioral adaptation regarding weather disruptions. In order to assess population exposure to September 2002 flash flood event, we conducted an application of *MobRISK* in a study area located in the north-ouest of the Gard department.

The results show that risk of flooding is mainly located in principal road links with considerable traffic load. However, a lag time between the timing of roads' submersion and persons crossing these roads contributes to reduce the potential vehicle-related fatal accidents. It is also found that socio-demographic variables have significant effect on individual exposure and that young working males are the most exposed persons to road flooding. Finally, different behavior scenarios are built and tested by integrating individual travel adaptation decisions regarding perceived weather disruptions. The comparison of motorists' exposure for each scenario highlights the important role of risk attitudes and threat evaluation processes on reducing population exposure.

Thus, the proposed model demonstrates the benefits of considering spatiotemporal dynamics of population exposure to flash flood and presents an important improvement in exposure assessment methods. Such improved characterization of road users' exposure can

present valuable information for flood risk management services and emergency planning.

Key words : Exposure ; Road submersion ; Flash flood ; Mobility behavior ; Decision-making.

Table des matières

I	Introduction générale	1
1	Cadre général	1
2	Questions de recherche et objectifs	4
3	Structure de la thèse	7
II	Crues rapides et comportements de mobilité	9
1	Les crues rapides	10
2	Exposition sociale aux crues rapides	13
2.1	Terminologie	13
2.2	La mobilité : facteur d'exposition aux crues rapides	15
2.3	Les comportements de mobilité face aux perturbations météorologiques	16
2.3.1	Effets des conditions météorologiques sur la mobilité	17
2.3.2	Les facteurs d'adaptation des comportements de mobilité	18
3	Pour une modélisation de l'exposition des automobilistes aux crues rapides	22
3.1	Vulnérabilité du réseau routier aux crues rapides	23
3.1.1	Approches d'évaluation de la vulnérabilité du réseau routier	23
3.1.2	Vulnérabilité du réseau routier du Gard aux crues rapides	24
3.1.3	Positionnement de la thèse	27
3.2	Modélisation de la mobilité individuelle	27
3.2.1	Les différentes approches dans la modélisation de la mobilité	27
3.2.2	La composante comportementale dans les modèles de mobilité "activités-centrés"	29
3.2.3	Les variables qui déterminent les choix de mobilité	31
3.2.4	Positionnement de la thèse	32
3.3	Modélisation des processus de prise de décision en situation de crise	33
3.3.1	Difficultés de collecter des données d'observation	33
3.3.2	Les différentes théories et approches dans la modélisation de la prise de décision	34
3.3.3	Positionnement de la thèse	36

Table des matières

3.3.4	Les réseaux Bayésiens comme technique de modélisation des prises de décision	37
3.3.5	Avantages et limites de l'utilisation des réseaux Bayésiens dans la modélisation des décisions d'adaptation	42
3.4	Conclusion	43
4	Synthèse	45
III Le modèle <i>MobRISK</i>		47
1	Présentation générale du modèle	48
1.1	Objectifs	48
1.2	Cas d'utilisation	49
2	Architecture du modèle <i>MobRISK</i>	50
2.1	Simulateurs à événements discrets	50
2.1.1	Liste des <i>événements</i> considérés dans <i>MobRISK</i>	51
2.1.2	Déroulement des simulations	53
2.1.3	Construction des scénarios de simulations	54
2.2	Description des modules et de la base de donnée	55
2.2.1	Module de simulation des mobilités	55
2.2.2	Module de simulation des changements environnementaux	56
2.2.3	Module de simulation des décisions d'adaptation	56
2.2.4	Gestion de la base de données	58
3	Description des données utilisées	59
3.1	Données sociales	59
3.1.1	Données de recensement (<i>Rp</i> , <i>MOBPRO</i> , <i>MOBSCO</i>)	60
3.1.2	Données de déplacement (<i>ENTD</i>)	62
3.2	Données spatiales	63
3.2.1	Les unités administratives	64
3.2.2	Localisation des activités	66
3.2.3	Les données hydro-météorologiques	67
3.2.4	Le réseau routier	69
3.2.5	Les points de coupure	70
3.2.6	La submersion des routes	72
4	Description du cas d'étude	75
4.1	La zone d'étude	75
4.2	L'événement de crue rapide des 8-9 Septembre 2002	78
4.2.1	L'événement météorologique	79
4.2.2	L'événement hydrologique	82
4.2.3	Prévision	82
4.2.4	Les impacts	83

5	Synthèse	85
IV <i>MobRISK</i> comme outil de simulation de la mobilité routière quotidienne :		
	Cas d'étude	87
1	Effets des variables socio-démographiques sur les comportements de mobilité	89
2	Méthodes d'analyse de séquences	90
2.1	Champs d'application	90
2.2	Comparaison des séquences	91
2.3	Effets des variables catégorielles sur les dissimilarités entre les séquences	92
3	Analyse des données de mobilités dans la région Languedoc-Roussillon	95
3.1	Analyse des déplacements	95
3.2	Analyse des séquences d'activités : visualisation	98
3.3	Effets des variables socio-démographiques sur les dissimilarités des séquences d'activités	101
3.4	Analyse par arbres de régression et construction de règles d'attribution de séquences d'activités	103
3.5	Évaluation des règles d'attribution des séquences d'activités	108
4	Application du modèle d'attribution d'emplois du temps à la population d'Alès	111
4.1	Mobilité simulée	111
4.2	Évaluation de la mobilité simulée	113
4.2.1	Évaluation des durées des trajets :	113
4.2.2	Évaluation du trafic journalier simulé	115
5	Conclusions et perspectives	117
6	Synthèse	121
V <i>MobRISK</i> comme outil de simulation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes : Cas d'étude		
	aux submersions des routes : Cas d'étude	123
1	Introduction	124
2	Dynamiques spatio-temporelles de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes	125
2.1	Simulation du trafic aux points de coupure	125
2.1.1	Simulation de la submersion des routes pendant l'évènement de 2002	127
2.1.2	Coïncidence entre dynamiques des mobilités et des submersions aux points de coupure	127
3	Effets des caractéristiques socio-démographiques sur le niveau d'exposition	131
3.1	Méthode de mesure de l'exposition individuelle	131
3.2	Résultats	132
4	Conclusion et perspectives	135

VI	<i>MobRISK</i> comme outil de simulation des comportements d'adaptation des mobilités face à une crise hydro-météorologique	137
1	Développement d'un prototype de modèle de décision d'adaptation des comportements de mobilité	138
1.1	Structure globale du modèle de décision	138
1.2	Description des déclinaisons de la structure du modèle Bayésien	140
1.2.1	Évènement " <i>Bottleneck</i> "	140
1.2.2	Évènement " <i>Activity-end</i> "	142
1.2.3	Évènement " <i>Environmental cue</i> "	144
1.2.4	Évènement " <i>Broadcast</i> "	145
2	Construction des scénarios de décision	147
2.1	Objectifs	147
2.2	Méthode	148
3	Effets des règles de décision sur l'exposition	149
3.1	Construction d'attitudes-types	149
3.2	Résultats de l'implémentation des scénarios d'attitudes-types dans le cas d'étude d'Alès	151
3.2.1	Implémentation de la décision : " <i>HOME</i> "	151
3.2.2	Implémentation des décisions : " <i>STOP</i> " / " <i>DELAY</i> "	152
3.2.3	Comparaison des deux types de décisions d'adaptation	153
4	Effets de l'évaluation du danger sur l'exposition	154
4.1	Construction des scénarios d'évaluation du danger	155
4.2	Résultats de l'implémentation des scénarios d'évaluation du danger dans le cas d'étude d'Alès	155
4.2.1	Implémentation de la décision : " <i>HOME</i> "	156
4.2.2	Implémentation des décisions : " <i>STOP</i> " / " <i>DELAY</i> "	159
4.3	Apports de l'intégration de scénarios d'évaluation du danger	162
5	Synthèse	163
5.1	Principaux résultats	163
5.2	Limites	164
5.3	Perspectives	165
VII	Conclusion générale et perspectives	167
1	Conclusion générale	167
1.1	Rappel des objectifs	167
1.2	Principaux résultats	169
2	Perspectives	172
2.1	Améliorations du modèle <i>MobRISK</i>	172
2.2	Exploitation des potentialités du modèle <i>MobRISK</i>	175

Bibliographie	179
Annexe A Théorie des graphes et théorie des probabilités	189
1 Théorie des graphes	189
2 Notions de probabilités	190
Annexe B Mode de collecte des données ENTD	193
Annexe C Méthode d'Appariement Optimal	195
1 Description de la méthode	195
2 Le problème des coûts	196
Annexe D Paramètres du modèle de décision	199

Chapitre I

Introduction générale

1 Cadre général

Le cinquième rapport de synthèse produit par le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) met l'accent sur l'augmentation des phénomènes extrêmes et la multiplication des épisodes de fortes précipitations dans diverses régions comme l'une des conséquences probables du changement climatique. Il souligne aussi que la gravité des impacts des différents événements extrêmes ne tient pas seulement à l'aléa naturel, mais également à l'exposition et la vulnérabilité de la population et des biens à ces aléas (Pachauri et al., 2014).

Les inondations, et plus particulièrement les crues rapides, sont considérées parmi les événements hydro-météorologiques les plus dommageables en termes d'impacts humains et matériels. Elles se produisent généralement suite à des précipitations intenses, courtes et localisées sur des petits bassins versants engendrant une augmentation rapide de la hauteur d'eau et des débits dans les rivières (en quelques heures). Vu leur soudaineté et la complexité des dynamiques spatio-temporelles en cause, la prévision de ces crues reste une tâche délicate et incertaine. Ceci limite considérablement la mise en place et l'efficacité des systèmes d'alerte de la population et la gestion des interventions de protection des individus exposés aux crues rapides. Ces derniers peuvent alors être surpris par la montée de l'eau et se retrouver livrés à eux-mêmes pour y faire face. Les impacts humains des crues rapides sont souvent importants. Aux États Unis, par exemple, elles représentent les catastrophes naturelles qui engendrent le plus de victimes malgré leurs faibles étendues spatiales (Jonkman and Kelman, 2005). Les différents travaux d'analyse des impacts des crues rapides ont souligné le nombre important d'automobilistes qui se retrouvent piégés dans leurs véhicules au niveau de routes submergées (Diakakis and Deligiannakis, 2013; Jonkman and Kelman, 2005; Sharif et al., 2012; Terti et al., 2016). Ce constat a souligné la nécessité d'évaluer l'exposition du réseau routier et de ses usagers au risque de submersion brutale.

Introduction générale

En France, la région méditerranéenne, et plus particulièrement la région Languedoc-Roussillon, est fréquemment confrontée à des précipitations de forte intensité. La figure I.1 présente les départements les plus touchés par des épisodes de précipitations dépassant les 200 mm par jour sur la période 1966-2015. Les départements de la région Languedoc-Roussillon (Hérault, Gard, Lozère) et l'Ardèche sont les plus fréquemment touchés par ces épisodes de fortes précipitations. Ces épisodes sont observés en moyenne au moins 2 fois par an dans le département du Gard.

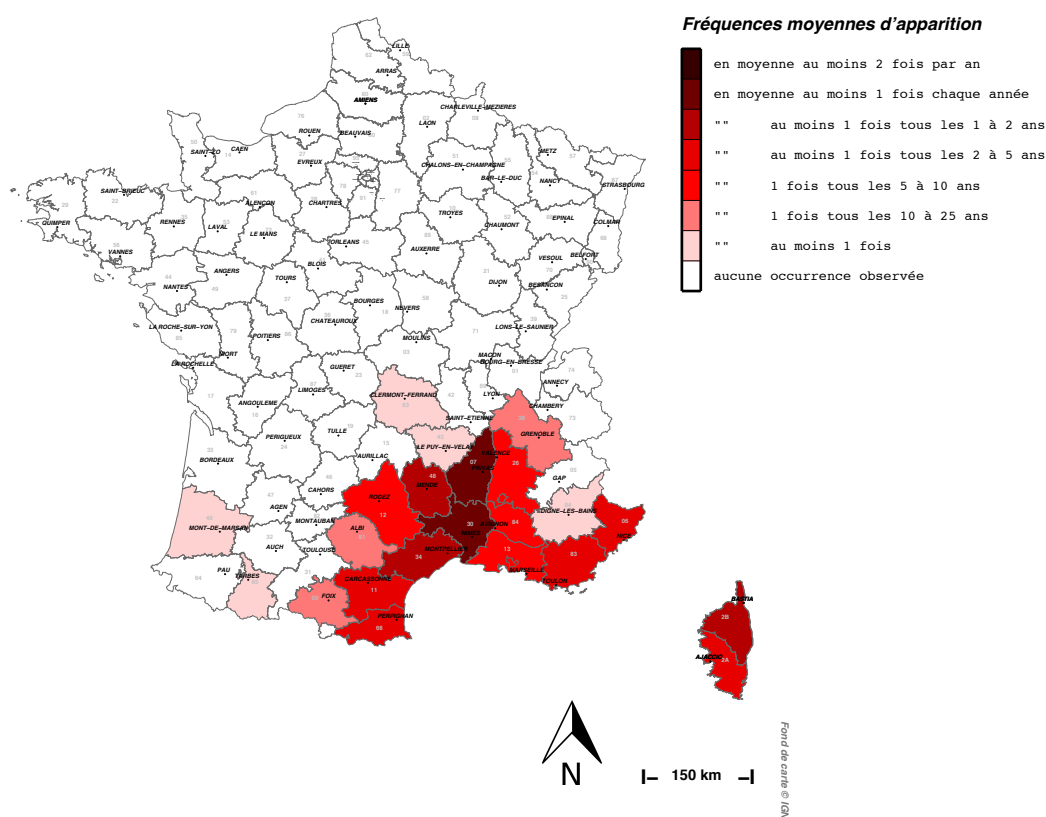


Figure I.1 Carte des occurrences observées de précipitations supérieures à 200mm par jour dans la période de 1966 à 2015. Source : Météo-France (2016)

Ces fortes précipitations engendrent souvent des crues rapides violentes et meurtrières dans cette région. Antoine et al. (2001) a recensé 67 crues meurtrières sur la période 1316-1999 en Languedoc-Roussillon (Lozère exclue) qui ont fait presque un millier de victimes. Parmi les événements historiques qui ont marqué le sud-est de la France ces 30 dernières années, on peut citer les inondations urbaines survenues à Nîmes le 3 Octobre 1988 (11 morts) et dans le Vaucluse à Vaison-la-Romaine en Septembre 1992, l'évènement qui a touché le département du Gard les 8 et 9 Septembre 2002 (23 morts), les crues de Draguignan dans le Var le 15 Juin 2010 (27 morts) et celles du 3 Octobre 2015 dans les Alpes-Maritimes (21 morts). Vu les dégâts considérables survenus sur les réseaux routiers lors de ces événements et l'importance

des enjeux qu'ils représentent en terme de danger pour la population et d'efficacité des opérations de secours, plusieurs travaux se sont intéressés aux processus de submersions routières. Ainsi, les efforts fournis par la Direction Départementale de l'Équipement du Gard dans le recensement des différentes routes submergées lors d'évènements passés ont permis de mieux caractériser la vulnérabilité du réseau routier du Gard aux crues rapides. Sur cette base, les travaux de Versini (2007) suivis par la thèse de Naulin (2012) dans le cadre du projet *PrediFlood* financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) ont permis de développer un outil de prévision des coupures de routes par submersion lors d'évènements de crue. Dans la continuité de ces efforts, le projet de recherche *MobiCLIMEX*, piloté par l'UMR Pacte, vise à intégrer la dimension sociale en s'intéressant à l'étude de la dynamique des mobilités quotidiennes et résidentielles face aux extrêmes hydro-météorologiques dans le département du Gard. Deux échelles de mobilité sont considérées : la mobilité résidentielle à long terme (s'intéressant aux choix résidentiels dans les zones inondables) et la mobilité quotidienne à court terme (en focalisant sur les choix de déplacements individuels lors d'évènements de crue) (Figure. I.2).

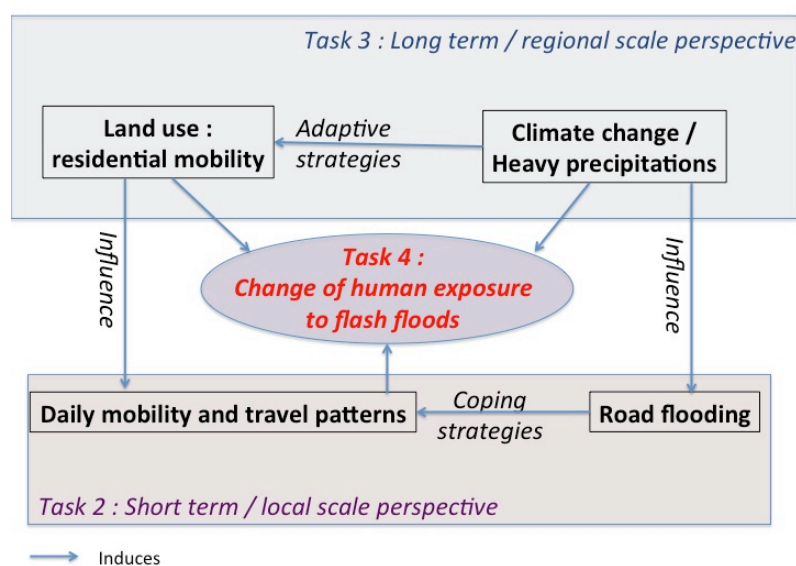


Figure I.2 Les différentes tâches du projet MobiCLIMEX

Cette thèse s'inscrit au niveau de la tâche 2 du projet *MobiCLIMEX* qui s'intéresse à l'évaluation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes survenues lors d'évènements de crues rapides. Cette tâche se base sur l'hydro-météorologie, la géographie et la psychologie environnementale pour étudier :

- **La submersion des routes lors des crues rapides** : Cette partie se réfère essentiellement aux effets des évènements hydro-météorologiques sur le réseau routier. Elle renvoie à l'étude des dynamiques spatio-temporelles des crues rapides et à la sensibilité des routes à cet aléa.

- ***Les comportements de mobilité quotidienne*** : L'évolution des modes de vie et de la distribution spatiale des zones d'activités a mis la mobilité au centre de notre vie quotidienne. Ceci a suscité un intérêt croissant dans l'analyse des comportements de mobilité traduit par la multitude des travaux réalisés en géographie et en psychologie environnementale. Face aux dangers liés aux submersions des routes suite aux événements de crues rapides, la compréhension de ces comportements de mobilité constitue une composante essentielle dans l'étude de l'exposition et la vulnérabilité de la population aux crues rapides (Ruin, 2007).
- ***Les décisions d'adaptation de la mobilité*** : Vu la difficulté d'anticipation et de prévision des événements de crues rapides, les individus sont souvent livrés à eux mêmes dans ces situations. Ils développent alors des stratégies d'adaptation de leurs déplacements et de leurs programmes d'activités qui peuvent réduire (ou augmenter) leur exposition aux submersions des routes. La prise en compte des différentes décisions individuelles d'adaptation de la mobilité face aux conditions hydro-météorologiques extrêmes est essentielle pour mieux caractériser l'exposition des automobilistes aux crues rapides.

2 Questions de recherche et objectifs

Les objectifs de ce travail de thèse sont d'ordres méthodologiques et applicatifs. Les objectifs méthodologiques concernent la définition d'une méthode et d'une démarche de travail qui permettent d'évaluer l'exposition des automobilistes aux submersions des routes lors de leurs trajets quotidiens. On essaiera alors de répondre à la question suivante :

Comment peut-on quantifier et caractériser l'exposition des automobilistes aux submersions des routes lors d'évènements de crues rapides ?

Notre approche de l'exposition repose en grande partie sur les travaux réalisés depuis 2004 par une équipe de recherche interdisciplinaire associant des chercheurs du *LTHE* et de *PACTE* dans le cadre de deux projets, l'un en collaboration avec la fondation *MAIF* (2004-2007) portant sur les facteurs de vulnérabilité humaine aux crues rapides dans le Gard, l'autre dans le cadre du projet ANR *ADAPTflood* (2009-2013) s'intéressant à l'observation et à l'analyse des comportements de mobilité associés aux épisodes de crues rapides. Le développement de cette thèse utilise les connaissances issues de :

- ***La collecte des données de comportements déclarés*** : Cette approche a été adoptée par Ruin (2007) et a consisté à la conduite d'enquêtes par questionnaire auprès d'un échantillon représentatif d'une part, de la population du Gard en 2004, d'autre part, des usagers de la route dans le secteur Nîmes-Alès en 2006. L'objectif de ces enquêtes était d'identifier les facteurs d'exposition et de vulnérabilité

des comportements en situation de crise liée à l'occurrence de crues rapides.

- *La collecte des données de retour d'expérience :*

Cette méthode consiste à mettre en place des enquêtes suite à l'occurrence de crues rapides auprès des témoins ayant assisté à ces événements. Ces enquêtes ont pris la forme d'entretiens semi-directifs sur le terrain et d'un questionnaire auto-administré accessible en ligne. Ces outils de collecte ont permis de s'intéresser aux comportements individuels et collectifs effectivement mis en oeuvre pendant la crise afin d'étudier au plus près les interactions entre les dynamiques hydro-météorologiques et les réponses sociales (Ruin et al., 2009, 2014). La collecte des données a porté sur les événements des 8-9 Septembre 2002 dans le Gard, de Juin 2010 et Novembre 2011 dans le Var, de Septembre-Octobre 2014 dans le Gard et l'Hérault et d'Octobre 2015 dans les Alpes-Maritimes.

Les principaux résultats issus de ces différents travaux ont permis de souligner certains points essentiels dans l'étude de l'exposition sociale aux crues rapides :

- ⇒ Les mobilités quotidiennes sont la principale source d'exposition au danger en situation de crue rapide. Il est alors nécessaire de les étudier afin de mieux caractériser l'exposition des individus à ces événements hydro-météorologiques.
- ⇒ L'adaptation des activités et des mobilités quotidiennes à la dégradation des circonstances hydro-météorologiques est le fruit d'un compromis décisionnel entre l'évaluation du danger et les contraintes familiales et professionnelles des individus.
- ⇒ Les caractéristiques socio-démographiques et familiales des individus conditionnent à la fois leurs types de mobilité quotidienne et leurs comportements d'adaptation en situation de crise.

Les travaux réalisés dans les précédents projets ont mis l'accent sur la collecte des données pour étudier l'exposition des individus aux crues rapides. Dans le cadre de *MobiCLIMEX*, le choix a été fait d'investir dans le développement d'un modèle de simulation de l'exposition des usagers de la route aux crues rapides (*MobRISK*) offrant l'opportunité de construire et tester différents scénarios en croisant les dynamiques spatio-temporelles de l'aléa et celles des mobilités individuelles.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la contribution au développement de *MobRISK* et de l'application de cet outil pour un cas d'étude spécifique. Nous avons choisi d'étudier l'exposition des automobilistes aux submersions des routes survenues lors de l'évènement de crue rapide des 8 et 9 Septembre 2002. Une zone située au nord-ouest du département du Gard a été sélectionnée comme terrain d'étude.

Introduction générale

Dans le cadre de cette première application de *MobRISK*, nous nous sommes attachés à répondre à trois questions principales :

- Combien d'automobilistes étaient exposés aux submersions des routes pendant l'évènement des 8 et 9 Septembre 2002 ?

En effet, si 23 personnes sont mortes pendant cet épisode, dont près de la moitié sur la route, nous n'avons aucune idée du nombre de personnes réellement exposées aux submersions routières.

- Quels sont les profils socio-démographiques des automobilistes les plus exposés ?

- Quels sont les effets des décisions d'adaptation des comportements de mobilités face aux conditions hydro-météorologiques extrêmes sur l'exposition aux submersions des routes ?

La démarche proposée pour répondre aux deux premières questions consiste à :

1. Identifier les sections de routes vulnérables aux inondations et mesurer leurs niveaux de submersions lors d'évènements passés.
2. Simuler la mobilité routière individuelle à une échelle spatio-temporelle fine en prenant en considération les motifs de déplacement.
3. Proposer une métrique pour mesurer l'exposition individuelle des automobilistes en fonction des niveaux de submersion des routes traversées sur leurs itinéraires.
4. Évaluer les effets des caractéristiques socio-démographiques des individus sur leurs niveaux d'exposition.

Ensuite, pour répondre à la troisième question nous proposons de :

1. Développer un modèle de prise décision qui permet de simuler différents comportements d'adaptation des déplacements en fonction de règles de décisions.
2. Construire différents scénarios de comportements et évaluer leurs effets sur l'exposition aux submersions des routes.
3. Identifier les comportements et les processus cognitifs qui permettent de réduire considérablement le niveau d'exposition des automobilistes.

3 Structure de la thèse

Pour aborder les différents objectifs de la thèse, le manuscrit est organisé en six chapitres : les deux premiers chapitres traiteront de la dimension méthodologique à travers un état de l'art des travaux antérieurs qui serviront au développement du modèle *MobRISK* et une description de l'architecture du modèle proposé. Dans les chapitres qui suivent, les résultats de l'application de *MobRISK* dans le cadre du cas d'étude proposé seront présentés en trois étapes : simulation de la mobilité routière, simulation de l'exposition aux submersions des routes et simulation des décisions d'adaptation des comportements de mobilité.

Le **Chapitre 2** introduit la problématique de l'exposition des automobilistes aux crues rapides. Il décrit les processus hydro-météorologiques qui caractérisent les phénomènes de crues rapides dans le département du Gard. Il reprend ensuite les travaux qui ont pointé la mobilité routière comme un facteur augmentant l'exposition sociale aux crues rapides ainsi que les différents comportements d'adaptation des déplacements aux conditions météorologiques extrêmes observés dans les travaux antérieurs. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la description des acquis et connaissances nécessaires pour le développement du modèle *MobRISK* concernant l'évaluation de la vulnérabilité des routes aux submersions, la modélisation de la mobilité individuelle et les décisions d'adaptation des déplacements face aux perturbations environnementales. Cet état de l'art nous permettra de positionner les objectifs de la thèse par rapport aux travaux déjà effectués en hydro-météorologie dans la caractérisation des submersions des routes, en géographie du transport dans la modélisation de la mobilité et des déplacements quotidiens et en psychologie dans la modélisation des processus cognitifs de prise de décision en situation de risque. L'objectif de ce chapitre est ainsi d'étayer nos choix de modélisation dans le cadre du développement de *MobRISK*.

Le **Chapitre 3** est consacré à la description détaillée de *MobRISK*. Nous présenterons l'architecture informatique du modèle, son fonctionnement et les différents modules qui le constituent. Ce chapitre contient aussi une description des différentes données d'entrée nécessaires à son fonctionnement, leurs sources ainsi que les opérations de pré-traitements nécessaires pour l'implémentation des simulations. Le chapitre 3 se termine par une présentation de la zone d'étude et de l'évènement des 8-9 Septembre 2002 sélectionnés comme cas d'application du modèle.

Le **Chapitre 4** est consacré à l'application du modèle *MobRISK* dans le cadre du cas d'étude sélectionné afin de simuler les mobilités routières individuelles. Nous présentons une méthode développée pour attribuer des emplois du temps à la population de la zone d'étude afin de simuler leur mobilité quotidienne. Une dernière partie est consacrée à l'évaluation de

Introduction générale

la mobilité simulée à l'aide des données d'observation disponibles.

Le **Chapitre 5** est consacré à l'application de *MobRISK* pour simuler l'exposition des automobilistes aux submersions des routes lors des crues rapides de 2002. Nous présentons la métrique proposée pour évaluer l'exposition en croisant les mobilités simulées avec les niveaux de submersions des routes. Ceci nous permettra de retracer les dynamiques spatio-temporelles de l'exposition. Une dernière partie de ce chapitre examinera les effets des caractéristiques socio-démographiques sur l'exposition dans le but d'identifier le profil des automobilistes les plus exposés.

Enfin, le **Chapitre 6** est consacré à l'application de *MobRISK* pour simuler les décisions d'adaptation de la mobilité en fonction des conditions hydro-météorologiques liées à l'évènement de 2002. Il contiendra une description détaillée du développement du modèle de prise de décision et de la construction de différents scénarios de comportements. Enfin, les résultats de l'implémentation des scénarios de comportements seront présentés et interprétés.

Le document se termine avec un chapitre de conclusion en reprenant les principaux résultats de cette étude et en ouvrant de nouvelles perspectives.

Chapitre II

Crues rapides et comportements de mobilité

Les crues rapides sont considérées parmi les phénomènes naturels les plus dangereux. En effet, même si ces phénomènes hydro-météorologiques extrêmes touchent souvent des surfaces réduites, ils ont généralement des conséquences dramatiques en termes économiques et humains et posent encore des difficultés de prévision et d'anticipation. Les différents travaux qui se sont intéressés à l'étude des impacts de ces extrêmes hydro-météorologiques soulignent un taux de mortalité particulièrement élevé (Jonkman and Kelman, 2005). En France, la région méditerranéenne est fréquemment affectée par des événements de crues rapides intenses dûs à un contexte climatique favorisant la genèse de fortes précipitations et la concentration rapide des eaux dans de petits bassins versants (Creutin et al., 2009).

Dans ce chapitre nous présentons une description des caractéristiques hydro-météorologiques des crues rapides en général et plus spécifiquement dans le département du Gard en soulignant les efforts fournis dans la prévision de ces phénomènes. La deuxième partie est consacrée à l'étude de l'exposition et de la vulnérabilité sociale aux crues rapides et plus particulièrement à l'exposition des individus pendant leur mobilité quotidienne qui s'avère un facteur aggravant (Ruin et al., 2008, 2007). Nous focaliserons ensuite l'attention sur les comportements d'adaptation de la mobilité aux extrêmes hydro-météorologiques. La dernière partie est consacrée à la description des acquis et connaissances nécessaires pour développer un outil qui permet de simuler l'exposition des automobilistes aux submersions des routes dans le département du Gard. Trois champs de connaissance sont identifiés : l'évaluation du risque de submersion du réseau routier, la modélisation de la mobilité quotidienne des individus et la modélisation des décisions d'adaptation des comportements de mobilité aux conditions hydro-météorologiques extrêmes. Une revue bibliographique des travaux effectués dans le cadre de ces trois champs disciplinaires est alors présentée soulignant à chaque fois les approches qui nous semblent être les plus adaptées à notre problématique. Ceci permettra de guider et justifier les choix nécessaires au développement du modèle *MobRISK* mis en œuvre dans cette thèse.

1 Les crues rapides

De nombreuses définitions du terme "crue rapide" apparaissent dans la littérature. Selon l'Organisation Mondiale de Météorologie ("World Metrological Organisation"), les crues rapides sont définies comme des "*crues qui résultent d'un évènement (pluies intenses, rupture de digues ou de barrages) se développant en quelques heures*". Les crues rapides, appelées aussi "crues éclair" ou crues soudaines, sont caractérisées par un temps de montée des eaux très court (quelques heures).

Montz and Grunfest (2002) ont distingué cinq caractéristiques principales du phénomène de crues rapides :

- Elles sont soudaines ce qui réduit le temps d'alerte ;
- Elles sont rapides et généralement très violentes ce qui accentue leurs impacts physiques et humains ;
- Elles surviennent aux petites échelles spatiales ;
- Elles sont fréquemment associées à d'autres évènements, tels que les coulées de boue ;
- Ce sont des phénomènes rares.

Les crues rapides naissent de la correspondance entre la distribution spatio-temporelle des systèmes précipitants et la taille, la pente et l'état de surface des bassins versants sur lesquels ils s'abattent. Ces conjonctions malheureuses restent très difficiles à prévoir avec certitude (Creutin and Borga, 2003; Creutin et al., 2013). En France, l'alerte est donnée sous la forme de vigilance météorologique à l'échelle du département alors que les surfaces finalement affectées sont souvent bien plus réduites. Ainsi, les responsables de la gestion de crise en charge des opérations de secours et les populations ont souvent du mal à anticiper ces évènements et le danger qu'ils présentent localement sur la base d'une information spatiale et temporelle peu précise.

Les crues rapides dans le Gard

Les crues rapides sont considérées parmi les risques naturels les plus dévastateurs dans la région méditerranéenne en termes d'impacts humains et de dommages économiques (Gaume et al., 2009). Cette région est régulièrement touchée par des évènements de crues rapides violents dûs à des cumuls de précipitations très importants. Plus de 500 crues ont été enregistrées dans le département du Gard depuis la moitié du 13e siècle jusqu'à 2013¹.

Ces inondations sont souvent associées à des épisodes Cévénoles qui surviennent généralement à la fin de l'été, lorsque la température de la mer est encore élevée. Delrieu et al. (2005) expliquent la fréquence des fortes précipitations dans la région méditerranéenne par trois facteurs principaux :

1. <http://www.no.e.gard.fr/index.php>

- l'effet de la mer méditerranéenne qui agit comme une source d'air chaud et humide élément essentiel à la formation des orages surtout à la fin de l'été et au début de l'automne ;
- des situations météorologiques de grande échelle favorables : une dépression centrée sur l'Atlantique générant des vents de Sud sur la Méditerranée advectant l'air chaud et humide vers les Cévennes ;
- le relief des Cévennes agit comme une barrière et provoque l'ascension des masses d'air à l'origine des orages stationnaires et de fortes précipitations.

La figure II.1, empruntée à Météo-France, illustre les mécanismes météorologiques des épisodes Cévenols : l'air chaud et humide de la Méditerranée est poussé vers la terre par le vent marin et s'élève en butant sur le relief. La rencontre avec l'air froid en altitude engendre des orages et des fortes pluies. Ces orages se retrouvent bloqués par le relief des Cévennes et produisent des orages stationnaires engendrant des inondations.

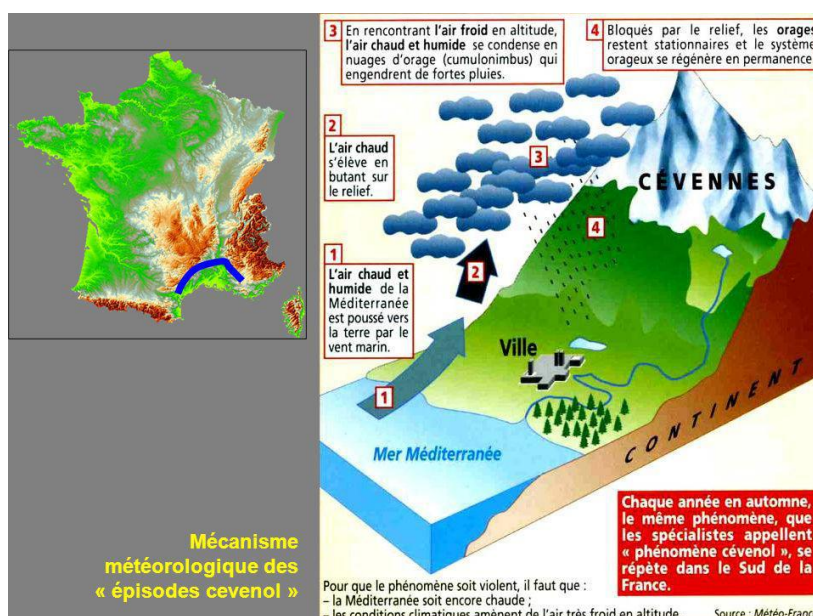


Figure II.1 Schémas explicatif des épisodes Cévenols. Source : Météo France

La prévision des crues en France est gérée par 22 Services de Prévision de Crues (SPC) et un Service Central d'Hydrométéorologie à la Prévision des Inondations (SCHAPI). Ces services pilotent le réseau de la prévision des crues VIGICRUES en diffusant les prévisions et les cartes de vigilance au public via un site web spécifique². Le dispositif VIGICRUES est opérationnel depuis 2006 et produit des cartes qui représentent les niveaux de vigilance au niveau des cours d'eau situés dans le réseau hydrographique surveillé par l'État. Ces cours d'eau surveillés sont généralement situés au niveau des bassins versants de taille supérieure à 100km². Cependant, les données d'observation et de mesure de débits sont rares et difficiles

2. <http://www.vigicrues.gouv.fr>

Crues rapides et comportements de mobilité

à obtenir concernant les plus petits bassins versants non-jaugés. Ces derniers présentent plus de danger pour la population vu la rapidité de leurs temps de réaction et la difficulté de prévoir leurs dynamiques.

L'information de vigilance, diffusée par VIGICRUES, est accompagnée par des mesures de niveaux d'eau et de débits en temps réel ainsi que les évolutions prévues à court terme (Figure. II.2). Les niveaux de vigilance sont généralement présentés en quatre niveaux associés à des codes couleurs spécifiques :

- Vert : Pas de vigilance particulière.
- Jaune : Risque de crue génératrice de débordements et de montées rapides des eaux de rivières.
- Orange : Risque de crue susceptible d'avoir un impact important sur la sécurité des personnes et d'endommagement des biens.
- Rouge : Risque de crue majeure qui présente un danger et une menace significative de la sécurité des personnes et des biens.

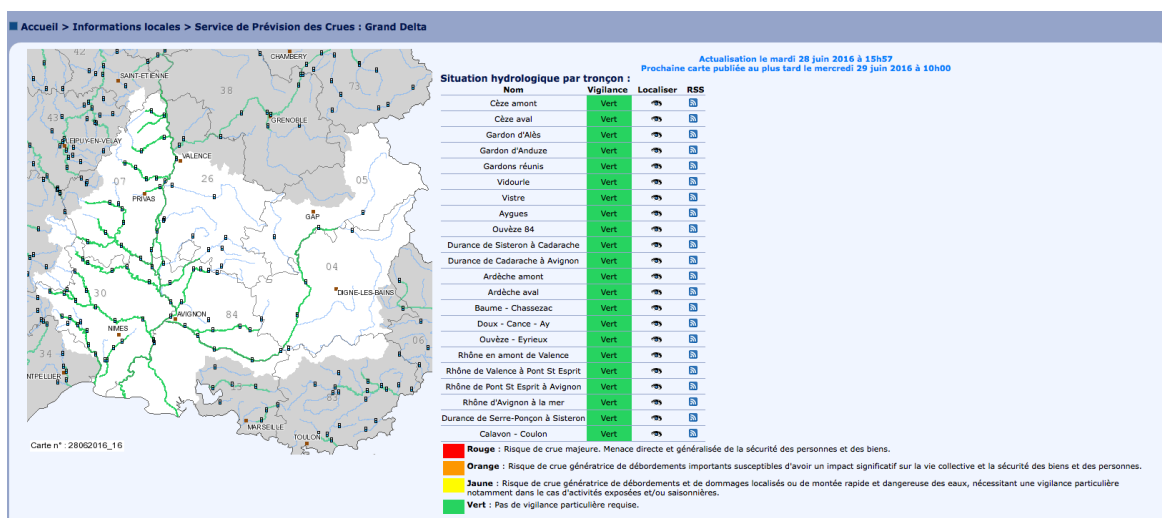


Figure II.2 Exemple de carte de VIGICRUES à partir du site web de diffusion d'information de vigilance correspondant à l'état des cours d'eau dans le Gard le 28 Juin 2016 à 16h.

Outre les informations de vigilance aux crues, réalisées par le réseau VIGICRUES, Météo-France diffuse des informations de vigilance météorologique pour informer la population et les pouvoirs publics en cas de phénomènes météorologiques dangereux (vent violent, orages, pluie-inondation, inondation, canicule...). Ces informations sont représentées à travers une carte de la France, actualisée au moins deux fois par jour, signalant des niveaux de vigilance pour chaque département. Les niveaux de vigilance sont représentés à travers un code de couleurs allant du "vert" (pas de vigilance particulière) au "rouge" (signalant un phénomène très dangereux d'intensité exceptionnelle). Ces informations de vigilance sont souvent accompagnées par des consignes de sécurité et des conseils de comportement.

Par exemple, dans une situation de vigilance pluie-inondation rouge, il est conseillé d'éviter tous déplacements dans les départements concernés et de conduire dans des routes submergées.

Plusieurs travaux en hydrologie et en météorologie se sont penchés sur l'étude des phénomènes de crues rapides afin de pouvoir anticiper leurs dynamiques spatio-temporelles. Différents outils d'observation et de modélisation ont été mis en oeuvre depuis plusieurs années en s'intéressant particulièrement au département du Gard comme terrain d'étude (notamment l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais³). Cependant, la connaissance de l'aléa n'est pas suffisante pour mieux appréhender le risque associé à ces événements. Il est important de prendre en compte les interactions entre les dynamiques de l'aléa et les dynamiques sociales afin de caractériser l'exposition et la vulnérabilité de la population aux crues rapides.

2 Exposition sociale aux crues rapides

La question de l'exposition et la vulnérabilité sociale aux risques naturels, et plus particulièrement aux inondations a fait l'objet de plusieurs travaux dans le cadre de différentes disciplines. On peut trouver plusieurs définitions du "Risque" dans la littérature en fonction des disciplines qui les traitent. Nous proposons dans cette section de positionner la question de l'exposition sociale par rapport à la caractérisation des risques naturels. Nous mettons ensuite l'accent sur la mobilité quotidienne qui constitue un facteur augmentant l'exposition des individus dans le cas des crues rapides. Nous essayons alors d'identifier les effets des conditions hydro-météorologiques extrêmes sur les comportements de mobilité ainsi que les principaux facteurs qui expliquent les décisions d'adaptation des déplacements face à ces conditions.

2.1 Terminologie

Dans son cinquième rapport de synthèse concernant les impacts du changement climatique, le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) propose une terminologie qui représente un consensus scientifique autour de la question des catastrophes naturelles (Pachauri et al., 2014). Une **catastrophe/crise** naturelle (*Disaster*) est définie comme *une grave perturbation du fonctionnement normal d'une population due à l'interaction d'un phénomène physique dangereux avec des conditions de vulnérabilité sociale*. Le **risque** est défini comme le potentiel de conséquences, dans lequel quelque chose de valeur est en jeu, et dont l'issue est incertaine. Le risque s'exprime en terme de probabilité d'occurrence d'évènements dangereux et résulte de l'interaction entre **l'aléa (hazard), l'exposition et la vulnérabilité** (Figure. II.3) :

3. <http://www.ohmcv.fr/index.html>

Crues rapides et comportements de mobilité

- **L'aléa** est défini comme "l'éventualité d'un phénomène, naturel ou anthropique susceptible d'entraîner des pertes en vies humaines, des blessures ou d'autres effets sur la santé, ainsi que des dégâts et des pertes touchant les biens, les infrastructures, les moyens de subsistance, la fourniture des services, les écosystèmes et les ressources environnementales".
- **L'exposition** est définie comme "la présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de fonctions, ressources ou services environnementaux, d'éléments d'infrastructure ou de biens économiques, sociaux et culturels dans un lieu ou dans un contexte susceptibles de subir des dommages".
- **La vulnérabilité** désigne "la propension ou la prédisposition à subir des dommages. Elle recouvre plusieurs concepts et éléments, notamment la sensibilité ou la susceptibilité d'être atteint et le manque de capacité à réagir et à s'adapter".

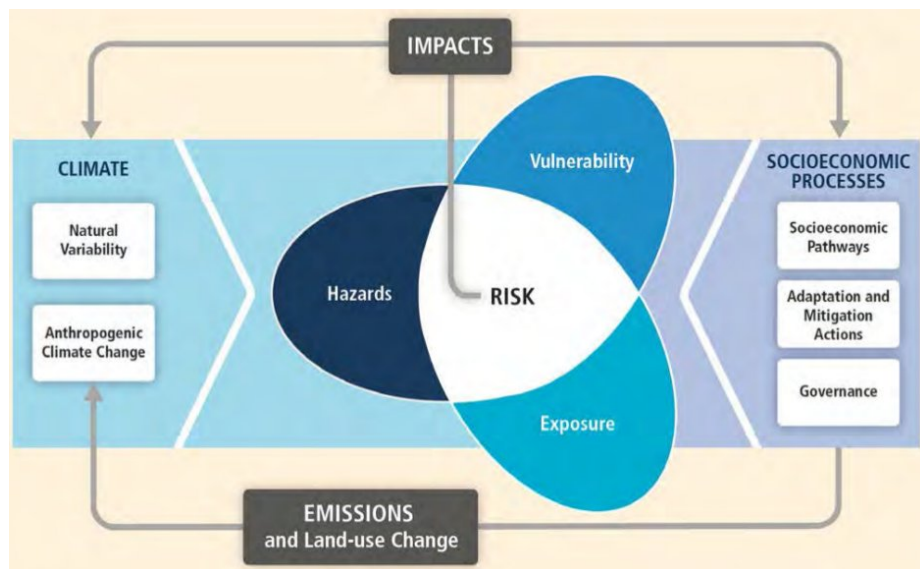


Figure II.3 Schémas d'interaction entre le risque, l'aléa, l'exposition et la vulnérabilité. Source : Pachauri et al. (2014)

Alors que la terminologie proposée par l'IGEC propose une distinction entre les concepts d'exposition et de vulnérabilité, d'autres approches proposent une définition plus globale de la vulnérabilité, où l'exposition figure comme l'une de ses composantes (Cardona, 1999; Turner et al., 2003). Bohle (2001) distingue entre deux composantes de la vulnérabilité sociale : i) une composante *interne* qui renvoie à la capacité des individus à anticiper, s'adapter et faire face à un aléa naturel; ii) et une composante *externe* qui caractérise l'exposition à cet aléa. Nous proposons de conserver cette distinction entre l'exposition et la vulnérabilité dans cette thèse en considérant l'exposition comme la "concordance spatio-temporelle entre l'aléa et les enjeux" (Leone and Vinet, 2006). L'aléa dans notre étude est représenté par la submersion

des routes liée aux événements de crues rapides et les enjeux sont les automobilistes qui sont exposés à ce danger durant leur mobilité.

Alors que plusieurs travaux en sciences de la nature se sont intéressés à l'analyse et la compréhension de l'aléa hydro-météorologique, il est nécessaire d'intégrer l'exposition et la vulnérabilité sociale à ces aléas afin de mieux caractériser les risques associés à ces phénomènes.

L'approche classique adoptée dans l'évaluation de l'exposition de la population aux aléas naturels consiste à quantifier et caractériser la population qui réside dans la zone susceptible d'être affectée en exploitant par exemple les données de recensement de la population (Cutter et al., 2003; Fekete, 2009; Koks et al., 2015). Cependant, ceci ne prend pas en compte les dynamiques spatio-temporelles associées à la mobilité des individus et ne donne pas d'indication sur l'exposition des individus quand ils sont hors de leurs lieux de résidences. Cette approche néglige donc l'exposition des automobilistes au cours de leurs déplacements. Dans le cas des crues rapides, la prise en compte de la mobilité quotidienne des individus s'avère encore plus importante à cause de deux facteurs principaux : i) une grande partie des victimes concerne des automobilistes piégés dans leur véhicule (Jonkman and Kelman, 2005; Terti et al., 2016); ii) ce sont des phénomènes très localisés et rapides qui nécessitent une connaissance fine de la localisation de la population pour bien évaluer son exposition (Creutin et al., 2009; Terti et al., 2015).

2.2 La mobilité : facteur d'exposition aux crues rapides

Bien que les crues rapides affectent des surfaces assez réduites comparées aux autres types d'inondations, elles provoquent un nombre important de victimes. Sur la base des données d'EM-DAT ("International Disaster Database"), Jonkman (2005) a recensé 1 883 événements de crues (en différenciant entre les crues par remontée de nappes, les crues rapides et les crues de rivière) entre 1975 et 2001 qui ont causé 176 684 victimes dans le monde. Il a mesuré les taux de mortalités de chaque type de crue en fonction du rapport entre le nombre de morts et le nombre de personnes affectées. Les résultats obtenus montrent que le taux de mortalité associé aux crues rapides (3.62 %) est significativement plus élevé que celui des crues par remontée de nappe (0.49%). De plus, la comparaison des taux de mortalité par type d'inondation entre les différents continents indique que l'Europe représente le taux de mortalité le plus élevé relativement aux crues rapides (5.6%).

Plusieurs travaux se sont intéressés à l'étude des circonstances des décès des victimes des crues rapides (Duclos et al., 1991; French et al., 1983; Jonkman and Kelman, 2005; Ruin et al., 2008). L'analyse des circonstances des décès indique que les automobilistes représentent globalement entre 40 et 50 % des victimes des crues rapides. Aux États Unis, et plus particulièrement au Texas, près de 80% des victimes des inondations sont des automobilistes (Ashley and Ashley, 2008; Sharif et al., 2012; Terti et al., 2016). Ceci est aussi le cas en

Europe où on remarque une forte prépondérance des victimes liées aux inondations des routes (Diakakis and Deligiannakis, 2013; Jonkman and Kelman, 2005; Ruin et al., 2008; Špitalar et al., 2014).

Selon Jonkman and Kelman (2005) et Coates (1999), l'âge et le sexe sont des facteurs discriminants dans l'augmentation de la vulnérabilité et de l'exposition des individus aux crues rapides en situation de mobilité. Les analyses des données d'impacts humains montrent que les jeunes de moins de 25 ans semblent être les plus concernés par les accidents liés aux submersions de routes que les personnes de plus que 60 ans, généralement affectées à l'intérieur des bâtiments. Par ailleurs, les hommes sont plus souvent victimes que les femmes d'accidents impliquant l'utilisation d'un véhicule sur des routes inondées. Abramovich et al. (1995) remarquent que le profil socio-démographique dominant des victimes de submersions de routes correspond à des hommes dans la tranche d'âge entre 35 et 45 ans. Plus récemment, Terti et al. (2016) ont analysé les circonstances de 1 075 décès relatifs aux crues rapides dans la période 1966-2014 aux États Unis. Les résultats montrent que 61% des victimes sont des automobilistes, majoritairement des hommes âgés de moins de 60 ans.

Les mêmes tendances ont pu être constatées par Ruin et al. (2008) dans l'étude des caractéristiques socio-démographiques et des circonstances des décès lors de l'évènement majeur du Gard les 8 et 9 Septembre 2002. Parmi les 22 victimes recensées dans le Gard, 11 personnes étaient à l'extérieur (en déplacements motorisés ou piétons). Ce sont majoritairement des hommes et la moyenne d'âge était de 43 ans alors que les autres victimes se sont majoritairement fait piéger à domicile et avec une moyenne d'âge beaucoup plus élevée (76 ans). En croisant ces données avec les tailles des bassins versants des lieux des décès, Ruin et al. (2008) constatent que les décès liés à la mobilité ont eu lieu dans des petits bassins versants ($< 20km^2$) qui sont caractérisés par des temps de réaction très rapides (inférieurs à une heure) (Figure. II.4). En effet, ces courts temps de réactions réduisent la capacité d'anticipation des individus et limitent leurs capacités à adapter leurs activités quotidiennes et obligations sociales et professionnelles (Creutin et al., 2009).

Outre le fait de se retrouver au mauvais endroit au mauvais moment, l'exposition des automobilistes aux submersions des routes dépend aussi de leurs capacités à adapter leurs comportements de mobilité en fonction des conditions météorologiques.

2.3 Les comportements de mobilité face aux perturbations météorologiques

Alors que certaines personnes ont tendance à annuler leurs déplacements face à de fortes précipitations, d'autres personnes maintiennent leurs programmes d'activités quotidiennes et sous estiment le danger associé à l'utilisation des véhicules dans des conditions météorologiques défavorables. Nous essayons dans cette partie d'identifier ces comportements d'adaptation

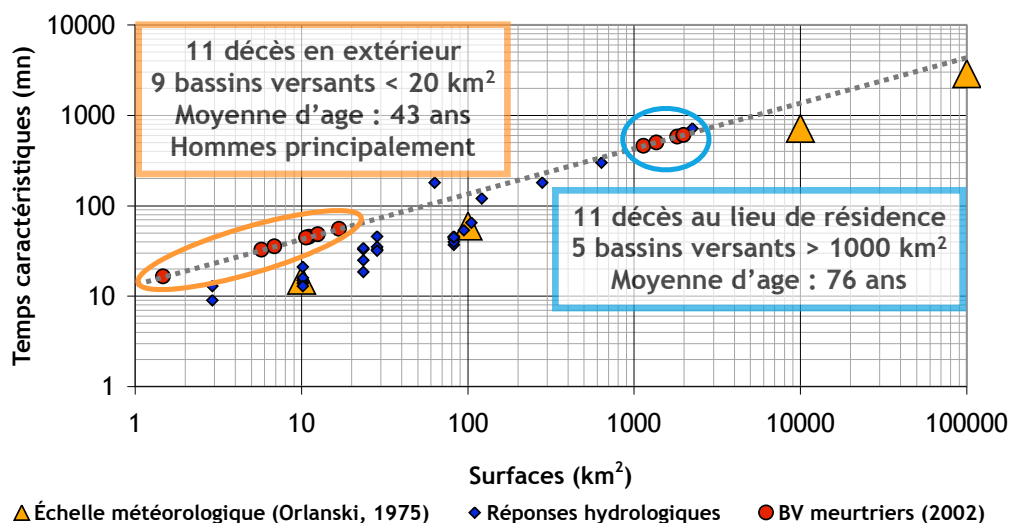


Figure II.4 Localisation et caractéristiques socio-démographiques des victimes de l'événement de crue rapide des 8-9 Septembre 2002 dans le Gard en fonction des tailles et temps de réaction des bassins versants. Source : Ruin et al. (2009)

ainsi que les principaux facteurs sous-jacents qui favorisent ou au contraire freinent cette adaptation.

2.3.1 Effets des conditions météorologiques sur la mobilité

Plusieurs travaux en géographie du transport s'intéressent à l'étude de l'effet des conditions météorologiques sur les comportements de mobilité (Al Hassan and Barker, 1999; Böcker et al., 2013; Chung et al., 2005; Dijst et al., 2013; Koetse and Rietveld, 2009). Principalement, deux méthodes sont utilisées afin d'identifier les interactions entre la mobilité des individus et les conditions météorologiques. La première se base sur des analyses statistiques comparatives des données de trafic et de mobilité en fonction des variables météorologiques (précipitations, humidité, vent). Ces analyses ont permis, par exemple, de constater les effets des fortes précipitations sur le nombre et la vitesse des déplacements ainsi que les modes de transport (Böcker et al., 2013; Tsapakis et al., 2013). Tsapakis et al. (2013) et Maze et al. (2006) ont constaté que les précipitations sont la variable météorologique qui a l'effet le plus important sur la mobilité et le trafic routier et qu'elle a un effet significatif sur les durées des trajets et les vitesses de déplacement.

La deuxième méthode consiste à conduire des enquêtes de type "enquêtes de comportements déclarés" ("*Stated Adaptation Survey*") qui consistent à collecter les intentions de comportements d'adaptation des individus face à des scénarios représentant des conditions météorologiques différentes. Les comportements d'adaptation de mobilité identifiés incluent principalement :

- L'annulation des déplacements et des activités initialement prévues (Kim et al., 2010) ;

Crues rapides et comportements de mobilité

- La modification des lieux d'activités (Koetse and Rietveld, 2009) ;
- La modification des horaires de déplacement et d'activité (Chung et al., 2005) ;
- Le changement de mode de transport (Akar and Clifton, 2009) ;
- La modification des itinéraires (Lam et al., 2008; Sumalee et al., 2011).

Alors que les enquêtes de type "comportements déclarés" peuvent constituer des outils intéressants pour collecter des informations sur les comportements d'adaptation selon différents scénarios météorologiques, leurs applications pour comprendre les réactions pendant des événements extrêmes, comme les crues rapides, présentent des limites méthodologiques. En effet, les comportements déclarés par les participants peuvent être fortement décalés et différents de leurs comportements réels. Pour cela, Ruin et al. (2014) ont mis en place des enquêtes de retour d'expérience auprès des personnes qui ont vécu des crues rapides. Ceci en construisant une grille d'entretien spécifique qui permet de retracer les différentes activités effectuées par les individus durant la période de l'évènement, de localiser les lieux de ces activités et de collecter des informations sur les signes environnementaux perçus par les individus ainsi que les interactions sociales qu'ils ont eu dans ces différents lieux. Ces enquêtes de retour d'expérience (REX) ont été conduites après les événements qui ont eu lieu dans le Var en Juin 2010 et en Novembre 2011 et les événements plus récents qui ont touché les Alpes-Maritimes en Octobre 2015. L'analyse des données collectées pour l'évènement du Var des 15 et 16 Juin 2010 a permis de constater que les réactions sociales peuvent être catégorisées en trois phases principales : information, organisation et protection (Ruin et al., 2014). La confrontation des dynamiques hydro-météorologiques (précipitations et temps de réaction des bassins versants) et des réponses sociales montre que les individus maintiennent leurs activités de routine le plus longtemps possible malgré les signes environnementaux perçus (Figure II.5). L'analyse des récits des personnes enquêtées indique une non-compréhension de la situation induisant des comportements qui sont généralement non-adaptés. Parmi les comportements de mobilité qui sont mis en évidence, nous remarquons que les individus insistent pour rejoindre leur lieu de domicile. En effet, le retour à domicile semble constituer un comportement souvent adopté par les individus lors d'évènements extrêmes. Coates (1999) souligne qu'une grande partie des victimes des inondations en Australie correspond à des personnes qui ont traversé des ponts submergés afin de rentrer chez eux. Néanmoins, Ruin et al. (2014) ont constaté que certaines personnes adoptent des comportements plus appropriés en arrêtant de conduire ou en cherchant à se réfugier dans un lieu en hauteur.

2.3.2 Les facteurs d'adaptation des comportements de mobilité

Plusieurs facteurs interviennent dans les décisions d'adoption de comportements de protection face aux événements extrêmes et d'adaptation des comportements de mobilité. Ces facteurs peuvent être regroupés en deux catégories : les facteurs contextuels (qui représentent

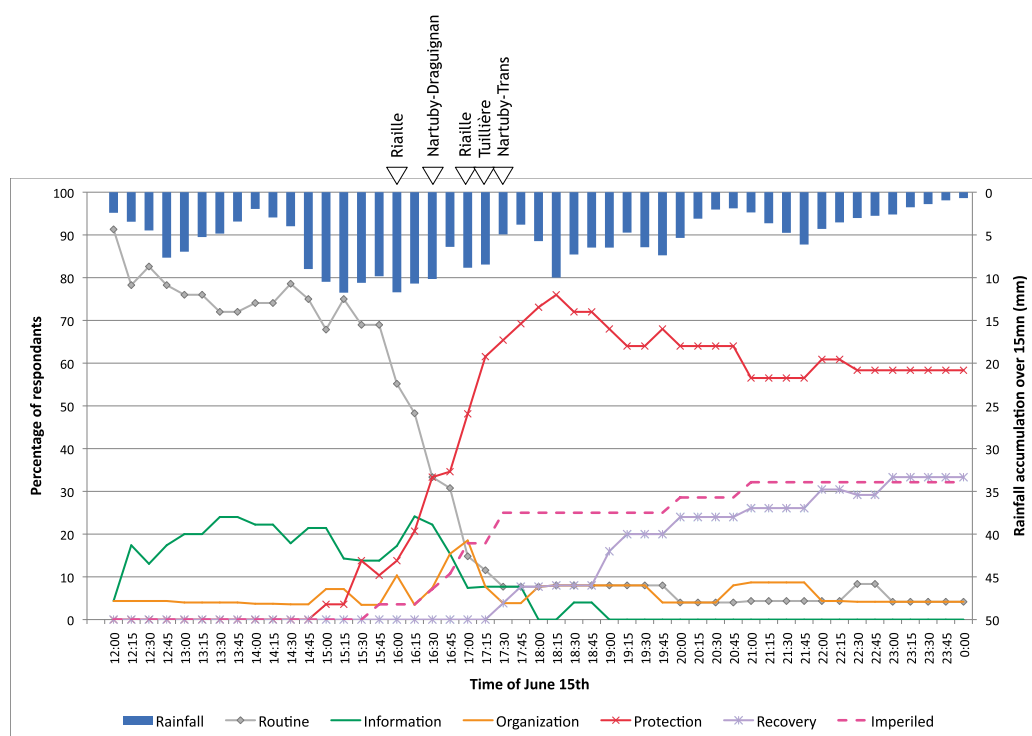


Figure II.5 Évolution du pourcentage de personnes selon le type d'activités réalisées lors de l'évènement de crue rapide du Var 2010 en fonction des intensités de précipitations et des pics de crue (Graphique réalisé sur la base des données d'entretien en retour d'expérience collectées dans le Var à la suite de l'épisode). Source : Ruin et al. (2014)

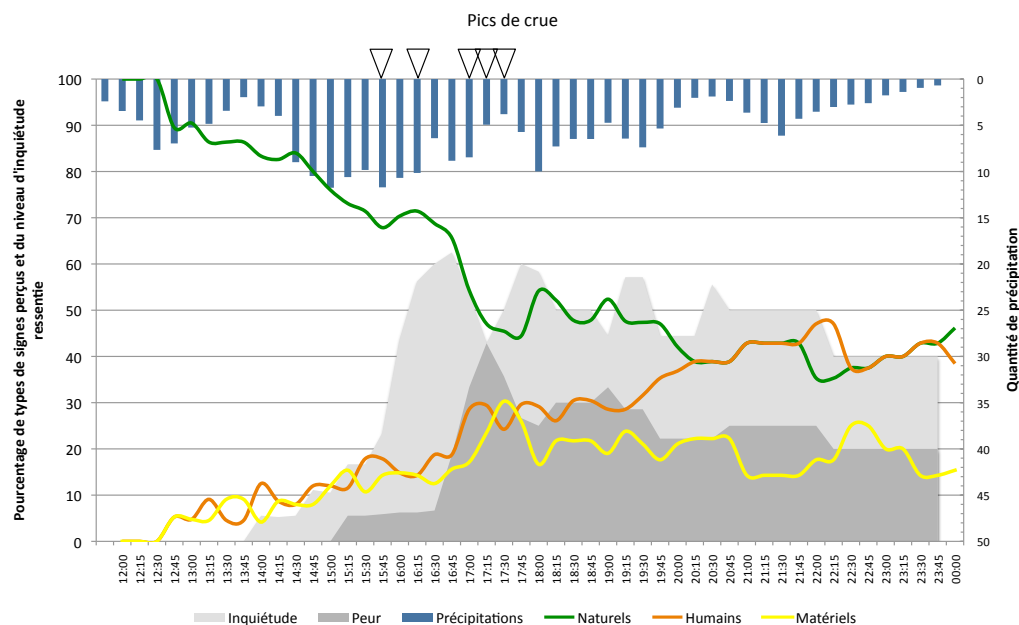


Figure II.6 Évolution du type de signes perçus (naturels, humains ou matériels) et des niveaux d'inquiétude ressentie lors de l'évènement de crue rapide du Var 2010 en fonction des intensités de précipitations et des pics de crue (Graphique réalisé sur la base des données d'entretien en retour d'expérience collectées dans le Var à la suite de l'épisode).

Crues rapides et comportements de mobilité

les éléments observables et les informations reçues par les individus) et les facteurs cognitifs (qui sont liés aux processus internes de traitement de ces informations à l'échelle de l'individu) (Terti et al., 2015).

Les facteurs contextuels renvoient aux différents indices environnementaux ("environmental cues") et sociaux perçus par les individus au moment de la crise (Lindell and Perry, 1992; Ruin et al., 2014). Ainsi, les réactions des individus lors d'évènements d'inondation dépendent, par exemple, de l'intensité des précipitations et du niveau de submersion des routes. L'analyse des récits des personnes issus des données d'enquêtes de retour d'expérience pour l'évènement du Var 2010 a permis d'identifier trois types de signes extérieurs perçus par les individus : environnementaux (précipitation, ruissellement...), sociaux (réactions des personnes autour) et matériels (liés aux dégâts de la crue telles que les voitures emportées). Le croisement des types de signes perçus et de l'évolution des niveaux d'inquiétude déclarés par les personnes enquêtées montre que la perception des signes sociaux et des dégâts matériels augmente considérablement l'inquiétude ressentie des témoins de la crue (Figure II.6). Dans le cadre des comportements de mobilité, la visibilité sur les routes (qui renvoie au timing de l'évènement : le jour ou la nuit) a aussi un effet important dans les choix de déplacements (Kilpeläinen and Summala, 2007). Parmi les facteurs contextuels, on peut aussi citer les informations d'alertes reçues par les individus qui peuvent provenir de sources différentes (les médias, les réseaux sociaux...). Terti et al. (2015) soulignent l'importance du contexte de mobilité des individus au moment de la crise en termes de lieux et d'activités (ce qu'ils ont appelé "coupled place-activity"). Cools and Creemers (2013) ont montré que les individus annulent plus facilement les déplacements liés à des motifs de loisir ou d'achats que des déplacements professionnels.

Cependant, ces facteurs environnementaux n'influencent pas les individus de la même manière. L'évaluation du danger associé aux signes environnementaux perçus varie d'un individu à l'autre. Les décisions de déplacement lors d'évènement d'inondation peuvent être considérées en fonction de deux processus d'évaluation : l'évaluation de la menace et du danger associé à l'action de se déplacer et l'évaluation de l'importance et de la flexibilité du motif de mobilité. Plusieurs travaux ont montré que l'évaluation du danger et la perception du risque dépendent des caractéristiques socio-démographiques des personnes. Ruin (2007) a constaté à travers des enquêtes de perception du risque et de comportements déclarés associés à l'utilisation de véhicule en situation de crue rapide dans le Gard que les hommes et les jeunes automobilistes ont tendance à sous-estimer le danger et donc à moins bien adapter leurs mobilités. D'autres variables socio-économiques semblent jouer un rôle important dans la perception du risque d'inondation tels que le niveau d'éducation et le statut familial et professionnel (Botzen et al., 2009; Lindell and Hwang, 2008).

La perception du risque et du danger dépend aussi du niveau de connaissance du risque, des expériences antérieures d'évènements passés et de la familiarité avec les itinéraires (Andrey

et al., 2013; Ruin, 2010). Cependant, il est délicat d'en tirer des conclusions vu que les effets mesurés diffèrent entre les enquêtes ce qui peut s'expliquer par les différences des contextes d'étude et du mode de collecte des données. Andrey et al. (2013) ont remarqué que la fréquence d'exposition des automobilistes aux conditions météorologiques défavorables n'implique pas forcément plus d'adaptation des comportements de mobilité. Pagneux et al. (2011) ont remarqué que la connaissance du risque d'inondation n'est pas corrélée avec les niveaux de perception du danger par rapport à ces événements.

Concernant l'évaluation de la flexibilité, de l'importance des motifs de déplacements et de l'activité en cours, les différents travaux montrent principalement que les individus ont plus de facilité à annuler et modifier les activités dites secondaires (loisir, achat...) que les activités de travail et étude (Cools and Creemers, 2013; Ruin et al., 2014). Ruin (2007) souligne que l'aptitude à annuler les déplacements professionnels dépend aussi du type d'activité professionnelle. Les professions intermédiaires, les cadres et les ouvriers auraient plus tendance à poursuivre leurs trajets malgré l'inondation des routes que les agriculteurs, par exemple.

Le schéma proposé dans la figure II.7 fait la synthèse des différents facteurs et processus qui interviennent dans la prise de décision d'adaptation des comportements de mobilité en situation d'inondation sur la base de la littérature citée dans cette section.

Les facteurs qui expliquent les comportements de protection

On a identifié trois types de facteurs qui peuvent expliquer les décisions d'adaptation des comportements de mobilité face aux conditions météorologiques extrêmes :

- Facteurs contextuels : ils incluent les signes environnementaux perçus (précipitations, submersions des routes...) et les informations d'alerte et de vigilance reçues par les individus.
- Facteurs cognitifs : ils renvoient principalement aux processus d'évaluation du danger (qui dépend des signes environnementaux perçus des caractéristiques socio-démographiques des individus et de leurs attitudes) et d'évaluation de l'importance et de la flexibilité des motifs de déplacements.
- Facteurs socio-démographiques (âge, genre, profession) ainsi que les expériences passées d'inondation et la familiarité avec les lieux.

Les décisions d'adaptation des comportements de mobilité

Pour expliquer l'exposition des automobilistes aux submersions des routes, il faut prendre en considération les décisions d'adaptation et de modification des comportements de mobilité face aux perturbations météorologiques. La revue de la littérature a permis d'identifier cinq types de comportements :

- Modification de l'itinéraire
- Le retour au lieu de domicile

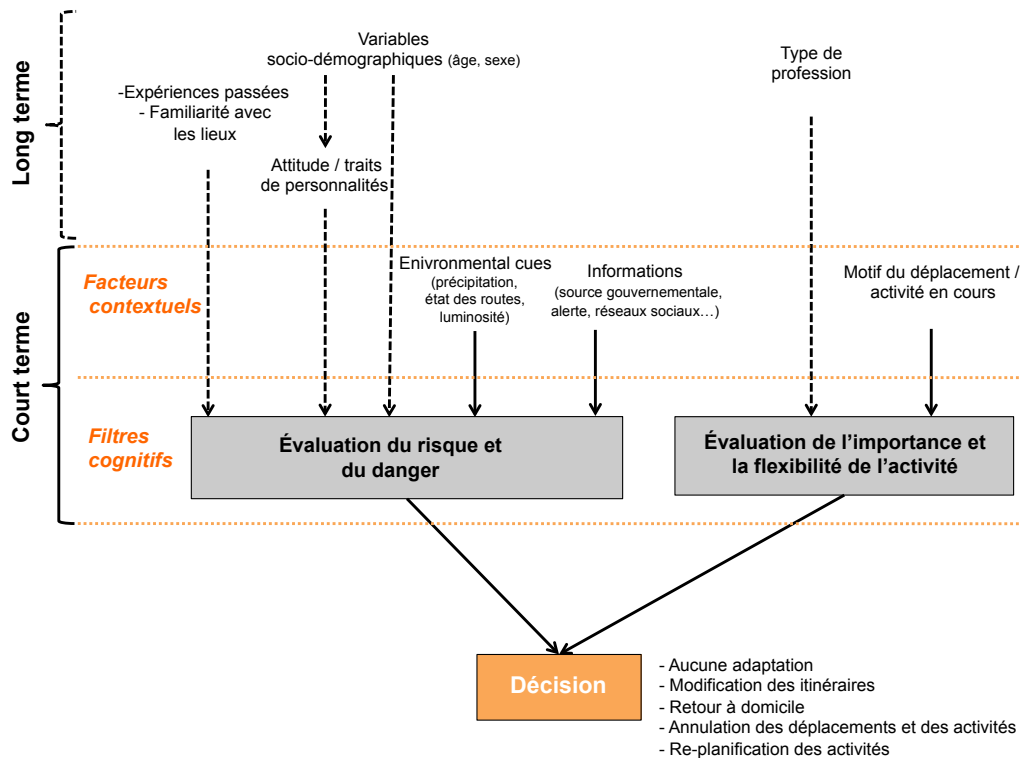


Figure II.7 Les facteurs et les processus qui interviennent dans la prise de décisions d'adaptation des comportements de mobilité

- Annulation des déplacements et des activités
- Re-planification des activités et décalage des horaires de déplacements
- Arrêt de la mobilité et recherche d'un refuge

3 Pour une modélisation de l'exposition des automobilistes aux crues rapides

La réduction des impacts humains provoqués par les crues rapides constitue un enjeu majeur dans les démarches de protection de la population contre les risques naturels. Cependant, nous ne disposons pas d'outils adaptés pour estimer l'exposition sociale à ces événements hydro-météorologiques et plus particulièrement l'exposition des usagers des routes qui représentent une grande partie des victimes. En effet, les seules informations dont nous disposons proviennent de la collecte des données d'impacts et des témoignages des personnes affectées. Il est pour l'instant bien difficile d'estimer le nombre et les caractéristiques des personnes exposées à ces risques faute d'une prise en compte de l'interaction entre les dynamiques physiques et sociales de l'exposition.

Au niveau hydro-météorologique, plusieurs avancées ont été enregistrées concernant le développement d'outils d'observation et de modélisation des dynamiques spatio-temporelles des crues rapides et plus particulièrement dans la région des Cévennes et le département du Gard. Les démarches de modélisation en hydro-météorologie permettent de représenter et de simuler les processus physiques afin de comprendre et de prédire les dynamiques de l'aléa naturel. D'un autre côté, la modélisation des comportements de mobilité connaît un intérêt de plus en plus important dans la planification et la gestion de la demande de transport permettant de simuler les déplacements quotidiens à l'échelle individuelle. Se situant à l'interface mobilité/extrêmes hydro-météorologiques, le projet *MobiCLIMEX*, dans lequel s'inscrit cette thèse, vise à intégrer ces deux champs de compétences notamment par le développement du modèle *MobRISK* qui permet la simulation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes lors des événements de crues rapides dans le département du Gard.

Ce type de modélisation nécessite le croisement de trois dimensions :

- La vulnérabilité et la sensibilité du réseau routier à la submersion lors d'évènements de crues rapides ;
- La mobilité à l'échelle individuelle afin d'identifier les personnes qui sont potentiellement exposées aux submersions des routes sur leurs itinéraires quotidiens ;
- Les comportements d'adaptations de la mobilité adoptés par les individus face aux conditions météorologiques défavorables et aux perturbations environnementales perçues.

Nous présentons dans cette section un état de l'art se rapportant à ces trois dimensions de notre étude afin d'identifier les approches qui peuvent être utiles dans la construction et le développement d'un outil de simulation de l'exposition des automobilistes aux crues rapides.

3.1 Vulnérabilité du réseau routier aux crues rapides

La première étape dans la caractérisation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes consiste à évaluer la vulnérabilité du réseau routier aux inondations. Nous présentons dans cette partie certaines approches développées dans des travaux antérieurs afin d'identifier celles qui sont les plus adaptées à notre problématique de thèse.

3.1.1 Approches d'évaluation de la vulnérabilité du réseau routier

La vulnérabilité du réseau routier constitue un des éléments principaux dans l'étude de l'impact des phénomènes naturels sur les infrastructures de transport. Berdica (2002) définit la vulnérabilité des routes en fonction de la probabilité d'occurrence de l'aléa et de l'importance de l'impact de celui-ci sur les connexions entre les routes. Husdal (2004) met l'accent sur la question de la performance en considérant la vulnérabilité comme la

non-opérationnalité du réseau de transport dans certaines circonstances. En adoptant une approche plus globale, D'Este and Taylor (2003) considèrent la vulnérabilité du réseau routier en fonction de son accessibilité. Ainsi, un réseau routier est considéré comme vulnérable quand la dégradation d'un nombre de sections de routes affecte significativement l'accessibilité aux différents noeuds routiers. Suivant la même approche, Jenelius et al. (2006) proposent de quantifier la vulnérabilité du réseau routier en fonction de l'importance des sections de routes dans le fonctionnement global du réseau et en mesurant l'augmentation des durées de trajets une fois ces routes coupées.

L'étude de la vulnérabilité du réseau routier répond donc à différents intérêts et s'inscrit dans des cadres disciplinaires différents. Alors que les définitions présentées ci-dessus proposent des approches globales mettant l'accent sur la performance de l'offre de transport, l'évaluation de la vulnérabilité des routes aux aléas naturels dépend largement du type d'aléa et du contexte de l'étude. Les sections de route qui sont vulnérables à l'aléa sismique ne présentent pas les mêmes caractéristiques que celles qui sont vulnérables aux inondations. Il est alors nécessaire de se baser sur les travaux qui focalisent sur la vulnérabilité des routes à la submersion lors d'évènements de crues rapides dans le département du Gard.

3.1.2 Vulnérabilité du réseau routier du Gard aux crues rapides

Suite à l'occurrence de submersions de routes dans le Gard lors d'évènements de crues rapides, la Direction Départementale de l'Équipement a mis en place en 2002 un Plan d'Intervention aux Crises Hydrologiques (PICH) qui permet de structurer les différentes interventions sur le réseau routier. Ce dispositif a pour objectifs principaux de :

- recenser de manière exhaustive les tronçons routiers sensibles à la submersion en spécifiant le mode, l'importance et la fréquence des submersions en se basant sur les coupures de routes observées durant les 40 dernières années ;
- proposer des modes opératoires permettant d'assurer la sécurité des usagers de la route.

L'inventaire réalisé a permis de recenser 167 sections du réseau routier qui ont été submergées dans le passé situées dans cinq subdivisions du nord-ouest du département du Gard (Le Vigan, Quissac, Anduze, Alès et Bessèges) (Figure. II.8). Pour chaque section, des informations concernant la localisation des routes submergées ainsi que d'autres observations (le motif de coupure, fréquence, hauteur d'eau...) sont renseignées.

Dans le cadre de sa thèse, Versini (2007) s'est appuyé sur cet inventaire afin de proposer une méthode pour évaluer la vulnérabilité du réseau routier du Gard aux crues rapides. En effet, puisque les données du PICH ne couvrent qu'une partie du réseau routier du Gard, l'objectif était de proposer une méthode permettant d'identifier les sections de route submersibles qui soit également valable dans les secteurs n'ayant pas fait l'objet d'un recensement de coupures lors d'évènements passés.

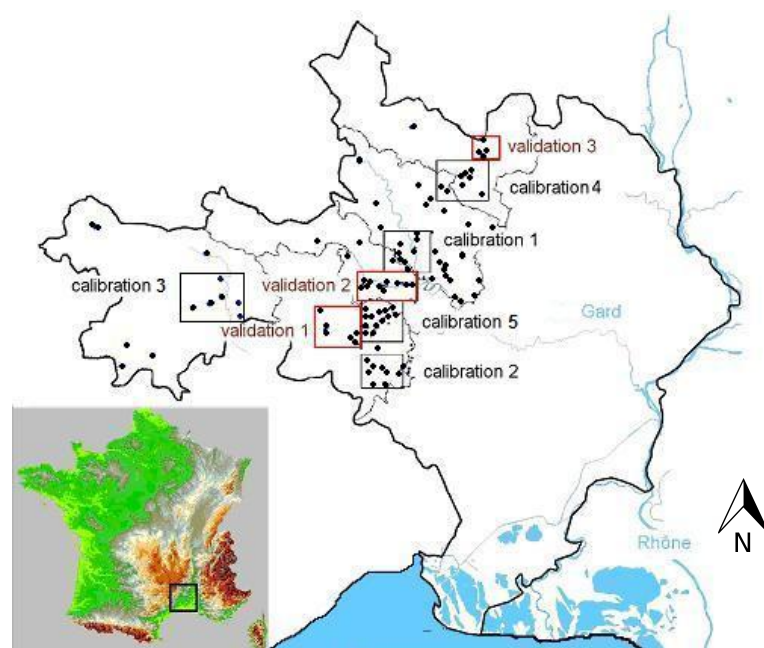


Figure II.8 Localisation des tronçons de route inventoriés dans le PICH dans les cinq subdivisions où il a été réalisé ainsi que les fenêtres de calibration de la vulnérabilité définies par Versini (2007). Source : Versini (2007)

Versini (2007) a effectué alors une analyse discriminante des caractéristiques géomorphologiques des routes inventoriées en fonction de trois facteurs principaux : l'altitude, la pente locale et la superficie drainée. Cette analyse a permis d'identifier des tronçons de route représentant des caractéristiques similaires et qui sont situés au niveau des intersections avec les tronçons hydrographiques. Ces points d'intersection sensibles à la submersion ont été appelés "points de coupure". Quatre classes de vulnérabilité ont été proposées (Très faible, Faible, Moyenne et Forte) afin d'indiquer la fréquence d'inondation observée au niveau des différents points de coupures identifiés. Ainsi, les points de coupure de vulnérabilité très faible représentent une période de retour de submersion qui dépasse les 40 ans et les classes de vulnérabilité "faible", "moyenne" et "forte" représentent des périodes de retour de submersion de moins d'un an pour 20%, 33% et 67% de l'effectif de points dans chaque classe (Figure II.9).

Les travaux de Versini (2007) ont permis d'exploiter les données de submersion de route observées dans le cadre du PICH et de proposer une méthode d'évaluation de la vulnérabilité des routes aux inondations appliquée sur une partie du département du Gard. Ce travail a été poursuivi par Naulin (2012) dans le cadre du projet *PrediFlood* dans l'objectif de développer un outil de prévision des coupures de route lors des évènements d'inondation dans le Gard. Dans sa thèse, Naulin (2012) a extrapolé la qualification de la vulnérabilité des sections de

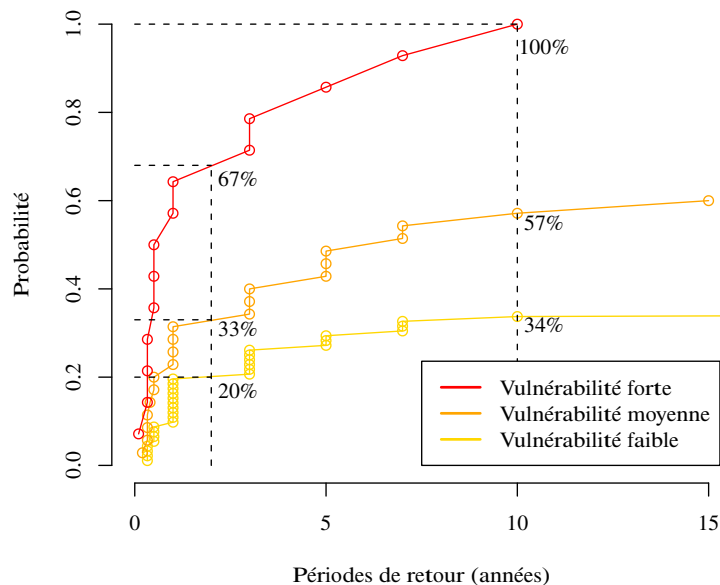


Figure II.9 Les différentes classes de vulnérabilité des points de coupure en fonction de la période de retour et de la probabilité de submersion. Source : Versini (2007)

route sur tout le département du Gard et a introduit une méthode permettant de mesurer les probabilités de submersion au niveau des points de coupure (Naulin, 2012; Naulin et al., 2013). Cette analyse de probabilité de submersion a été réalisée en croisant les classes de vulnérabilité des points de coupure, définies par Versini (2007), avec les débits de pointe simulés au niveau des tronçons hydrographiques contenant ces points (Table. II.1). Les seuils de débit utilisés sont les débits semi-bienaux ($Q_2/2$), bienaux (Q_2), décennaux (Q_{10}) et cinquantennaux (Q_{50})⁴.

Table II.1 Probabilités de submersion associées aux différentes classes de vulnérabilité selon les périodes de retour. Source : Naulin (2012)

Vulnérabilité	Débit de pointe simulé			
	$Q_2/2 < Q < Q_2$	$Q_2 < Q < Q_{10}$	$Q_{10} < Q < Q_{50}$	$Q > Q_{50}$
Forte	0 à 67%	67 à 100%	100%	100%
Moyenne	0 à 33%	33 à 57%	57 à 61%	61 à 100%
Faible	0 à 20%	20 à 34%	34 à 35%	35 à 100%
Très faible	0%	0%	0%	0 à 100%

En combinant les niveaux de vulnérabilité des routes avec les simulations des débits au niveau des rivières à l'aide d'un modèle hydrologique pluie-débit (le modèle CINECAR), Naulin (2012) propose un système de prévision des coupures de route lors d'événements d'inondation. Ce système a été évalué et validé en se basant sur 10 événements passés en fonction de deux scores : la probabilité de détection (POFD) et les taux de fausses alarmes

4. Ces seuils correspondent aux périodes de retour de débit : 1 an, 2 ans, 10 ans et 50 ans.

(FAR). Les résultats obtenus montrent une performance globale satisfaisante dans la détection des coupures de route.

3.1.3 Positionnement de la thèse

Les travaux effectués par Versini (2007) et Naulin (2012) constituent une riche base de travail concernant la caractérisation du risque de submersion au niveau du réseau routier du Gard. Nous avons fait le choix d'utiliser leurs travaux comme l'une des briques de base des développements proposés dans cette thèse. En effet, le projet *MobiCLIMEX* constitue une continuité du projet *PrediFlood* en intégrant la dimension sociale et l'exposition de la population dans l'évaluation des risques d'inondation routière. Il faut noter que certaines limites par rapport à l'estimation de la vulnérabilité et du risque de submersion des routes ont été soulignées par Naulin (2012). Néanmoins, nous essayons dans cette étude d'exploiter les méthodes développées et les résultats obtenus en les considérant comme des acquis. L'intégration de la dimension sociale permettra de mieux cibler les efforts nécessaires à l'amélioration de la prévision des coupures de route et fournira ainsi des pistes pour consolider ces résultats préalables. Ceci nécessite alors la modélisation de la mobilité quotidienne des individus afin de simuler le trafic routier au niveau des points de coupure.

Terminologie

Dans sa thèse, Versini (2007) a utilisé le terme "vulnérabilité" pour décrire les caractéristiques des sections de route qui sont sensibles à la submersion. Ce terme a été traduit en "susceptibility" et "sensitivity" dans les publications en anglais (Naulin et al., 2013; Versini et al., 2010). Afin d'éviter la confusion, nous avons choisi de conserver le terme "sensibilité", traduit en "sensitivity" dans les publications relatives à cette thèse.

3.2 Modélisation de la mobilité individuelle

La modélisation de la mobilité quotidienne constitue la deuxième composante essentielle pour l'évaluation de l'exposition des automobilistes aux coupures des routes. Nous présentons dans cette section les différentes approches utilisées dans la modélisation de la mobilité individuelle en focalisant sur l'intégration des comportements d'adaptation des déplacements.

3.2.1 Les différentes approches dans la modélisation de la mobilité

On distingue deux approches principales dans la modélisation de la mobilité qui diffèrent essentiellement selon l'unité d'analyse considérée et le niveau d'agrégation de la mobilité simulée : une approche classique appelée "*Trip-based*" et une approche plus récente appelée "*Activity-based*". Développés à partir des années 1960, les modèles de mobilité "*trip-based*" ont

Crues rapides et comportements de mobilité

pour objectif principal la prévision de la demande de transport pour répondre aux besoins d'aménagement et de planification urbaine. Ce sont des modèles de transport classiques qui permettent de générer des flux d'origine/destination avec des données agrégées. Ils sont appelés "modèles à quatre étapes" puisqu'ils contiennent généralement quatre modules successifs : la génération du flux (estimation du flux de trafic émis et reçu pour chaque zone), le choix de destination (construction de matrices d'origines/destinations), le choix du mode de transport et les choix de routes empruntées (affectation du trafic généré au réseau routier).

McNally and Rindt (2000) ont identifié les principales limites des modèles de mobilité "*trip-based*" :

- L'uni-directionnalité : Les choix individuels de déplacements dans ces modèles sont simulés sous forme de séries successives et linéaires de choix (nombre de déplacement, distribution des déplacements, mode de transport et choix de route) ;
- La séquentialité : Ces modèles ne prennent pas en considération les séquences d'activités des individus ;
- L'agrégation des données : La mobilité n'est pas simulée à l'échelle individuelle. Ces modèles génèrent plutôt des flux de déplacement entre des zones géographiques ;
- L'aspect comportemental : Puisque la mobilité n'est pas individu-centrée, la représentation des comportements individuels est absente de ces modèles.

Afin de dépasser ces limites, une approche plus récente de la modélisation de la mobilité a vu le jour et considère les déplacements comme le résultat des besoins et désirs d'effectuer des activités qui sont distribuées dans l'espace et le temps. Cette approche, appelée "*Activity-based*", vise à simuler la mobilité à une échelle plus fine (individu ou ménage) en essayant de prendre en considération l'aspect comportemental dans les différents choix de déplacement. Elle provient des travaux du sociologue Chapin (1974) et du géographe Hägerstrand (1970) en "*Time Geography*" qui postulent que la compréhension de la mobilité nécessite l'analyse des *patterns* d'activités et des décisions individuelles relatives à la planification des programmes d'activités quotidiens (avec qui, où, quand et pour quelle durée). McNally and Rindt (2000) ont identifié cinq caractéristiques fondamentales dans l'approche "activités-centrée" de la modélisation de la mobilité :

- Les déplacements résultent des besoins d'implémenter une liste d'activités ;
- L'accent est mis sur les séquences et *patterns* d'activités plutôt que sur les déplacements ;
- Les effets des caractéristiques socio-démographiques des individus et la structure des ménages sur les comportements de mobilité sont pris en considération ;
- Les effets des contraintes spatio-temporelles et personnelles sur les comportements de mobilité sont intégrés ;

- Les processus de planification des activités à l'échelle de l'individu et du ménage sont pris en compte.

3.2.2 La composante comportementale dans les modèles de mobilité "activités-centrés"

Puisque les modèles de mobilité activités-centrés se basent essentiellement sur les programmes d'activités des individus, il est nécessaire de comprendre comment les individus organisent et planifient leurs déplacements et leurs activités quotidiennes. On peut distinguer entre les choix qui sont liés aux activités (le type d'activité à réaliser, les durées d'activité, les horaires de départ et la localisation des activités) et ceux qui sont plutôt liés aux déplacements (le mode de transport et le choix de route). Pas (1985) liste les différents éléments qui peuvent intervenir dans la planification des déplacements et des activités de la manière suivante :

- Les choix concernant les activités (tels que les durées et les lieux d'activités) ;
- Les choix concernant les déplacements (modes de transport, durées allouées aux déplacements, choix de route) ;
- Les choix de séquençage et d'organisation des activités et des déplacements ;
- Le rôle des caractéristiques socio-démographiques des individus ;
- Le rôle des caractéristiques du ménage et les contraintes familiales associées ;
- Les contraintes environnementales (horaires d'ouverture et de fermeture, états des routes et congestion, distribution spatiale des zones d'activités...). Les conditions météorologiques peuvent être considérées parmi les contraintes environnementales.

On peut classer les modèles de mobilité "*Activity-based*" en fonction de l'approche utilisée dans la définition des règles de planification et d'organisation des activités ("*Activity scheduling*"). On identifie deux grandes familles : les modèles basés sur une approche dite économique où les individus tendent à maximiser leurs utilités dans la sélection des alternatives (appelée "*Utility-based*"), et les modèles qui essaient de prendre en considération les biais et heuristiques de décision en se basant sur des règles de décision issues de l'analyse des données d'observation (appelée "*Rule-based*").

Les modèles "Utility-based"

L'une des approches fondamentales dans la modélisation de la planification des activités et des déplacements consiste à considérer que les individus tendent à optimiser leurs choix en maximisant une certaine utilité associée à ces choix. L'utilité ici exprime à quel point les choix effectués permettent de répondre aux besoins des individus en termes de bénéfices et de gains (réduire le temps et le coût de transport, répondre aux contraintes familiales et

professionnelles...). Dans ces modèles, les individus sont considérés avoir une connaissance parfaite de tous les choix de mobilité et une capacité à identifier les choix optimaux. Les limites de cette approche concernent les hypothèses de la rationalité et de la connaissance parfaite attribuée aux individus, hypothèses qui ne correspondent pas à forcément à la réalité. Parmi ces modèles on peut citer les modèles SMART (Stopher et al., 1996), PETRA (Fosgerau, 2002) et GaMiroD (Fosset et al., 2016) qui sont décrits dans la table II.2.

Les modèles "Rule-based"

L'hypothèse de maximisation d'utilité dans la planification des activités et des déplacements réduit considérablement l'aspect réaliste des modèles qui suivent une approche "*utility-based*". De plus, cette hypothèse n'est pas adaptée pour la modélisation des comportements de mobilité en situation de crise où les individus ne disposent pas du temps nécessaire pour optimiser leurs choix. Par contre, certains travaux ont essayé d'exploiter les théories développées en psychologie concernant les processus de prise de décision pour introduire plus de flexibilité dans la modélisation des décisions de déplacements et de planification des activités. Ainsi, au lieu de maximiser leurs utilités, les individus ont tendance à utiliser des heuristiques et des règles de décision ("*If Then*" rules) pour résoudre les problèmes de décisions. Le modèle "SCHEUDLER" (Gärling et al., 1994) est l'une des premières illustrations de l'approche "*rule-based*" dans la modélisation de la planification des activités. Les fondements théoriques du modèle sont les suivants :

- Les individus attribuent des priorités et des préférences aux différentes activités qui sont prises en compte dans le processus de décision et de sélection de ces activités ;
- Le processus de planification des activités respecte des plages temporelles intermédiaires ce qui veut dire que certaines activités se planifient au fur et à mesure ;
- Les décisions sont prises en fonction des informations perçues et disponibles aux individus. Ces informations peuvent donc être incomplètes et biaisées ;
- Les individus n'essaient pas d'optimiser leurs choix mais plutôt de suivre des règles de décision.

Parmi ces modèles on peut citer : STARCHILD (Recker et al., 1986) et ALBATROSS (Arentze and Timmermans, 2004) décrits dans la table II.2.

Table II.2 Description des modèles de mobilité "Activity-based" cités

Modèles	Approche	Objectifs
SMART	Utility-based	Il permet de simuler les programmes d'activités à l'échelle du ménage, le trafic résultant et les <i>patterns</i> d'occupation du sol.
PETRA	Utility-based	Il est développé dans le cadre d'un programme de recherche Danois comme une extension d'un modèle " <i>trip-based</i> " de demande de transport.
GaMiroD	Utility-based	Il est développé dans le cadre du projet MIRO qui a pour objectif de simuler les mobilités quotidiennes en se basant sur une plateforme de simulation multi-agents. Il a été appliqué dans l'agglomération de Grenoble afin de mesurer l'exposition de la population à la pollution d'air.
STARCHILD	Rule-based	Il permet de simuler les déplacements et les programmes d'activités à l'échelle individuelle en fonction des contraintes des membres du ménage.
ALBATROSS	Rule-based	Il permet de simuler les processus de planification des activités quotidiennes en fonction de règles et heuristiques de décision en prenant en compte les stratégies de re-planification des activités face aux contraintes environnementales et familiales. Il a été appliqué essentiellement à Eindhoven (au Pays-Bas) pour simuler les comportements de mobilité et à Utrecht afin de simuler l'exposition à la pollution d'air (Beckx et al., 2009).

3.2.3 Les variables qui déterminent les choix de mobilité

On peut regrouper les variables qui influencent les différents choix de déplacement et d'activité en trois catégories principales :

- Les variables liées aux caractéristiques socio-démographiques de l'individu (l'âge, le genre, la profession...) et du ménage (le nombre d'enfant, le statut familial, le nombre de voiture par ménage..).
- Les variables liées aux contraintes spatio-temporelles environnementales (telles que la distribution spatiale des lieux d'activité, les horaires d'ouverture et de fermeture, les conditions météorologiques). Hägerstraand (1970) a identifié trois types de contraintes. Les contraintes de capacité ("*capability constraints*") limitent "l'univers des possibles" des individus pour des raisons physiologiques (par exemple le besoin de dormir et de se nourrir) et techniques (par exemple la vitesse de déplacement). Les contraintes de conjonction ("*coupling constraints*") qui renvoient à la nécessité de la présence d'individus et d'outils nécessaires pour effectuer les tâches requises dans un même espace-temps. Par exemple, afin de travailler il est nécessaire de se rendre dans un

lieu précis à certaines heures pour disposer des outils nécessaires pour effectuer la tâche. Enfin, les contraintes d'autorités ("*authority constraints*") qui renvoient surtout à la notion de domaine ou zone dont l'accès est contrôlé par une entité extérieure, par exemple les lieux d'activité ne sont accessibles que pendant des horaires spécifiques.

- La flexibilité des activités : Le niveau de flexibilité des activités joue un rôle important dans la planification des déplacements individuels. Damm and Lerman (1981) définissent la flexibilité d'une activité comme le degré auquel l'implémentation de l'activité peut être modifiée du point de vue spatial (changement de lieu d'activité) et temporel (horaire et durée de l'activité). Ainsi, certaines activités sont plus prioritaires que d'autres et sont alors planifiées en premier lieu et peuvent difficilement être modifiées ou annulées.

3.2.4 Positionnement de la thèse

Contrairement à l'approche "Trip-based", l'approche dite "activité-centrée" dans la modélisation de la mobilité quotidienne semble être la plus adaptée et appropriée à notre problématique pour trois raisons principales :

- Elle permet de simuler la mobilité à l'échelle individuelle et à une échelle spatio-temporelle assez fine, compatible avec celle du phénomène de crues rapides ;
- Elle prend en considération les motifs des déplacements des individus qui constituent un facteur important dans l'adaptation des comportements de mobilité face aux conditions météorologiques extrêmes ;
- Elle permet d'intégrer les processus de décision, d'adaptation et de re-planification des activités ("*activity rescheduling*").

Cependant, au niveau de la modélisation des décisions de déplacement et la planification d'activités, peu de travaux se sont attachés à la modélisation des décisions d'adaptation dans un contexte de fortes contraintes environnementales. En effet, la majorité des modèles de mobilité développés cherchent à simuler la mobilité en situation quotidienne. Même si les modèles "*Rule based*" permettent de donner plus de réalisme dans la représentation des processus de décision de déplacement, ils se basent toujours sur une approche qui considère que les individus essaient de maximiser une certaine utilité dans les différents choix. Alors que cette hypothèse est appropriée dans les situations quotidiennes, elle ne peut pas être adoptée dans un contexte de risque dans lequel d'autres paramètres doivent être prise en compte (attitude face au phénomène, perception du danger...). En effet, la question des processus de décision en situations de risque a surtout été traitée en psychologie et en économie. Nous regardons alors dans la section suivante les principales théories et approches développées qui pourraient servir pour modéliser les décisions d'adaptations des mobilités en situation de

risques hydro-météorologiques.

3.3 Modélisation des processus de prise de décision en situation de crise

Nous avons vu dans la section précédente que les modèles de mobilité suivant une approche "*activity-based*" intègrent forcément la modélisation des processus de prise de décisions liées à la planification des déplacements et des activités à effectuer. En effet, les deux approches identifiées (basées sur la maximisation de l'utilité ou sur des règles de décision) proviennent principalement des travaux de modélisation des décisions individuelles issus de la psychologie et de l'économie. Ces derniers ont mis plus l'accent sur les décisions en situation de risque et d'incertitude. Nous essayons alors dans cette section d'identifier les principales théories et techniques de modélisation des décisions en situation de risque afin d'identifier celles adaptées à notre problématique.

3.3.1 Difficultés de collecter des données d'observation

Alors que les développements visant à modéliser la mobilité quotidienne ont été consolidés par les avancées techniques et méthodologiques dans la collecte des données d'observation, la modélisation des décisions d'adaptation des comportements de mobilités en situation de crise se confronte à des difficultés méthodologiques concernant le recueil des données. Puisque la mise en place de systèmes d'observation directe des comportements individuels en situation de crues rapides n'est pas envisageable vu la difficulté de prédire ces événements, les efforts de collecte de données se sont portés sur la mise en place d'enquêtes de types "comportements déclarés" et d'enquêtes de retour d'expérience (Ruin, 2007; Ruin et al., 2014). Certes, ces travaux ont permis d'identifier des facteurs expliquant les comportements individuels en situation de crise et de comprendre certains processus sociaux et cognitifs dans l'adoption des comportements de protection. Cependant, l'hétérogénéité des données recueillies ne permet pas de les exploiter directement comme données d'entrée d'un modèle de simulation des décisions d'adaptation face aux dégradations des circonstances environnementales.

Dans le domaine de la psychologie, plusieurs travaux se sont attachés à modéliser les processus de prise de décision (Johnson and Busemeyer, 2010; Kahneman and Tversky, 1979). Ces derniers se sont basés sur des théories permettant de représenter conceptuellement ou mathématiquement certains processus qui interviennent dans les situations de prise de décision. Les théories sont souvent utilisées dans l'étude des comportements humains en identifiant les facteurs explicatifs de certains comportements et des hypothèses d'interaction entre ces facteurs. Ces théories sont généralement évaluées et validées par la mise en place des protocoles expérimentaux qui permettent d'observer les décisions d'un échantillon d'individus dans le cadre d'expériences conduites en laboratoire (Kahneman and Tversky, 1979). D'autres approches utilisées dans la modélisation des décisions individuelles consistent à la construction

de différents scénarios et règles de décision qui permettent de simuler et d'explorer des comportements hypothétiques. Nous présentons dans la section suivante quelques bases théoriques identifiées dans la littérature concernant la modélisation de prise de décision.

3.3.2 Les différentes théories et approches dans la modélisation de la prise de décision

D'une manière générale, la modélisation des processus de prise de décisions se base sur quatre composantes principales :

- *Le décideur* : la personne qui se trouve en situation de prise de décision et ses caractéristiques ;
- *Les alternatives* : les différentes options possibles ;
- *Les attributs* : les caractéristiques des différentes alternatives qui permettent au décideur de les comparer et les évaluer ;
- *Les règles de décision* : processus utilisés par le décideur pour sélectionner une alternative.

Dans la littérature, plusieurs théories proposent des approches différentes de la modélisation des processus de prise de décision en situation de risque. Ces théories diffèrent en fonction de la génération des différentes alternatives et leurs attributs et surtout des règles en fonction desquelles les individus évaluent et prennent leur décision finale. Johnson and Busemeyer (2010) distinguent trois approches principales : une approche "*normative*" qui s'intéresse à définir la décision optimale que les individus doivent prendre, une approche "*descriptive*" qui essaie plutôt de décrire comment les individus prennent des décisions dans la vie réelle, et une approche "*rule-based*" ou "*computationnelle*" qui s'intéresse à représenter les processus cognitifs mis en oeuvre dans un contexte de prise de décision sous forme de règles d'inférences et de causalités.

Approche "normative"

L'approche normative consiste à formaliser les problèmes de prise de décision en fonction de la théorie de l'utilité espérée ("*Expected Utility*") introduite par Von Neumann and Morgenstern (1947). Elle postule que l'individu essaie de maximiser l'utilité espérée associée aux différentes actions possibles en fonction des conséquences de ces actions et de la probabilité de leurs conséquences (Équation. II.1).

$$EU_A = \sum_{i=1}^n (U_{conséquence} \cdot P_{conséquence}) \quad (\text{II.1})$$

où

EU_A est l'utilité espérée de l'action A

$U_{conséquence}$ est une évaluation de l'utilité de la conséquence de l'action A

$P_{conséquence}$ est la probabilité de la conséquence considérée quand l'action A est choisie

En pratique, l'utilisation de la théorie de l'utilité espérée exige que le décideur ait une connaissance parfaite des probabilités et des conséquences des différentes options et qu'il soit capable de calculer les avantages et les inconvénients de chaque décision afin de choisir celle qui maximise ses bénéfices. Ainsi, son application dans la vie réelle est difficile. Afin de dépasser cette limite, certaines variantes de la théorie de l'Utilité Espérée ont été développées et visent à lui donner un aspect plus réaliste. On peut citer, par exemple, la théorie de l'Utilité Espérée Subjective ("*Subjective Utility Theory*") proposée par Savage (1972) qui permet de prendre en considération la différence entre les individus dans l'évaluation de l'utilité des différentes décisions. En remarquant que les individus ne prennent pas les mêmes décisions même s'ils sont confrontés à des situations similaires, McFadden (1980) a proposé la théorie de l'Utilité Aléatoire ("*Random Utility Theory*"). Elle consiste à introduire une composante aléatoire dans le calcul de l'utilité de chaque action ce qui permet de rendre compte du caractère stochastique de l'évaluation des différentes alternatives. Outre les applications en économie, la théorie de l'utilité aléatoire est souvent utilisée dans la modélisation des choix de route dans les modèles de mobilité (Ben-Akiva and Bierlaire, 1999).

En s'inscrivant dans le cadre de l'économie néo-classique, l'approche normative attribue des comportements rationnels aux individus en considérant qu'ils sont capables d'identifier les différentes alternatives, d'évaluer leurs attributs et de sélectionner l'alternative optimale qui maximise leurs bénéfices. Cependant, l'approche rationnelle présente plusieurs limites concernant surtout le coût cognitif nécessaire aux individus pour identifier les différentes alternatives possibles, la surestimation des capacités cognitives et "computationnelles" des décideurs et la négligence du rôle de l'expérience, des biais et des heuristiques de décision.

Approche "descriptive"

En réaction au manque de réalisme des approches normatives de prise de décision, certains économistes et psychologues soulignent que la rationalité des individus est limitée en termes de capacités cognitives et d'informations disponibles (Simon, 1955). En analysant les décisions individuelles observées en situations expérimentales, Kahneman and Tversky (1979) ont mis en évidence différentes heuristiques utilisées par les individus pour prendre des décisions en situation de risque et d'incertitude. Ces heuristiques sont définies comme des stratégies cognitives qui permettent de sélectionner l'alternative la plus satisfaisante afin de fournir moins d'effort cognitif. À partir des résultats des expériences conduites en laboratoire, Kahneman and Tversky (1979) ont développé la théorie des perspectives ("*Prospect theory*") qui postule que les individus n'ont pas les mêmes attitudes face aux situations de risque. Ils ont définis deux principaux types d'attitudes face au risque : l'aversion au risque ("*Risk aversion/avoiding*") qui caractérise les individus qui ont tendance à agir en minimisant les

risques associés à leurs actions et la recherche du risque ("*Risk seeking*") qui caractérise les individus qui ont une forte tendance à maximiser leurs gains même si les risques de pertes associés sont importants. Hillson and Murray-Webster (2007) ont ajouté deux classes intermédiaires d'attitudes face au risque : la neutralité face au risque et la tolérance au risque.

Approche "Rule-based"

Cette approche considère que les comportements humains, et plus particulièrement les processus de prise de décision, peuvent être représentés comme des règles de "conditions - actions". Ces règles sont généralement identifiées à partir de l'analyse de données ou de la connaissance experte du domaine étudié et peuvent construire ce qu'on appelle "une base de connaissance" ("*knowledge base*"). Ces approches de modélisation sont souvent utilisées dans le domaine de l'intelligence artificielle et dans le développement des systèmes experts. Elles sont formalisées à travers des modèles de simulation informatique qui permettent de tester différents scénarios de comportement en se basant sur des systèmes d'inférences de conséquences à partir de différentes situations. Les approches "*rule-based*" sont adaptées pour la modélisation des systèmes dynamiques qui contiennent plusieurs éléments interagissant entre eux d'une manière non-linéaire. Elles sont souvent utilisées dans la modélisation des systèmes multi-agents afin de définir des règles d'interaction entre les agents et leur environnement et de développer ce qu'on appelle les "*what if*" scénarios (An, 2012; Macal and North, 2005). Parmi les applications de cette approche figurent des travaux concernant la modélisation de la gestion des processus d'évacuation en situation d'inondation (Dawson et al., 2011) et des réactions individuelles face aux situations d'urgence (Pan et al., 2007).

3.3.3 Positionnement de la thèse

Alors que les théories économiques s'inscrivent dans une approche d'optimisation des décisions en partant de formules mathématiques et de fonctions d'utilités, les variantes développées mettent l'accent sur le caractère subjectif et stochastique des comportements humains face à des situations de crise à travers l'utilisation des probabilités. Une approche probabiliste semble être appropriée pour représenter l'incertitude dans la modélisation des comportements humains. Les différentes expériences conduites par les psychologues afin de comprendre les processus de prise de décision ont permis de mettre en évidence que les décisions individuelles sont limitées par les informations disponibles dans l'environnement perçu des acteurs. Par ailleurs, ceux-ci utilisent des heuristiques d'évaluation et de jugement des différentes alternatives leur permettant de fournir le moins d'effort cognitif possible (génération d'un petit nombre d'alternatives, biais de perception, d'expérience...). Enfin, l'approche "*rule based*" dans la modélisation des décisions individuelles semble être la plus

appropriée à notre problématique de thèse pour les raisons suivantes :

- En plus de la possibilité de représenter la façon dont les personnes prennent des décisions à travers l'extraction de règles de comportement issues de données d'observation, l'approche "*rule-based*" offre la possibilité de construire différents scénarios de comportement en suivant une approche expérimentale tout en gardant la possibilité d'intégrer et d'alimenter les règles à partir de données spécifiquement collectées dans ce but. Ceci permettra dans notre cas de construire des scénarios de comportement face aux événements de crues rapides et d'évaluer leurs effets sur l'exposition des individus.
- Elle permet d'exploiter des connaissances dans un domaine donné et de les structurer afin de les utiliser pour simuler des comportements. Ainsi, nous pouvons exploiter les connaissances expertes acquises sur les comportements individuels en situations de crues rapides issues des enquêtes de retour d'expérience effectuées dans le cadre des précédents projets de recherche.
- La flexibilité et l'intuitivité de ces méthodes facilitent leur intégration dans des modèles plus complexes. Dans notre cas, ceci peut se traduire par un module gérant les comportements individuels, intégré dans le modèle *MobRISK*, et qui peut être utilisé et modifié sans nécessiter une connaissance experte en modélisation.
- Elles sont adaptées aux tâches de modélisation des systèmes dynamiques et de représentation des interactions complexes entre les différents éléments du système.

3.3.4 Les réseaux Bayésiens comme technique de modélisation des prises de décision

La revue des principales théories liées à la modélisation des décisions individuelles en situation de risque nous a amené à choisir une approche probabiliste qui permet de tester des scénarios de décision en se basant sur des règles de types "*conditions ... actions*". Dans cette approche de modélisation, nous orientons notre choix vers les modèles graphiques probabilistes. En plus de la manipulation des probabilités, ces modèles présentent des avantages liés à la représentation graphique qui permet de visualiser la structure du modèle. On distingue deux types de modèles graphiques probabilistes : les modèles orientés et les modèles non orientés. On s'intéressera dans cette thèse aux modèles orientés, couramment appelés réseaux Bayésiens ("*Bayesian Network*"), car ils permettent de définir des relations de causalité fixes entre les variables à l'opposé des modèles non orientés représentant une interaction non directionnelle entre les variables.

Description des réseaux Bayésiens

Les réseaux Bayésiens appartiennent à la famille des modèles graphiques. Ils permettent de modéliser des systèmes complexes en exploitant des connaissances de diverses natures (retour d'expérience, expertise, données empiriques...). Les réseaux Bayésiens, appelés aussi "réseaux de croyance" (*Belief Networks*) ou modèles graphiques probabilistes, combinent la théorie des probabilités et la théorie des graphes afin de représenter des connaissances incertaines. Le graphe du réseau Bayésien permet de visualiser les dépendances (et indépendances) entre les variables utilisées et fournit ainsi un outil visuel intuitif de représentation des connaissances. La description des notions liées à la théorie des graphes et la théorie des probabilités utilisées dans la construction des réseaux Bayésiens est disponible dans l'annexe A.

D'un point de vue formel, un réseau Bayésien $B = (G, \theta)$ est défini par :

- $G = (X, E)$, graphe acyclique orienté, où X est l'ensemble des noeuds qui représentent des variables aléatoires $X = X_1, \dots, X_n$, et E est l'ensemble des arcs qui représentent des relations de causalités entre les variables. On distingue deux types de variables : les variables observables (appelées "évidences") et les variables non observables (appelées "variables latentes"). Les évidences sont les variables qui n'ont pas de variables parentes et sont donc situées dans la couche amont du graphe alors que les variables latentes sont des variables qui ont des noeuds parents qui les influencent. La figure II.10 illustre le schéma d'un réseau Bayésien constitué par quatre variables observables (X_1, X_2, X_3 et X_4) et trois variables latentes (X_5, X_6 et X_7).
- $\theta = P(X_i | Parents(X_i))$, ensemble des probabilités de chaque noeud/variable X_i conditionnellement à l'état de ses parents $Parents(X_i)$ dans le graphe G . Ces probabilités permettent de quantifier l'influence d'une variable sur une autre.

Le fondement théorique des réseaux Bayésiens est basé sur le théorème des probabilités conditionnelles présenté dans l'équation II.2.

$$P(X|Y) = \frac{P(X \cap Y)}{P(Y)} \quad (\text{II.2})$$

où

$P(X|Y)$ est la probabilité de l'évènement X sachant l'observation de l'évènement Y ;

$P(X \cap Y)$ désigne la probabilité de l'intersection des évènements X et Y (réalisation de X et Y) ;

$P(Y)$ est la probabilité a priori de l'évènement Y.

La construction d'un modèle graphique Bayésien pour simuler les décisions consiste à identifier les variables qui peuvent influencer la prise de décision (ce qui définit la structure du modèle ou du graphe) et de quantifier les interactions entre les variables à travers

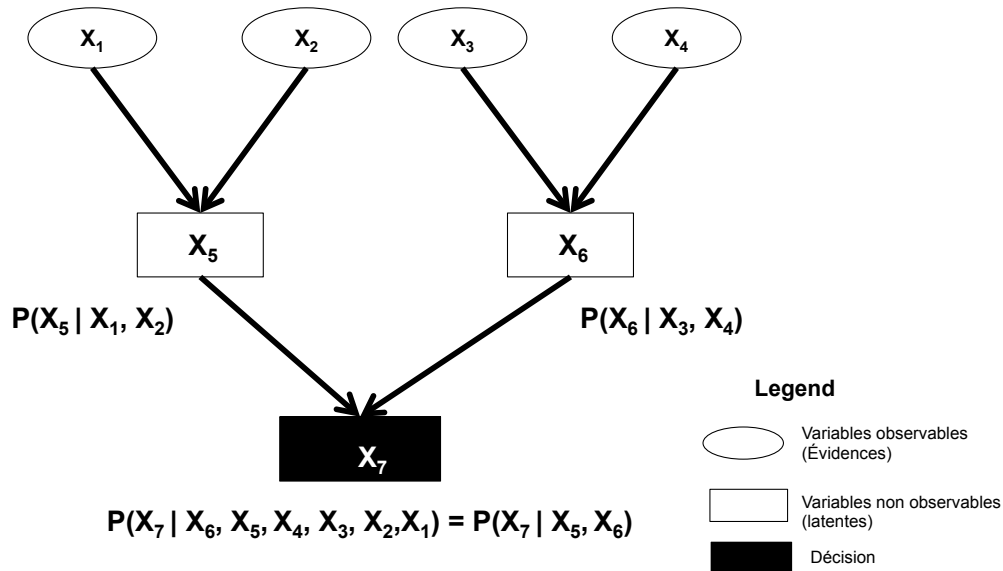


Figure II.10 Structure du réseau Bayésien

les probabilités conditionnelles (ce qui constitue les paramètres du modèle). L'hypothèse principale dans la construction des réseaux Bayésiens consiste à considérer que chaque variable est indépendante de ses non descendants et qu'elle ne dépend que de ses parents dans le graphe (Pearl, 1985, 2014).

Le fonctionnement des réseaux Bayésiens se base sur un système d'inférences. Ceci consiste à calculer les valeurs des probabilités au niveau des variables latentes non observées en fonction des valeurs observées au niveau des évidences par propagation des probabilités.

La propriété fondamentale des réseaux Bayésiens est exprimée dans l'équation du calcul des probabilités jointes sur l'ensemble des variables (Équation II.3).

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_i P(X_i | Parents(X_i)) \quad (II.3)$$

Cette relation permet de calculer la probabilité de n'importe quelle variable du modèle à partir de l'observation des autres variables par propagation de probabilité.

Exemple simplifié

Nous cherchons à modéliser la décision d'un individu de se déplacer ou pas en voiture en fonction du niveau de précipitation et de la luminosité (jour ou nuit). Nous pouvons postuler que la décision dépend d'une évaluation du danger associé au déplacement et que l'évaluation du danger est conditionnée par les niveaux de précipitation et de luminosité observés par l'individu avant de sortir. Ceci peut être formalisé par un réseau Bayésien où les niveaux

Cruces rapides et comportements de mobilité

de précipitation et de luminosité constituent les variables observables (les évidences) et l'évaluation du danger et la décision sont des variables latentes. La structure du graphe est représentée dans la figure II.11 de manière à considérer que la pluie et la luminosité influencent l'évaluation du danger qui influence à son tour la décision finale.

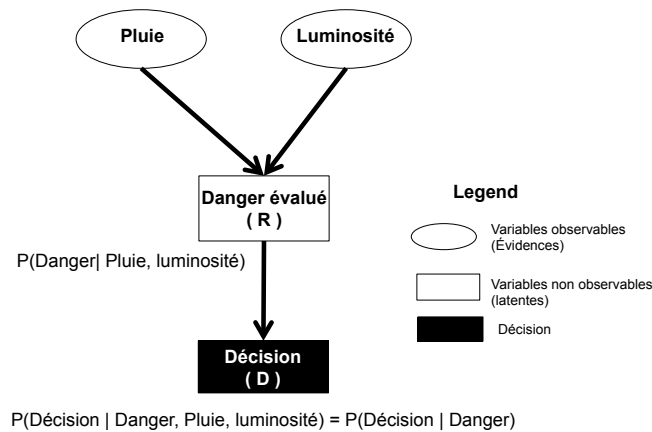


Figure II.11 Structure du réseau Bayésien de l'exemple présenté

La deuxième étape de la construction du réseau Bayésien consiste à définir les paramètres qui permettent de quantifier les dépendances entre les variables. La table II.3 représente les probabilités conditionnelles concernant la variable "évaluation du danger" de manière à postuler que le danger est évalué de façon élevée quand la pluie est forte et la luminosité faible. Ensuite, la table II.4 représente les probabilités associées à la décision de déplacement sachant le niveau d'évaluation du danger en attribuant plus de chance d'annuler le déplacement quand l'évaluation du danger est élevée.

Table II.3 Table de probabilités conditionnelles décrivant les paramètres de l'évaluation du niveau de danger. Par exemple, nous postulons que la probabilité que l'évaluation du danger soit "faible" sachant un niveau de pluie "faible" et une luminosité de "jour" est estimée à **1**.

	Pluie	Faible		Forte	
	Luminosité	jour	Nuit	Jour	Nuit
$P(\text{Danger évalué})$	Faible	1	0.9	0.3	0.2
	Élevé	0	0.1	0.7	0.8

Table II.4 Table de probabilités conditionnelles décrivant les paramètres de décision de déplacement en fonction du danger évalué. Par exemple, on suppose que la probabilité que l'individu décide de maintenir son déplacement sachant un niveau de danger perçu "faible" est estimée à **0.9**

	Danger évalué	Faible	Élevé
	$P(\text{Décision})$	Déplacement	0.9
	Annuler le déplacement	0.1	0.9

Une fois les paramètres définis, le modèle peut être utilisé afin d'estimer les décisions prises par un individu étant donné l'observation d'un niveau de pluie et d'un niveau de luminosité. Considérons, par exemple, le cas d'une situation de "nuit" avec une pluie observée "forte". Les probabilités associées aux niveaux du danger évalué sachant une pluie forte et une luminosité de nuit, peuvent être retrouvées directement à partir de la table des paramètres d'entrée II.3 :

- $P(\text{Danger} = \text{"Faible"} \mid (\text{Pluie} = \text{"Forte"}, \text{Luminosité} = \text{"Nuit"})) = 0.2$
- $P(\text{Danger} = \text{"Élevé"} \mid (\text{Pluie} = \text{"Forte"}, \text{Luminosité} = \text{"Nuit"})) = 0.8.$

En se basant sur l'équation II.3, l'estimation des probabilités relatives aux décisions dépend seulement de son noeud parent "danger évalué". Ainsi, la probabilité de la décision sachant les niveaux de danger évalué, de pluie et de luminosité se réduit à la probabilité de la décision sachant le niveau de danger (son noeud parent).

- $P(\text{Décision} \mid (\text{Danger}, \text{Pluie}, \text{Luminosité})) = P(\text{Décision} \mid \text{Danger}).$

Ensuite l'équation II.2 permet d'obtenir $P(\text{Décision} \cap \text{Danger})$ en multipliant $P(\text{Décision} \mid \text{Danger})$, retrouvée dans la table II.3, par $P(\text{Danger})$, retrouvée dans la table II.4. Le calcul des probabilités de décision par système d'inférence est présenté dans les équations II.4. Les résultats de l'implémentation de cet exemple en utilisant les paramètres définis dans les tables II.3 et II.4 indiquent que dans une situation de forte pluie et de luminosité de nuit, l'individu a une probabilité de 74% d'annuler son déplacement. En appliquant les mêmes règles de décision à un ensemble d'individus, le résultat obtenu peut être interprété comme si 74% des individus vont annuler leurs déplacements.

$$\begin{aligned}
 P(D = \text{Déplacement}) &= P(D = \text{Déplacement} \cap R = \text{Faible}) \\
 &\quad + P(D = \text{Déplacement} \cap R = \text{Élevé}) \\
 &= (P(D = \text{Déplacement} \mid R = \text{Faible}) * P(R = \text{Faible})) \\
 &\quad + (P(D = \text{Déplacement} \mid R = \text{Élevé}) * P(R = \text{Élevé})) \\
 &= (0.9 * 0.2) + (0.1 * 0.8) \\
 &= 0.26 \\
 P(D = \overline{\text{Déplacement}}) &= 1 - P(D = \text{Déplacement}) \\
 &= 0.74
 \end{aligned}$$

(II.4)

Cet exemple présente la manière de construire et d'utiliser d'un réseau Bayésien afin de calculer les probabilités associées aux possibles décisions individuelles en fonction des variables observées caractérisant la situation de prise de décision. Afin d'obtenir une seule décision (à partir des probabilités de décisions obtenues), il faut échantillonner une décision en respectant la distribution des probabilités.

3.3.5 Avantages et limites de l'utilisation des réseaux Bayésiens dans la modélisation des décisions d'adaptation

Les réseaux Bayésiens constituent des outils intéressants pour modéliser les décisions individuelles en situation de crise et peuvent facilement être adaptés à notre problématique. Nous avons identifié plusieurs points justifiant le choix de ces modèles pour la problématique de thèse :

Acquisition des connaissances :

Nous avons noté au début de cette section la difficulté d'acquérir des données d'observation structurées et complètes décrivant les modalités de prise de décision en situation de crise et d'incertitude. Malgré ces difficultés, plusieurs efforts ont été fournis afin de comprendre les mécanismes mis en place dans ces situations à l'aide de différents outils de collecte de données : questionnaires, *Stated Adaptation Survey*, protocoles expérimentaux, retour d'expérience, entretiens... Ceci a permis de constituer des connaissances de diverses natures sur ce sujet que l'on peut retrouver dans différents travaux, articles et rapports scientifiques. Les réseaux Bayésiens offrent alors une structure idéale pour pouvoir exploiter et structurer ces connaissances issues de données d'observation ou de résultats d'analyses statistiques de données existantes. Dans notre cas, les différentes enquêtes effectuées sur les comportements des individus face aux événements hydro-météorologiques extrêmes ont permis par exemple d'identifier les principaux facteurs qui influencent les décisions d'adaptation (tels que les signes environnementaux perçus, l'importance des activités planifiées, les caractéristiques socio-démographiques) ainsi que les différentes décisions adoptées par les individus dans ces situations. Ces connaissances peuvent alors être exploitées pour guider la construction d'un modèle de décision permettant la simulation des décisions d'adaptation en situation de crise.

Représentation des connaissances et facilité d'utilisation :

Les réseaux Bayésiens sont caractérisés par une représentation graphique intuitive, facile à appréhender et à utiliser par des non-spécialistes. Ceci permet de faciliter le développement et l'adaptation de ces modèles à diverses questions d'ordre opérationnel. C'est ce qui explique que ce genre de modèle est couramment utilisé pour le développement de systèmes d'aide à la décision et constitue les fondements des plateformes visant à faire interagir décideurs,

experts et modélisateurs.

Implémenter des analyses de type "WHAT IF" :

Les réseaux Bayésiens offrent la possibilité de simuler des situations qui ne sont pas forcément observables. Ils permettent le développement d'analyses de types "*What if*" qui consistent à définir des scénarios variés pour simuler les réponses du système modélisé.

Les bénéfices de l'utilisation des réseaux Bayésiens listés ci-dessus appuient le choix de ce type de modélisation pour le cadre de cette thèse. Cependant, ces modèles présentent généralement certaines limites qui sont surtout liées à la définition des paramètres du modèle représentés par les valeurs des probabilités conditionnelles. En effet, l'attribution des probabilités aux différentes combinaisons peut s'avérer une tâche délicate et complexe quand le réseau Bayésien est de grande taille et fait intervenir plusieurs variables. Ceci explique la nécessité de commencer par des modèles simplifiés et d'effectuer des analyses de sensibilité des modèles aux paramètres définis.

3.4 Conclusion

Nous avons vu dans cette section que la modélisation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes nécessite le croisement de trois dimensions d'étude : la vulnérabilité du réseau routier aux inondations, la modélisation de la mobilité quotidienne des individus et la modélisation des décisions d'adaptation des comportements de mobilité en situation de crise. Afin d'identifier les approches et les techniques les plus adaptées à notre problématique, nous avons effectué une revue des travaux antérieurs concernant ces trois dimensions d'étude. Ceci nous a permis de positionner à chaque fois la problématique de la thèse et de sélectionner les approches qui seront exploitées ultérieurement pour la construction du modèle *MobRISK* :

- **Vulnérabilité du réseau routier :** Nous avons choisi de nous baser sur les résultats des travaux de Versini (2007) et Naulin (2012) dans la caractérisation de la vulnérabilité du réseau routier du Gard aux crues rapides.
- **Modélisation de la mobilité quotidienne :** Nous avons opté pour une approche "*activity-based*" dans la modélisation de la mobilité quotidienne des individus pour simuler les déplacements routiers à l'échelle individuelle tout en prenant en considération les motifs des déplacements.
- **Modélisation des décisions d'adaptation des mobilités :** Nous avons décidé d'utiliser la technique des réseaux Bayésiens dans la modélisation des processus de prise de décision d'adaptation des comportements de mobilité face à une situation

Crués rapides et comportements de mobilité

de crise. Cette technique permet de construire des scénarios de comportement et de tester leurs effets sur l'exposition des automobilistes.

4 Synthèse

Ce chapitre a permis de définir le cadre théorique et méthodologique de la thèse, nécessaire pour aborder la problématique de l'exposition des automobilistes aux crues rapides. Nous avons décrit dans la première section les caractéristiques hydro-météorologiques des évènements de crues rapides en focalisant sur le département du Gard qui est particulièrement impacté par ces évènements extrêmes.

Dans la deuxième section, nous avons positionné l'étude de l'exposition sociale à ces évènements en tant que composante nécessaire pour la caractérisation des risques hydro-météorologiques, avec l'aléa et la vulnérabilité. Nous avons vu que dans le cas des crues rapides, la mobilité présente un facteur important augmentant l'exposition individuelle comme le prouve le nombre de victimes liées aux submersions de routes. L'étude de cette exposition, souvent négligée dans les travaux classiques concernant l'exposition sociale aux inondations, nécessite la prise en compte des comportements d'adaptations de mobilité en situation de crise. En exploitant les travaux antérieurs sur ce sujet, nous avons pu identifier trois principaux types de facteurs qui peuvent expliquer ces comportements d'adaptation : cognitifs, contextuels et socio-démographiques.

Malgré les enjeux représentés par l'exposition aux submersions de routes, les seules informations dont nous disposons proviennent de données d'impacts et aucun outil n'est disponible pour donner une estimation de la population exposée à cet aléa. Ceci nous a amené à proposer un outil de simulation de l'exposition des automobilistes aux submersion des routes, appelé *MobRISK*. Nous avons vu que le développement d'un tel outil nécessite le croisement de trois principales dimensions : la vulnérabilité du réseau routier aux inondations, la simulation de la mobilité quotidienne et la simulation des comportement d'adaptation des déplacements en situation de crise. Dans la troisième section, nous avons positionné notre problématique de thèse par rapport aux différentes approches identifiées dans les travaux antérieurs concernant ces trois dimensions d'étude. Ceci nous a permis de sélectionner les approches qui seront adoptées dans le développement du modèle *MobRISK*.

Chapitre III

Le modèle *MobRISK*

Ce chapitre décrit le modèle *MobRISK* développé dans le cadre de cette thèse pour simuler l'exposition des automobilistes aux submersions des routes dans le département du Gard. La première partie est consacrée à la présentation des objectifs et des cas d'exploitation possibles de *MobRISK*. La deuxième partie détaille les composants principaux du modèle et le fonctionnement de chacun d'eux. La troisième partie présente l'ensemble des données nécessaires en spécifiant leurs sources, leurs formats et les opérations de pré-traitements nécessaires pour l'implémentation des simulations. La quatrième partie de ce chapitre est consacrée à la description du cas d'étude choisi pour cette thèse en décrivant la zone d'étude sélectionnée ainsi que l'événement hydro-météorologique étudié et ses impacts humains et physiques.

1 Présentation générale du modèle

1.1 Objectifs

MobRISK est un modèle de mobilité activité-centré permettant de simuler l'exposition individuelle aux submersions des routes lors d'événements de crues rapides dans le département du Gard en intégrant les comportements d'adaptation de la mobilité aux perturbations environnementales. Ce modèle a été développé au LTHE dans le cadre du projet *MobiClimEx*. Dans le cadre de cette thèse, j'ai travaillé sur trois versions successives du modèle. La première version 1.0 de *MobRISK* a permis de construire une base de données qui met en relation la description socio-démographique de la population du Gard et ses mobilités journalières professionnelles et scolaires avec les données géographiques liées à la vulnérabilité du réseau routier aux crues rapides (Table III.1). Ma contribution à cette version consiste à : i) l'exploitation et l'analyse des données de sortie du modèle afin d'identifier les points de coupure qui combinent une sensibilité forte et un trafic routier simulé élevé ; ii) la proposition d'une métrique qui permet de mesurer l'exposition journalière des automobilistes en fonction du nombre de points de coupure qu'ils sont susceptibles de traverser durant leurs trajets professionnels et scolaires. Les résultats issus de cette première version ont fait l'objet d'un article scientifique publié dans *Journal of hydrology* (Debionne et al., 2016) et d'une communication orale dans le cadre de la conférence annuelle *HyMeX* (Hydrological Cycle in the Mediterranean Experiment)(Shabou et al., 2014).

Table III.1 Les différentes versions de *MobRISK*

	Version 1.0	Version 2.0	Version 2.1
Étendue spatiale	Département du Gard	61 communes autour d'Alès	61 communes autour d'Alès
Temporalité des mobilités	journalière	seconde	seconde
Types de mobilité	professionnelle et scolaire	Toute la mobilité	Toute la mobilité
Temporalité des submersions	pas prise en compte	prise en compte	prise en compte
Décisions d'adaptation	pas prises en compte	pas prises en compte	prises en compte
La congestion	prise en compte	prise en compte	pas prise en compte

La version *MobRISK* 2.0 a été développée afin : i) d'intégrer tous les types de mobilité quotidienne des individus en se basant sur les données de mobilité issues des Enquêtes Nationales Transports et Déplacements (ENTD) ; ii) de prendre en compte les temporalités des déplacements et des submersions de route (Table III.1). Ceci a nécessité l'analyse des données de mobilité issues des ENTD et le développement d'une méthode d'attribution d'emplois du temps aux individus en fonction de leurs caractéristiques socio-démographiques (décrite dans la section suivante). Cette deuxième version a été utilisée afin de simuler

l'exposition des automobilistes résidant dans le secteur d'étude à la submersion des routes lors de l'événement de crue rapide des 8-9 Septembre 2002. Les résultats obtenus ont permis de caractériser les dynamiques spatio-temporelles de l'exposition et d'identifier les tronçons de route qui présentent le plus de danger en termes de risque hydrologique et de nombre de personnes exposées. Les résultats obtenus avec cette deuxième version du modèle ont fait l'objet d'une communication orale dans le cadre de la conférence annuelle *HyMeX*¹ (Shabou et al., 2015) et d'un article scientifique en cours de révision dans *Journal of Transport Geography*.

Enfin, la version 2.1 de *MobRISK* intègre les comportements d'adaptation de la mobilité face aux perturbations environnementales. Ceci a nécessité le développement et l'application d'un modèle de prise de décision basé sur les réseaux Bayésiens. L'intégration du modèle de décision et l'exploitation de cette dernière version sont décrites dans le chapitre VI de la thèse. J'ai contribué à cette version par le développement du modèle de décision et la construction de l'interface avec l'ancienne version de *MobRISK*. L'exploitation et l'analyse des résultats obtenus avec cette version du modèle ont été présentés lors d'une communication orale dans le cadre de la conférence annuelle de l'AAG (*American Association of Geographers*) (Shabou et al., 2016).

1.2 Cas d'utilisation

L'outil *MobRISK* vise à fournir une estimation de l'exposition des automobilistes aux inondations pendant leur mobilité quotidienne lors d'événements passés de crues rapides. Le premier objectif est d'ordre scientifique et vise à étudier l'interaction entre les dynamiques hydro-météorologiques et sociales. Néanmoins, le développement de cet outil a été également guidé par des questions d'ordre opérationnel (gestion des routes, planification urbaine, alerte et prévention du risque d'inondation...). Quelques exemples de cas d'utilisation ont été identifiés ci-dessous.

Gestion des routes :

MobRISK peut être utilisé pour évaluer les effets de la réduction de la vulnérabilité physique du réseau routier sur l'exposition sociale aux inondations. Ceci peut fournir des informations importantes aux services de gestion des routes et les aider à définir des priorités dans la planification de la sécurisation des routes et des ouvrages de franchissement. Ce cas d'utilisation peut constituer une continuité des travaux effectués dans le cadre du projet *PrediFlood* dans le développement d'un outil de prévision des coupures de route dans le Gard. L'intégration de la dimension sociale associée aux mobilités routières exposées permettra d'apporter une plus-value à cet outil.

1. <http://www.hymex.org/?page=public/workshops/9/programme>

Opérations de sécurisation des biens et des personnes :

Grâce à la prise en compte de la vulnérabilité du réseau de routier et du trafic associé, *MobRISK* permet d'identifier les sections de route qui présentent un danger potentiel pour les automobilistes et les profils socio-démographiques de ces derniers, permettant ainsi de mieux cibler les messages de prévention à transmettre. Ces informations pourraient permettre de mieux anticiper les opérations de secours lors d'événements de crues rapides.

Travaux de recherche en psychologie :

Plusieurs travaux en psychologie environnementale et cognitive s'intéressent aux comportements humains dans des situations de risque. En intégrant un modèle de prise de décision prenant en compte des processus cognitifs tels que l'évaluation du risque et l'attitude face aux risques environnementaux, *MobRISK* offre une plate-forme de simulation permettant de tester et d'expérimenter différents scénarios de prise de décision et d'évaluer leurs impacts sur l'exposition des usagers de la route.

Alertes et vigilance :

La vigilance météorologique constitue l'un des outils majeurs pour diminuer les pertes humaines. Plusieurs travaux ont souligné l'importance de la temporalité des alertes et des informations de vigilance ainsi que leurs contenus dans la réduction de l'exposition des populations (Créton-Cazanave et al., 2013; Demeritt et al., 2010; Drabek, 1999; Morss et al., 2008). Par l'introduction de données décrivant les alertes, *MobRISK* offre la possibilité de tester les effets de différents scénarios d'alerte et de vigilance sur l'exposition individuelle.

2 Architecture du modèle *MobRISK*

MobRISK est constitué de trois composants principaux : un modèle de mobilité qui permet de générer les déplacements routiers individuels, un modèle qui simule les différents changements environnementaux tels que la submersion des routes et les niveaux de précipitation et un modèle de décision qui génère les décisions individuelles d'adaptation des déplacements face aux changements environnementaux perçus. Les différentes simulations sont gérées par un Simulateur à Événements Discrets (DES) et les données d'entrée sont stockées et connectées dans une base de donnée spatiale relationnelle (Fig.III.1).

2.1 Simulateurs à événements discrets

La simulation à événements discrets (DES) est une technique de modélisation informatique qui représente les changements d'états d'un système donné comme une suite d'événements discrets. Cette technique de simulation est généralement utilisée dans l'étude des systèmes

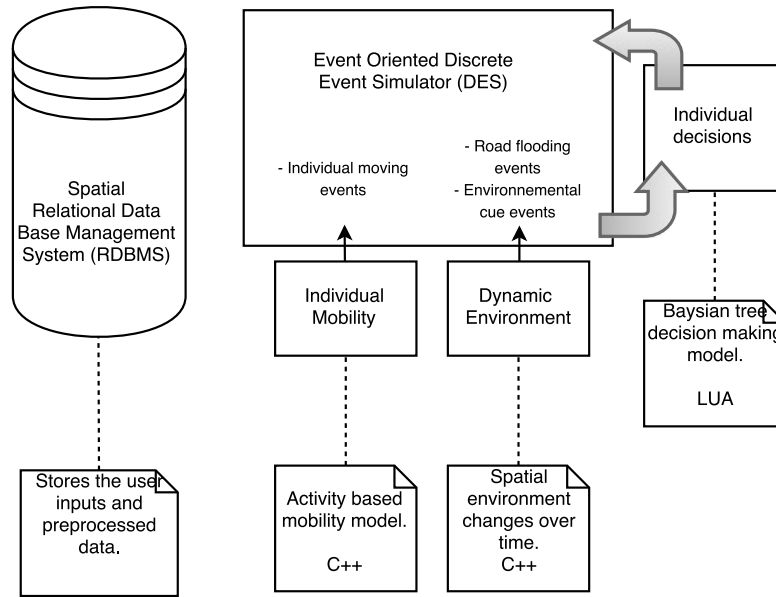


Figure III.1 Architecture globale du modèle *MobRISK*

organisationnels et des systèmes complexes avec des dynamiques non-linéaires (Fujimoto, 2000; Robinson, 2014).

Par opposition aux simulations en temps continu, où on observe les états d'un système à chaque instant t , les DES ne prennent en compte que les instants où survient un changement de l'état du système. On appelle ces instants "*des événements*". Ainsi, entre deux événements successifs, le système étudié est considéré comme fixe. Un événement peut être caractérisé par la situation qui le déclenche et par les éléments du système qui sont susceptibles d'être affectés par l'événement.

2.1.1 Liste des *événements* considérés dans *MobRISK*

Six types d'événements sont considérés dans *MobRISK* et peuvent être classés en deux catégories :

- Les événements qui affectent l'environnement simulé sans déclencher de modification dans les comportements des individus (tels que les événements de submersion des routes et de déplacements individuels).
- Les événements qui affectent les individus et qui sont susceptibles de générer des comportements d'adaptation à travers l'implémentation du modèle de décision (tels que le franchissement d'un point de coupure, la fin de l'activité en cours, les signes environnementaux perçus ou encore la réception d'une information d'alerte ou de vigilance par la population)

Submersion des routes (*Submersion events*) :

Ces événements sont déclenchés par le changement d'état des routes et de leurs niveaux de submersion. Les événements de submersion affectent l'environnement géographique et plus spécifiquement les points de coupures qui sont situés sur le réseau routier. Ainsi l'événement "submersion des routes" renvoie à un changement de la probabilité de submersion au niveau des points de coupures à un instant t . Ces événements sont stockés dans une table qui contient l'identifiant du point de coupure, l'horaire du changement de la probabilité de submersion et le nouveau niveau de probabilité de submersion. Il est à noter que, pour chaque point de coupure, la probabilité de submersion est considérée comme invariable entre deux événements successifs.

Déplacement des individus (*Agent-move Events*) :

Les événements de déplacement concernent le changement de position des individus durant la simulation. Ils permettent d'identifier les différents nœuds routiers par lesquels les individus sont passés durant un déplacement d'un lieu d'origine à un lieu de destination et les horaires des différents passages. Ceci permet de retracer et reconstituer les itinéraires individuels.

Traversé des points de coupure (*Bottleneck Events*) :

Ces événements sont déclenchés à chaque fois qu'un individu traverse un point de coupure. À chaque fois qu'un individu se retrouve en face d'un point de coupure, le modèle de décision est implémenté afin d'évaluer le niveau de danger perçu et la décision prise par l'individu.

Fin d'activité (*Activity-end Events*) :

Les événements de "fin d'activité" sont déclenchés à chaque fois qu'un individu finit une activité donnée, induisant un déplacement vers le lieu de l'activité suivante dans son emploi du temps. A chaque fin d'activité, le modèle de décision est appelé afin que l'individu évalue les conditions hydro-météorologiques de son environnement et qu'il prenne une décision par rapport à l'implémentation de la prochaine activité.

Signes environnementaux (*Environmental cue events*) :

Ces événements sont déclenchés lors des changements de l'état des composantes de l'environnement perçu par les individus en dehors des routes. Dans la version de *MobRISK* utilisée dans cette thèse, seuls les changements en terme de précipitation sont pris en compte. Ainsi, les événements "*Environmental cue*" permettent aux individus qui se retrouvent dans la zone géographique affectée d'adapter leurs comportements en fonction du niveau de précipitation enregistré. Ces événements sont stockés dans une table qui contient le type de perturbation environnementale (exemple : précipitation), le niveau de perturbation, l'horaire de l'événement ainsi que la surface géographique impactée.

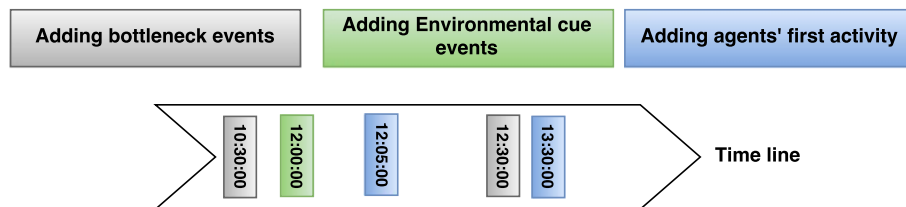
Alerte et vigilance (*Broadcast Events*) :

Ces événements enregistrent les différentes informations d'alertes et de vigilances envoyées à la population et qui sont susceptibles de générer des modifications dans leurs comportements de mobilité. Ils sont stockés dans une table qui contient le type d'alerte, la source d'information, l'horaire et le niveau d'alerte ainsi que la zone géographique concernée.

2.1.2 Déroulement des simulations

La figure III.2 représente le déroulement des simulations dans *MobRISK*. Tout d'abord, les événements de submersion de route (*Submersion events*) sont importés et placés sur l'axe du temps (appelé "*scheduler*"); sont ensuite importés les événements des signes environnementaux (*Environmental cues*). Ensuite, pour chaque individu, la première activité planifiée dans l'emploi du temps est enregistrée. A la fin de la première activité ("*Activity-end event*"), *MobRISK* identifie le lieu de la prochaine activité et calcule l'itinéraire le plus court en temps pour l'atteindre en faisant déplacer l'individu sur les nœuds du réseau routier et en enregistrant à chaque fois les horaires d'arrivée à chaque nœud ("*Agent-move events*"). Si l'un de ces nœuds correspond à un point de coupure, le modèle de décision est implémenté afin d'identifier la décision de l'individu par rapport à l'activité suivante (*Bottleneck events*). Cette procédure est répétée pour tous les individus jusqu'à la fin de la période de l'événement de crue rapide simulé.

Initialising



Running

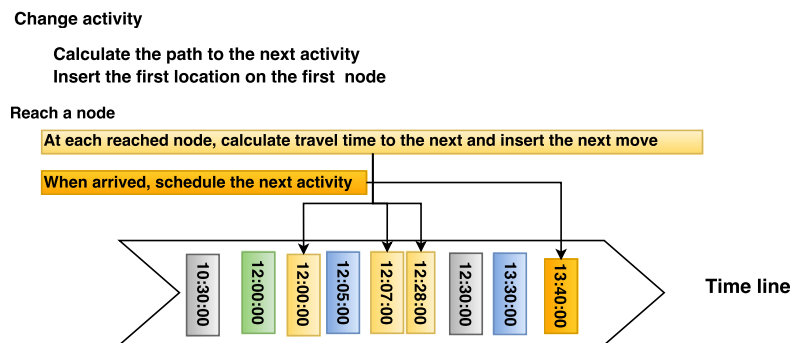


Figure III.2 Processus des simulations à événements discrets dans *MobRISK*

2.1.3 Construction des scénarios de simulations

L'implémentation des simulations de *MobRISK* se base sur deux concepts principaux : les projets et les scénarios. Un projet consiste à définir le domaine d'étude (l'aire géographique considérée) et toutes les données d'entrée nécessaires pour le fonctionnement du modèle. La construction des scénarios consiste à définir des schémas d'expérimentation en modifiant des paramètres d'entrée du modèle pour étudier un aspect particulier. Trois familles de scénarios peuvent être mis en place dans *MobRISK* : des scénarios de coupures de route, des scénarios de décision et des scénarios de mobilité. La construction de ces scénarios est basée sur les modifications successives des paramètres d'entrée qui sont liés aux submersions des routes, au modèle de décision ou encore à la mobilité de la population (Table III.2).

Table III.2 Construction des scénarios de simulation dans *MobRISK*

Variables et paramètres d'entrée	Types de scénarios		
	Décision	Coupures des routes	Mobilité
Submersion des routes	constants	variables	constants
Paramètres de décision	variables	constants	constants
Paramètres de mobilité	constants	constants	variables

Les scénarios de décision :

Les scénarios de décision permettent de tester les effets des différentes règles de décision individuelle sur l'exposition aux submersions des routes. La mise en place de ces scénarios consiste à sélectionner un événement de crue rapide à étudier, reproduire la mobilité de la population qui correspond à la période de l'événement et faire varier les paramètres du modèle de décision (e.g. les alternatives possibles, les règles de décision face au risque...). Ces scénarios permettent de répondre à des questions telles que :

- Quel est l'effet des décisions d'adaptation de la mobilité (annuler des déplacements, décaler des activités, s'arrêter, rentrer à la maison...) sur l'exposition des automobilistes aux submersions des routes ?
- Quel est l'effet de l'évaluation du danger sur leurs niveaux d'exposition ?
- Quel est l'effet des contraintes de mobilité (importance et flexibilité des activités) sur l'exposition individuelle aux submersions routières ?

Les scénarios de coupure des routes :

Les scénarios de coupure de routes consistent à modifier des paramètres liés à la dynamique spatio-temporelle de l'aléa hydro-météorologique afin d'évaluer leurs effets sur l'exposition des automobilistes. L'effet de la temporalité de l'événement, par exemple, peut être estimé en décalant les horaires de submersion des routes. Les scénarios de coupure de routes peuvent aussi être utilisés pour identifier les routes les plus critiques en terme de danger pour la population. Ceci est possible en modifiant le risque de submersion de certaines routes et en

mesurant les changements que cela entraîne sur l'exposition totale des automobilistes.

Les scénarios de mobilité :

Les scénarios de mobilité consistent à modifier des paramètres liés à la mobilité des automobilistes (e.g. mobilité en jour de semaine ou jour de weekend) et estimer leurs effets sur l'exposition.

Après avoir décrit dans cette partie le fonctionnement du simulateur à événements discrets (DES) qui gère les différentes simulations dans le modèle *MobRISK*, les six types d'évènements pris en compte et la construction des scénarios de simulation, les prochaines sections présenteront les trois principaux modules de *MobRISK* : le module de simulation des mobilités, le module de simulation des changements environnementaux et le module de simulation des décisions d'adaptation.

2.2 Description des modules et de la base de donnée

2.2.1 Module de simulation des mobilités

La modélisation de la mobilité individuelle dans *MobRISK* est basée sur une approche "*activity-based*" dans laquelle les déplacements résultent du besoin d'effectuer des activités qui sont distribuées dans l'espace. Ainsi, chaque individu a un emploi du temps composé par une séquence d'activités décrivant les types d'activités (e.g. Travail, Achat, Loisir...), les horaires des fins d'activité et leurs durées respectives. De plus, chaque individu est rattaché à des zones d'activité spécifiques qui correspondent aux différents lieux où il est susceptible d'effectuer ses activités quotidiennes.

A chaque fois qu'une activité est finie, un événement "fin d'activité" est déclenché afin d'évaluer la situation de l'environnement perçu par l'individu et d'identifier l'activité suivante. Ensuite, *MobRISK* calcule l'itinéraire qui permet d'atteindre le lieu de l'activité suivante. Plusieurs travaux ont montré que la minimisation du temps du trajet constitue le critère principal dans les choix d'itinéraire (Bekhor et al., 2006; Papinski et al., 2009; Ramming, 2001). Ainsi, l'itinéraire le plus court en temps est choisi en se basant sur l'algorithme de Dijkstra utilisé fréquemment dans le calcul des itinéraires routiers (Dijkstra, 1959).

Fonctionnement de l'algorithme de Dijkstra. L'algorithme de Dijkstra est basé sur la théorie des graphes et permet de résoudre le problème du plus court chemin. Le réseau routier est représenté comme un graphe orienté où les sommets correspondent aux nœuds routiers et les arcs correspondent aux tronçons de route qui relient les nœuds entre eux. Une pondération peut être appliquée aux tronçons de route selon les critères choisis tels que la longueur du tronçon ou le temps de trajet qui peut être estimé en fonction de la distance et de la vitesse maximale autorisée (qui dépend du type de route : autoroute, nationale ou départementale).

2.2.2 Module de simulation des changements environnementaux

Ce module gère les différents changements et dynamiques de l'environnement physique simulé. Ces changements se réfèrent essentiellement aux niveaux de submersion des points de coupure et des précipitations enregistrés dans la fenêtre spatio-temporelle de l'événement étudié. Les niveaux de submersion se basent sur les simulations des débits aux points de coupure pour un événement de crue donné. Ils sont utilisés comme des données d'entrée du modèle produites indépendamment par un modèle hydrologique.

2.2.3 Module de simulation des décisions d'adaptation

L'objectif principal de l'intégration d'un modèle de décision est de tester les effets de différentes règles de décision sur l'exposition individuelle aux submersions des routes. Pour chaque individu, le modèle de décision est implémenté quand l'un des événements déclencheurs de décision est enregistré (traverser un point de coupure, fin d'activité, perception de signes environnementaux ou réception d'information de vigilance météo). Le modèle de décision permet alors d'évaluer le niveau de dangerosité de la situation et de générer une décision concernant la prochaine activité à effectuer. Il se base pour cela sur les variables qui permettent de décrire la situation environnementale au moment de la prise de décision et sur les caractéristiques socio-démographiques de l'individu. La figure III.3 schématise l'interface entre les simulations dans *MobRISK* et le modèle de décision. À chaque fois qu'un événement est enregistré, une liste de variables est renvoyée au modèle de décision. Ces variables d'entrée permettent de générer une décision qui sera ensuite renvoyée et implémentée par le simulateur *MobRISK*.

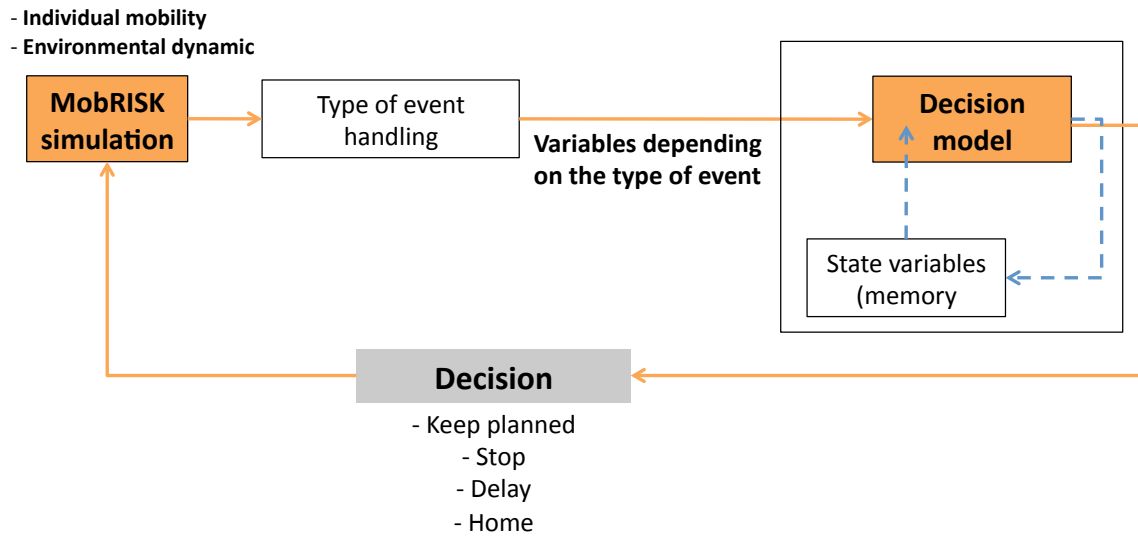


Figure III.3 Interface MobRISK/Modèle de décision

Les données d'entrée du modèle de décision :

Comme indiqué précédemment, les données d'entrée du modèle de décision permettent essentiellement de caractériser le contexte de prise de décision. Ces données dépendent du type d'événement déclencheur. La table III.3 décrit les différentes variables considérées pour chaque type d'événement.

Table III.3 Liste des variables d'entrée du modèle de décision

Variables	Événements			
	<i>Bottleneck</i>	<i>Broadcast</i>	<i>Environmental cue</i>	<i>Activity-end</i>
Age	X	X	X	X
Genre	X	X	X	X
Profession	X	X	X	X
Probabilité de submersion	X			
Horaire	X		X	X
Niveau de précipitation	X		X	X
Niveau d'alerte		X		
Motif du déplacement	X			X
Activité en cours		X	X	X

Les données de sortie du modèle de décision :

Les données de sortie du modèle de décision sont constituées du niveau de danger évalué par l'individu et de la décision sélectionnée. Les descriptions des différentes décisions implémentées dans *MobRISK* sont présentées dans la table III.4.

Table III.4 Description des décisions possibles implémentées dans *MobRISK*

Décisions	Descriptions
<i>KEEP PLANNED</i>	Aucune modification apportée aux déplacements et aux activités planifiées.
<i>HOME</i>	Annulation de l'activité planifiée et retour à la maison.
<i>STOP</i>	S'arrêter avant de traverser le point de coupure. La durée de l'arrêt est introduite par l'utilisateur comme paramètre du modèle.
<i>DELAY</i>	Décaler l'heure du déplacement. La durée du retard est introduite par l'utilisateur comme paramètre du modèle.

2.2.4 Gestion de la base de données

MobRISK utilise des données sociales décrivant les caractéristiques socio-démographiques de la population et leurs emplois du temps quotidiens (jours de semaine et weekend) ainsi que des données spatiales qui décrivent les réseaux hydrographiques et routiers, les niveaux de submersion aux points de coupure, les niveaux de précipitation... Afin d'étudier l'exposition des populations à un événement de crue rapide, une étape de pré-traitement des données est nécessaire. Elle permet de sélectionner et de connecter les données d'entrée qui correspondent à la fenêtre spatiale de la zone d'étude et à la fenêtre temporelle de l'événement hydro-météorologique sélectionné. Ceci se fait par la création d'une base de donnée relationnelle spatialisée à l'aide de l'outil "*SPATIALITE*". La description du schémas principal de la base de donnée relationnelle est présentée dans la figure III.4. Le pré-traitement des données sociales permet de connecter chaque individu à un ménage, un emploi du temps et les différentes zones d'activités (figure. III.4.a). Concernant les données spatiales, chaque point de coupure est rattaché à un tronçon de route et un tronçon de rivière ainsi qu'aux niveaux de submersion simulés pendant l'événement étudié (figure. III.4.b).

Nous avons décrit dans cette partie l'architecture du modèle *MobRISK* et les différents modules qui le composent. *MobRISK* est constitué essentiellement d'un simulateur à événements discrets (DES) et de trois modules qui permettent de simuler les mobilités individuelles, les changements environnementaux et les décisions d'adaptation des déplacements. Le fonctionnement de ces modules nécessitent différentes données sociales (décrivant la population et les emplois du temps individuels) et spatiales (décrivant les réseaux routiers et hydrographiques, les points de coupure, les précipitations...). Nous allons décrire dans la section suivante les différentes données utilisées, leurs sources ainsi les opérations de pré-traitements nécessaires.

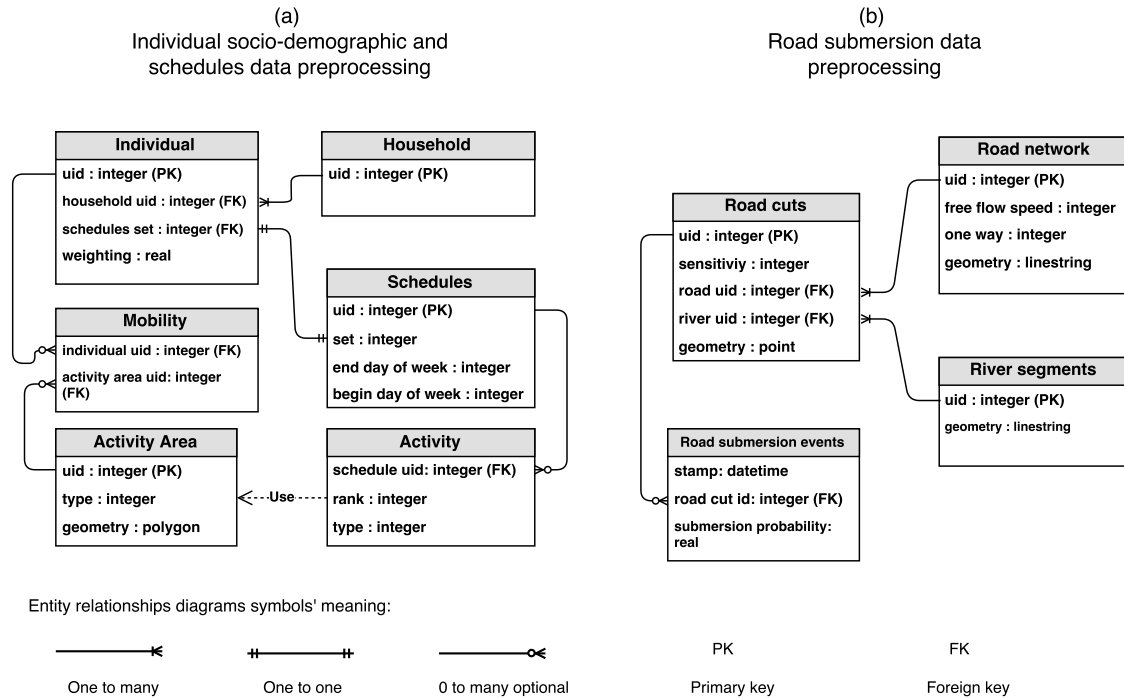


Figure III.4 Schéma de la base de données d'entrée.

(a) Chaque individu de la table "individual" est rattaché à un seul ménage dans la table "Household" et à un seul panel d'emplois du temps (défini par un jour de début et à un jour de fin) de la table "schedule". Et chaque panel d'emplois du temps est relié à un ensemble d'activités définies par leurs types et horaires dans la table "activity". Les individus sont aussi connectés à des zones d'activités dans la table "Mobility". Chaque zone d'activité est définie géographiquement dans la table "Activity area".

(b) Chaque point de coupure dans la table "Road cuts" est connecté avec un tronçon de route dans la table "Road network" et un tronçon hydrographique dans la table "River segments". Les points de coupure sont aussi liés à la table "Road submersion events" qui contient des enregistrements des niveaux de probabilités de submersion dans le temps.

3 Description des données utilisées

3.1 Données sociales

Comme indiqué dans la figure III.4, deux types de données sociales sont nécessaires : i) les caractéristiques socio-démographiques des individus qui sont fournies dans les données nationales de recensement ; ii) et la description de leur mobilité quotidienne (nombre et motifs de déplacement, temporalité des déplacements...) qui est disponible dans les données issues des enquêtes nationales de déplacement. On distingue deux formats principaux d'enquêtes nationales de déplacement : les Enquêtes Ménages et Déplacements (EMD) et les Enquêtes Nationales Transports et Déplacements (ENTD). Les EMD ne couvrent que les zones urbaines et les grandes agglomérations alors que les ENTD ont une couverture spatiale plus large et sont plus adaptées à notre problématique.

Table III.5 Liste des données sociales nécessaires pour MobRISK

Données	Utilisation	Sources
Données de recensement (Rp)	Description des caractéristiques socio-démographiques des individus et des ménages	INSEE
Données de mobilité (ENTD)	Description de la mobilité de la population	INSEE

3.1.1 Données de recensement (*Rp*, *MOBPRO*, *MOBSCO*)

Les données de recensement de la population sont fournies par l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Études Économiques). Elles contiennent des statistiques sur le nombre d'habitants et sur leurs caractéristiques : répartition par genre et âge, professions exercées, description des ménages et conditions du logement ainsi que des informations sur leurs mobilités professionnelles et scolaires.

Le recensement de la population est basé sur des enquêtes annuelles organisées par cycle de cinq ans. Les communes de moins de 1000 habitants effectuent une enquête de recensement portant sur toute la population tous les cinq ans, alors que les communes de 10 000 habitants ou plus organisent tous les ans une enquête par sondage auprès d'un échantillon d'adresses représentant 8 % de leur population. Les fichiers de résultats statistiques détaillés sont calculés et diffusés à partir de cinq enquêtes annuelles successives et correspondent à l'année centrale de la période de cinq ans. Les données utilisées dans *MobRISK* correspondent à l'année 2010 (correspondant aux enquêtes effectuées de 2008 à 2012). Les données sont disponibles gratuitement sur le site de l'INSEE. Seuls, les fichiers *INDCVI* (description des individus localisés au canton ou ville), *MOBSCO* (description des mobilités scolaires) et *MOBPRO* (description des mobilités professionnelles) sont utilisés dans MobRISK.

Variables sélectionnées

MobRISK utilise les mêmes noms de variable que ceux enregistrés dans les fichiers du recensement. Cependant, les modalités (niveaux) ont été modifiées afin de pouvoir les connecter avec les données issues des Enquêtes Nationales Transports et Déplacements (ENTD). La table III.6 liste les différentes variables utilisées, leur description ainsi que les modalités prises en compte. En plus des variables socio-démographiques, les fichiers *MOBPRO* et *MOBSCO* décrivent les communes de résidence et de travail des individus actifs ainsi que les communes de résidence et d'étude des étudiants et élèves.

Table III.6 Liste des variables de recensement sélectionnées avec leurs nouvelles modalités (a)

Variables	Modalités
IPONDI (Poids statistiques)	Variable numérique
SEXE	Homme Femme
AGED (âge)	< 18 ans [18, 28] ans [29, 45] ans [46, 60] ans > 60 ans
DIPL (Le diplôme le plus élevé)	Université 2ème et 3ème cycle Université 1er cycle Bac BEP Collège CEP Pas de diplôme
TACT (Situation professionnelle)	Actif Étudiant/ Élève Chômeur Retraité Homme/femme au foyer Autre situation
CS1 (Profession)	Agriculteurs exploitants Artisans, commerçants et chefs d'entreprise Cadres Techniciens et professions intermédiaires Employés administratifs Ouvriers Retraités Inactifs n'ayant jamais travaillé
NPERR (Nombre de personnes du ménage)	Une personne Deux personnes Plus que deux personnes
NENFR (Nombre d'enfants du ménage)	Pas d'enfants Un enfant Plus qu'un enfant
TYPMR (Composition du ménage)	Personne seule Famille mono-parentale Couple avec ou sans enfants Autres types de ménages
VOIT (Nombre de voitures du ménage)	Pas de voitures Une voiture Plus qu'une voiture
MTP (Mode de transport)	Piéton Deux roues Voiture Transport en commun Autre

Définitions

- *Poids statistique* : Selon l'INSEE, pondérer un indice ou une statistique consiste à donner aux valeurs qui les composent un poids différent, en fonction des divers critères qui rendent compte de l'importance relative de chacun des éléments. Dans les données de recensement, une variable de poids est attribuée à chaque individu. Ceci est dû au fait que les enquêtes sont basées sur un échantillonnage de la population. Le poids statistique (p) est calculé à partir de la méthode d'échantillonnage et permet de retrouver la totalité de la population en sommant tous les poids individuels. C'est pour cela qu'on parle généralement d'un *individu statistique* car chaque individu enregistré est représentatif d'un nombre p d'individus de mêmes caractéristiques socio-démographiques.

- *Ménage* : Selon l'INSEE, un ménage correspond à l'ensemble des occupants d'un même logement sans que ces personnes aient nécessairement des liens de parenté. Un ménage peut aussi être composé par une seule personne.

3.1.2 Données de déplacement (*ENTD*)

Les données de déplacements utilisées dans *MobRISK* proviennent des Enquêtes Nationales Transports et Déplacements (*ENTD*). Ces enquêtes sont conduites par le ministère chargé du transport et l'INSEE tous les 10 ans. Elles permettent d'étudier les comportements de mobilité des ménages résidents en France et leurs déplacements selon les motifs, durées et modes de transport. La description du mode de collecte des données est disponible dans l'annexe B.

Les données collectées contiennent une description des caractéristiques socio-démographiques des individus et leurs ménages (profession, âge, genre, nombre de personnes...) ainsi que la description de la mobilité appelée "locale" d'un individu tiré au sort du ménage enquêté (appelé "*Individu Kish*"). Cette mobilité locale recense les différents déplacements effectués, dans un rayon de 80 km autour du lieu de domicile, lors d'un jour de semaine et un jour de weekend pendant la semaine qui précède le jour de l'enquête. Ces informations permettent de définir le nombre de déplacements effectués ainsi que le motif de chaque déplacement et les horaires de départ et d'arrivée aux lieux d'activité. Dix catégories de motifs de déplacement sont proposées :

- **Domicile** : Aller au domicile ou à une résidence occasionnelle.
- **Travail** : Aller au lieu de travail habituel.
- **Étude** : Aller au lieu de scolarité (école, lycée, université).
- **Achat** : Se rendre dans un commerce de proximité, supérette, boutique ou un centre commercial.
- **Soins** : Soins médicaux ou personnels (médecin, coiffeur...).
- **Démarches** : Démarches administratives ou recherche d'information.
- **Visites** : Rendre visite à des parents ou amis.
- **Accompagnement** : Accompagner ou aller chercher quelqu'un à la gare, ou station de métro ou de bus.
- **Loisirs** : Aller dans un centre de loisirs, manger ou boire à l'extérieur du domicile, se rendre à un lieu de promenade, faire du sport...
- **Vacances** : Se rendre dans un lieu de vacances ou une résidence secondaire.

Échantillonnage :

L'échantillon national de l'*ENTD* est composé de 17 500 logements ce qui donne un taux de sondage de 0.056% représentatif à l'échelle nationale en se basant sur les données de recensement de 1999. En plus de l'échantillon national, cinq régions ont conduit des extensions régionales du sondage dans le but d'avoir des résultats représentatifs à l'échelle

de leurs territoires : Bretagne, Ile-de-France, Midi-Pyrénées, Languedoc-Roussillon et Pays de la Loire. Ainsi, 10 308 logements ont été ajoutés à l'échantillon national, la région du Languedoc-Roussillon qui nous concerne, est représentée par 1 240 individus.

Structure des données :

La base de donnée globale des ENTD est constituée de 19 fichiers décrits dans la table III.7. Les fichiers "Q-TCM-MÉNAGE" et "Q-TCM-INDIVIDU" sont utilisés afin de retrouver les caractéristiques socio-démographiques des individus et la composition de leurs ménages et le fichier "K-DEPLOC" est utilisé pour décrire les déplacements quotidiens.

Table III.7 Organisation de la base de données ENTD 2007-2008

Catégories	Fichiers	Description
Tronc commun TCM	Q-TCM-MENAGE	Description socio-démographique des ménages
	Q-TCM-INDIVIDU	Description socio-démographique des individus
Première visite	Q-MENAGE	logement et stationnement, parc de véhicules à disposition
	Q-INDIVIDU	Trajets domicile-travail, motilité et accidents
	Q-IND-LIEU-TEG	Mobilité contrainte, trajets vers lieux de travail et étude
	QR-VOITVUL	Description rapide des voitures
	QF-VOITVUL	Description détaillée d'un ou deux véhicules échantillonnés
	QR-VTTEQUAD	Description rapide des voiturettes, quads...
	QF-VTTEQUAD	Description détaillée de tous les véhicules
	QR-2RMOT	Description rapides des deux roues à moteurs
	QF-2RMOT	Description détaillée des deux roues à moteurs
	QR-VELO	Description rapides des vélos d'adulte
QF-VELO	Description détaillée d'un vélo échantillonné	
Deuxième visite	K-MOBILITE	Données synoptiques sur la mobilité du "kish" pendant la semaine qui précède la deuxième visite
	K-DEPLOC	Table des déplacements locaux pendant un jour de semaine et un jour de weekend
	K-VOYAGE	Table des voyages effectués lors des 4 semaines précédant la visite
Carnet véhicule	K-VOY-DEPDET	Table des déplacements de plus de 100 km
	C-INFO-CARNET	Informations du remplissage du carnet
	C-DEP-CARNET	Table des déplacements des carnets

Définitions

- *Déplacement* : Selon les ENTD, est considéré comme déplacement tout mouvement d'un individu d'un lieu de départ vers un lieu d'arrivée afin de satisfaire un seul motif. Un changement de motif engendre ainsi un nouveau déplacement. Chaque déplacement peut combiner différents moyens de transport.
- *Mobilité locale* : La mobilité locale réfère aux déplacements vers des lieux d'activité situés dans un rayon de 80 km autour du domicile. Les déplacements doivent être effectués durant les 24 heures du jour enquêté (de 4h du matin du jour observé à 4h du matin le jour suivant).

3.2 Données spatiales

Les données spatiales nécessaires pour *MobRISK* ont pour objectifs de fournir les informations suivantes :

- Localisation des lieux d'activité des individus (domicile, travail, étude, achat...) afin de pouvoir simuler les déplacements associés.
- Description du réseau routier de la zone d'étude.

- Caractérisation de la vulnérabilité du réseau routier aux inondations en se basant sur les points de coupure situés aux intersections routes/rivières.
- Enregistrement des niveaux de probabilité de submersion aux points de coupure pour des événements de crue rapide passés afin de mesurer le niveau d'exposition des automobilistes.
- Enregistrement des niveaux de précipitation mesurés lors des événements de crue rapide étudiés qui seront utilisés pour construire des scénarios de comportements d'adaptation.

Table III.8 Liste des données géographiques d'entrée nécessaires pour MobRISK

Données	Utilisation	Sources
Les unités administratives	Définition des limites administratives	IGN
Les zones d'activités (MOBPRO, MOBSCO, RFL)	Localisation des différentes zones d'activités	INSEE
Réseau hydrographique	Description du réseau hydrographique	IGN
Réseau routier	Description du réseau routier	IGN
Les points de coupure	Identification des différents points sensibles aux submersions ainsi que leurs niveaux de sensibilité	IFSTTAR
Données de précipitation	Description des niveaux de précipitations enregistrées lors des événements passés	OHMCV
Données de submersion de route	Simulation des probabilités de submersions aux points de coupure pour des événements passés	LTHE

3.2.1 Les unités administratives

La description des unités administratives du territoire provient de la BD GEOFLA générée chaque année à partir de la BD CARTO fournie par l'IGN (Institut National de l'Information Géographique et forestière). Elle contient une description de l'ensemble des unités administratives nationales (France métropolitaine et DOM) : communes, cantons, arrondissements, départements et régions. Le département du Gard appartient à la région Languedoc Roussillon et contient 353 communes, dont 267 communes à dominantes rurales (Figure. III.5)². La superficie du département est de 5 852 km^2 . Le nombre d'habitants était de 726 783 au recensement de 2010. Les quatre plus grandes communes du département en terme de nombre d'habitants sont : Nîmes (145 501 habitants), Alès (41 118 habitants), Bagnols-sur-Cèze (18 705 habitants) et Beaucaire (16 183 habitants)(Figure. III.6).

2. Selon la définition de l'INSEE, les communes rurales sont *les communes qui ne rentrent pas dans la constitution d'une unité urbaine : les communes dans une zone de bâti continu de 2000 habitants, et celles dont moins de la moitié de la population municipale est dans une zone de bâti continu.*

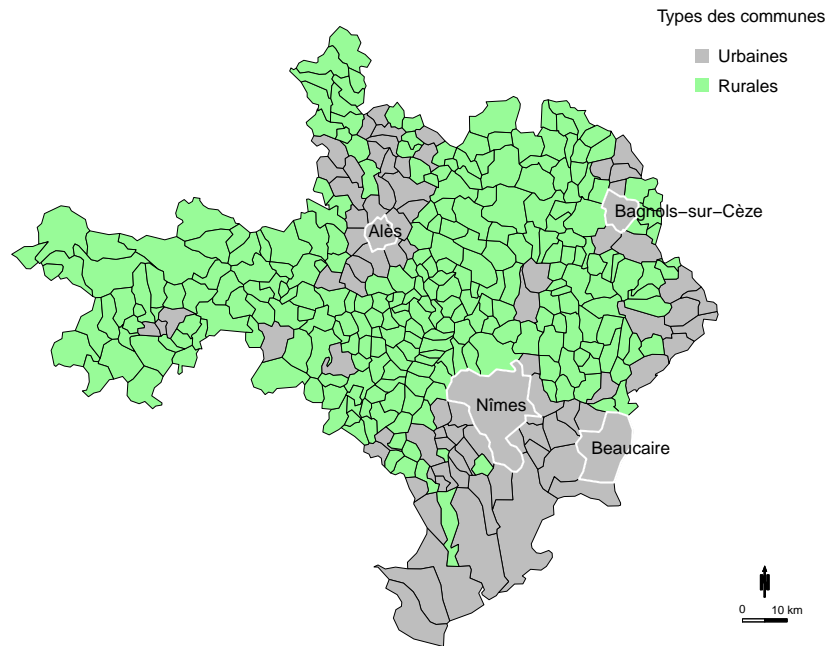


Figure III.5 Distribution spatiale des communes à dominantes rurales et urbaines dans le département du Gard à partir des données de l'INSEE. Les quatre communes principales sont délimitées en blanc.

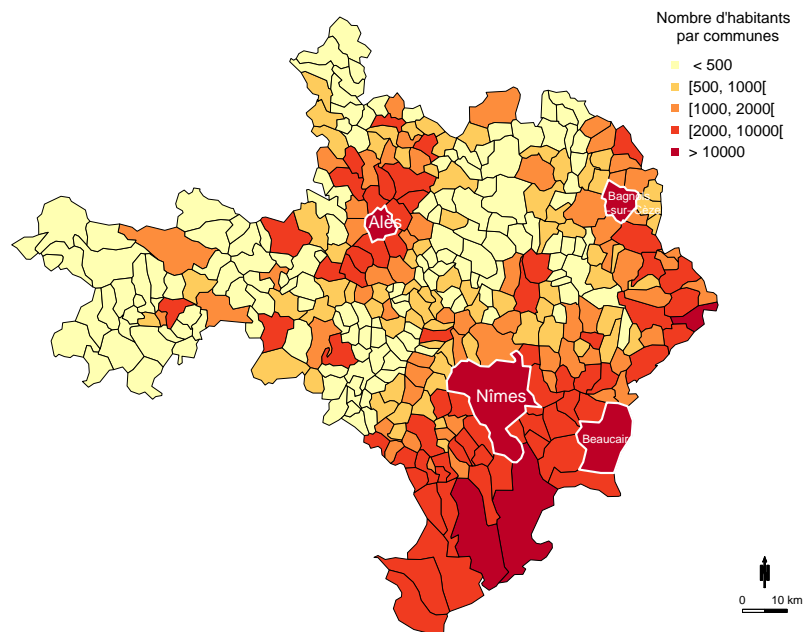


Figure III.6 Distribution spatiale du nombre d'habitants par commune dans le département du Gard à partir des données de l'INSEE. Les quatre communes principales sont délimitées en blanc.

3.2.2 Localisation des activités

Les approches utilisées dans la localisation des zones d'activités dans les modèles de mobilité *activity-based* diffèrent selon les disponibilités et la qualité des données décrivant la distribution spatiale des activités économiques. Concernant l'activité "Domicile", les données du recensement fournissent les communes de résidence des différents ménages. Afin de mieux localiser les lieux de résidence des ménages, nous avons exploité les données des Revenus Fiscaux Localisés (RFL). Elles sont distribuées par l'INSEE et fournissent une estimation du nombre de ménages par carreaux de 200m de côté. Ces données sont établies à partir des fichiers de déclaration de revenus et de la taxe d'habitation des personnes physiques qui sont fournis par la Direction Générale des Impôts. Ainsi, nous avons distribué les ménages de chaque commune dans les différents carreaux de 200m de côté en respectant le nombre de ménage par carreau. Ensuite, dans chaque carreau, les ménages sont rattachés aléatoirement à un nœud routier qui correspondra au point de départ et d'arrivée de tous déplacements dont le motif est "Domicile". Ceci permet d'avoir une distribution spatiale des ménages à une échelle fine (Figure. III.7).

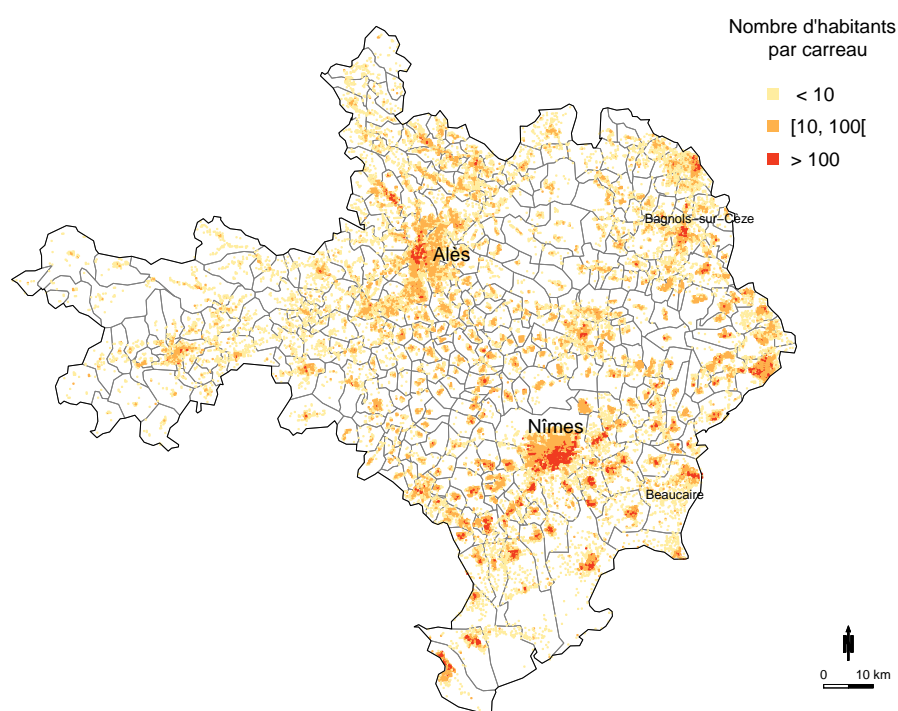


Figure III.7 Distribution spatiale du nombre d'habitants par carreau dans le département du Gard à partir des données carroyées à 200 m de l'INSEE

Concernant les activités "Travail" et "Étude", les fichiers "MOBPRO" et "MOBSCO" contiennent les communes de travail et d'étude des professionnels et des scolaires. Afin de

mieux localiser les lieux de travail et d'étude, nous supposons que la majorité de ceux-ci sont situés autour du centre administratif des communes (chefs lieux). Ainsi, les professionnels et les scolaires sont rattachés à un buffer de 200m autour du chef lieu de leurs communes de travail et d'étude. Nous leur avons ensuite attribué aléatoirement un nœud routier situé dans ce buffer et qui correspond au point de départ et d'arrivée des activités "travail" et "étude" (Figure. III.8). Concernant les autres activités définies dans l'ENTD (loisirs, achats, démarches administratives...), nous ne disposons pas de données permettant de les localiser. Nous supposons alors que les individus effectuent globalement ces activités dans un buffer de 500m autour de leur lieu de résidence (Figure. III.8).

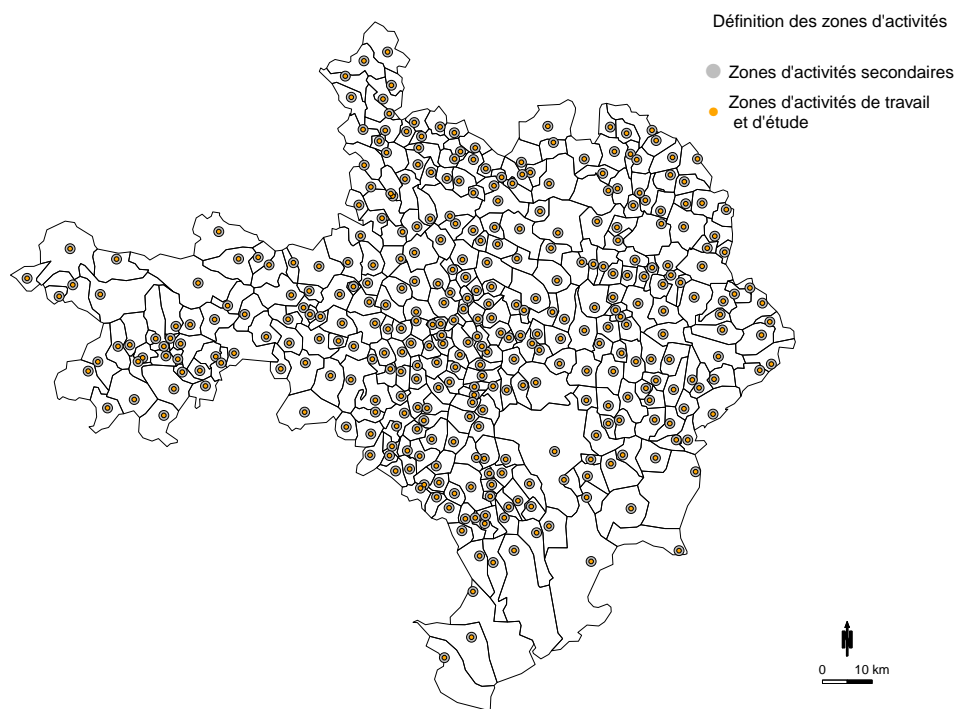


Figure III.8 Définition des zones d'activités en fonction des buffers autour des chefs lieux des communes

3.2.3 Les données hydro-météorologiques

Les données hydro-météorologiques utilisées dans *MobRISK* comportent la description du réseau hydrographique et les données de précipitation concernant les différents événements de crues rapides.

Les données qui décrivent le réseau hydrographique proviennent de la BD CarTHAGe 2010 (Base de Données sur la Cartographie THématique des AGences de l'eau et du ministère chargé de l'environnement). Cette base est produite par les Agences de l'eau à partir de la base

de données cartographiques BD CARTO de l'IGN qui décrit sous forme numérique l'ensemble des informations géographiques présentes sur le territoire national. La BD CarTHAgE est mise à jour tous les ans. Elle est disponible gratuitement sur le site de l'IGN dans le cadre d'une utilisation non commerciale. Elle regroupe les entités ayant trait à l'hydrographie : réseau hydrographique et équipements hydrographiques.

Le Gard est composé de six grands bassins versants : le Gardon (2 200 km²), la Cèze (1 359 km²), le Vidourle (1 335 km²), la Dourbie (548 km²), l'Hérault (2 500 km²) et le Vistre (220 km²)(Figure. III.9).

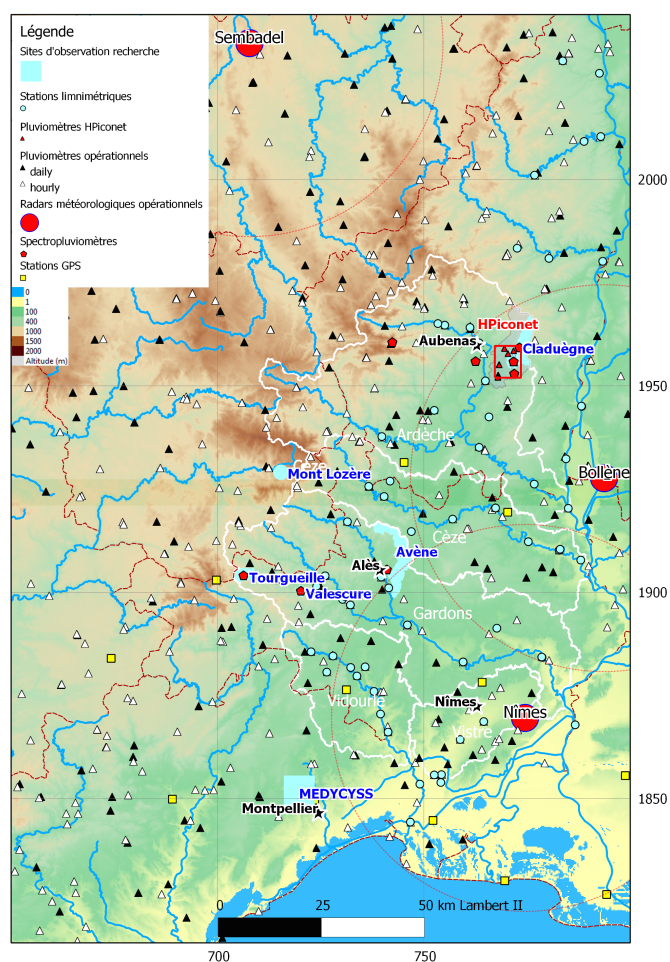


Figure III.9 Fenêtre d'observation de l'OHMCV comprenant les principaux bassins versants du Gard (le Gardon, le Vidourle, la Cèze) qui sont délimités en blanc et la localisation des sites et stations de mesure hydro-météorologique. Source : OHMCV à partir des données de l'IGN

Les données de précipitation utilisées proviennent de l'OHMCV (Observatoire Hydro-Météorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais) qui est un observatoire consacré à l'étude des pluies intenses et des crues rapides en région méditerranéenne. Les moyens d'observation

opérationnels exploités par l'OHMCV et disponibles dans la région Cévennes-Vivarais sont constitués de :

- Un réseau d'environ 300 pluviomètres comprenant ceux de Météo-France, du service de prévision des crues (SPC) et d'EDF.
- Trois radars météorologiques de Météo-France (Nîmes, Bollène et Sembadel) qui couvrent les grands bassins versants de la région.
- Un réseau de 45 stations limnimétriques permettant la mesure des hauteurs d'eau et des débits dans les rivières mis en place par le service de prévision des crues (SPC).

Ces différents points d'observation sont localisés dans la figure III.9.

Outre les efforts d'observation, l'OHMCV participe à la distribution des différentes données collectées sur la région Cévennes-Vivarais à travers un système d'extraction et de visualisation en ligne (SEVENOL)³. Nous utilisons dans *MobRISK* les données de ré-analyses pluviométriques qui consistent à combiner les observations issues des radars météorologiques avec les mesures au sol par pluviomètres. Ces données de ré-analyses permettent de reconstituer des événements précipitants passés à une échelle spatio-temporelle fine (1 km², pas de temps journaliers, horaires et de 15 mn). La fenêtre spatiale couverte par les observations s'étend sur 160*210 km de la région Cévennes-Vivarais et les événements pluvieux étudiés remontent au début des années 2000.

3.2.4 Le réseau routier

Les données qui décrivent le réseau routier proviennent de la BD CARTO produite par l'IGN et qui contient une représentation vectorielle bidimensionnelle du territoire et de ses infrastructures. Le réseau routier est composé d'un ensemble de tronçons de routes qui sont caractérisés par différents attributs : la vocation (renseigne l'importance du tronçon pour le trafic routier), le nombre de voies, la classe administrative (autoroute, route nationale ou route départementale)... La variable "vocation" a été utilisée dans *MobRISK* afin d'attribuer une vitesse moyenne à chaque tronçon de route. Nous distinguons 5 classes de vocation : liaisons locales non revêtues, liaisons locales revêtues, liaisons régionales, liaisons principales et les types autoroutiers. Les vitesses suivantes ont été attribuées respectivement à chaque classe de vocation : 20 km/h, 40 km/h, 80 km/h, 90 km/h et 120 km/h. La figure III.10 représente la distribution spatiale des tronçons de routes en fonction des classes de vocation ainsi que les routes principales qui relient la commune d'Alès avec les principales communes du Gard (Nîmes, Uzès et Bagnols-sur-Cèze). Le nombre total de tronçons de routes dans le Gard est de 20 931 représentant 12 321 km. La table III.9 détaille le nombre et la longueur des tronçons par classe de vocation.

3. <http://sevnol.ohmcv.fr/Sevnol2/>

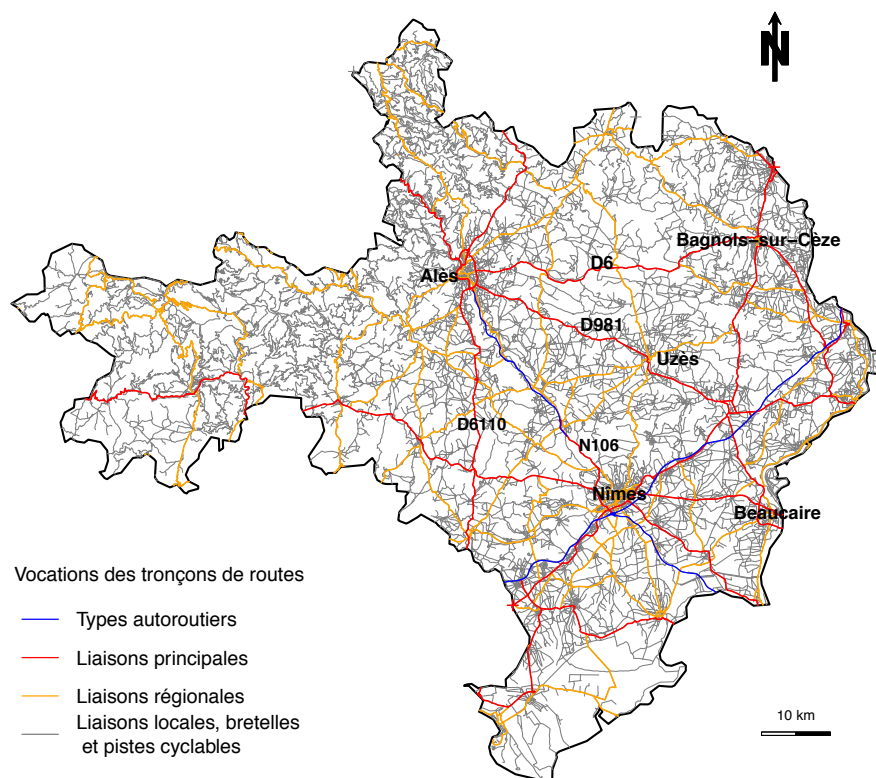


Figure III.10 Carte du réseau routier du département du Gard en fonction des vocations des routes

Table III.9 Nombre et longueur des tronçons de routes par classe de vocation

Vocation des routes	Nombre de tronçons	longueurs (m)
Liaisons locales	17 094	10 323 703
Liaisons principales	1 284	587 817
Liaisons régionales	2 277	1 272 542
Autoroutes	312	137 602
Total	20 931	12 321 664

3.2.5 Les points de coupure

Comme indiqué dans la section 3.1.2 du chapitre II, les travaux de Versini (2007) et Naulin (2012) ont permis d'identifier les intersections entre les réseaux hydrographique et routier qui sont sensibles à la submersion. Ces intersections ont été appelées "points de coupure". Le réseau routier du département du Gard contient 1 970 points de coupure classifiés en quatre niveaux de sensibilité : sensibilité très faible S_0 (1 093 points), sensibilité faible S_1 (359), sensibilité moyenne S_2 (297 points) et sensibilité élevée S_3 (221 points). Les points de coupure à sensibilité "très faible" S_0 correspondent aux intersections routes/rivières caractérisées par une période de retour de submersion observée de plus que 40 ans. Les niveaux de sensibilité "faible" S_1 , "moyenne" S_2 et "élevée" S_3 ont des périodes de retour de submersion observée

de moins d'un an pour respectivement 20%, 35% et 65% des points (Debionne et al., 2016; Naulin, 2012; Versini, 2007). La carte III.11 représente la distribution spatiale des 1 970 points de coupure selon les différents niveaux de sensibilité.

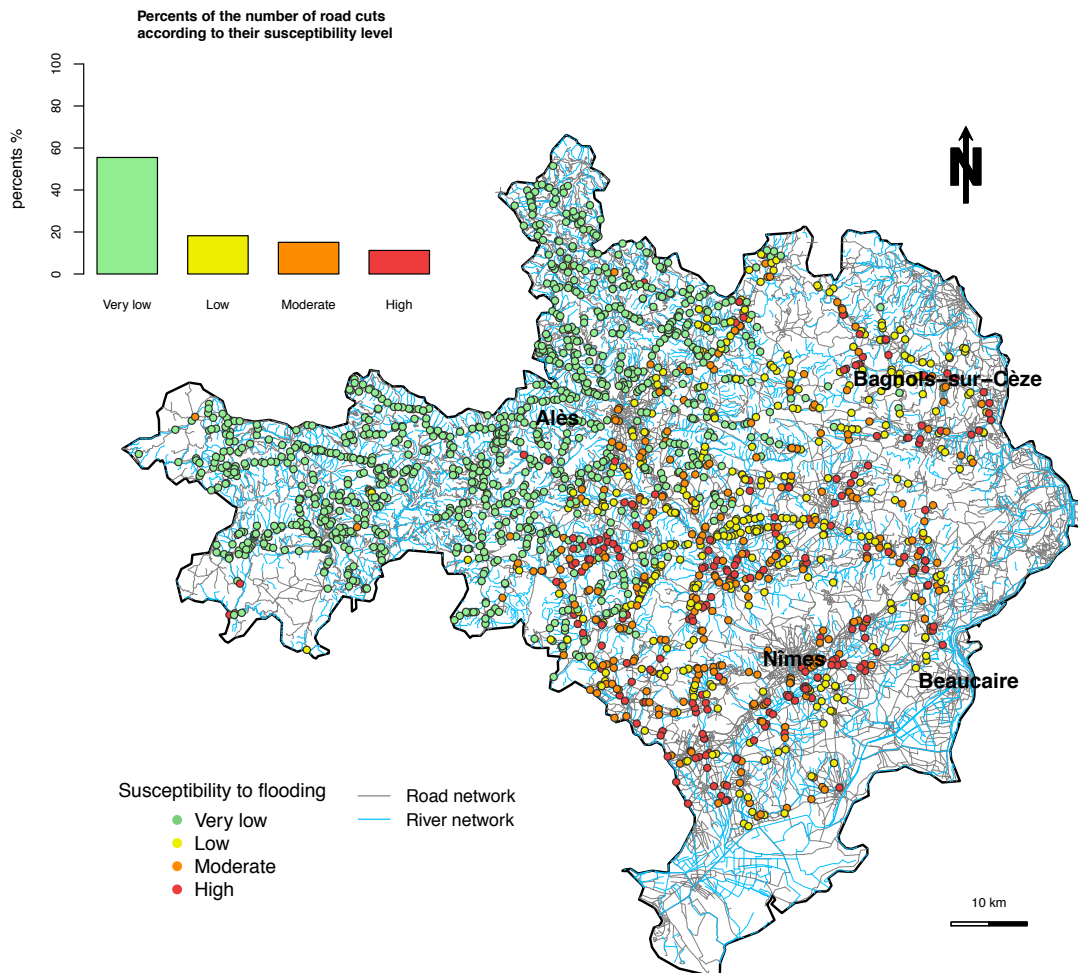


Figure III.11 Carte des points de coupure du Gard et leurs niveaux de sensibilité

Distribution des points de coupure par type de route

En regardant la distribution des points de coupure en fonction des types de route (locales, régionales, principales et autoroutes), on remarque que la majorité des points de coupure se retrouvent sur des liaisons locales (60%) et régionales (26%). On remarque aussi une distribution similaire des classes de sensibilité des points de coupure au niveau de ces deux types de routes (plus que la moitié des points de coupure sur ces routes sont de sensibilité très faible). Alors que les liaisons principales montrent une équi-répartition des classes de sensibilité (Figure. III.12).

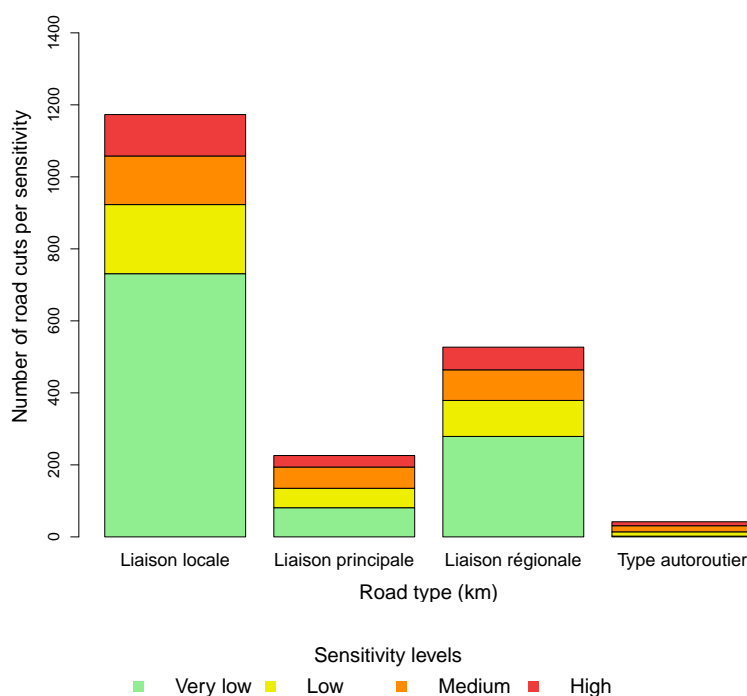


Figure III.12 Distribution des points de coupure selon les types de route

Distribution des points de coupure par surface des bassins versants

Concernant la distribution des points de coupure par aires drainées, nous observons que la majorité des points de coupure sont situés au niveau des petits bassins versants : 50% des points appartiennent à des bassins de moins de 1 km^2 et 32% à des bassins versants entre 1 et 10 km^2 . Cependant, alors que ces points de coupure sont majoritairement de faibles et très faibles sensibilités, les 328 points situés dans des grands bassins versants sont à 60% de sensibilités moyennes et élevées (Figure. III.13).

3.2.6 La submersion des routes

Comme indiqué dans la section 3.1.2 du chapitre II, Naulin (2012) a développé une méthode qui permet d'estimer les probabilités de submersion aux points de coupure en croisant les niveaux de sensibilité des points de coupure avec les débits simulés sur les tronçons hydrographiques (Table. III.10)⁴.

4. Nous avons choisi dans cette table de conserver les codes couleurs correspondants aux probabilités de submersion, présents dans la thèse de Naulin (2012), afin de faciliter l'interprétation de l'hydrogramme qui suit dans la figure III.14. Il ne faut pas les confondre avec les codes couleurs qui correspondent aux classes de vulnérabilité

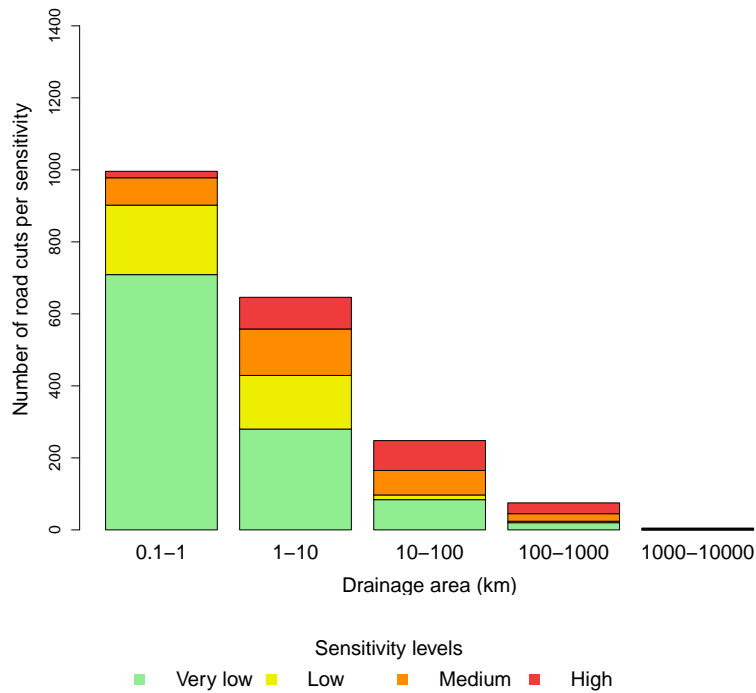


Figure III.13 Distribution des points de coupure selon l'aire drainée

Les sorties de simulation des débits issues du modèle hydrologique CVN ont été utilisées dans cette thèse. Le modèle CVN est développé dans la plate-forme de modélisation *LIQUID* dans le but d'étudier les crues rapides dans la région méditerranéenne (Anquetin et al., 2010; Branger et al., 2010; Braud et al., 2010; Vannier, 2013). Les simulations des débits aux points de coupure ont été effectuées pour trois événements passés sélectionnés dans le cadre du projet *MobiCLIMEX* : 8-9 Septembre 2002, 6-9 Septembre 2005 et 21-22-23 Octobre 2008. Les débits simulés aux niveaux des points de coupure croisés avec les classes de vulnérabilité ont permis alors de fournir les évolutions temporelles des probabilités de submersion au niveau des points de coupure pour les trois événements choisis (Figure.III.14). Ces probabilités de submersion sont utilisées comme des données d'entrée de *MobRISK* pour caractériser le risque de submersion des routes.

Table III.10 Probabilités de submersion associées aux différentes classes de vulnérabilité selon les classes de débit. Source : Naulin (2012)

Vulnérabilité	Débit de pointe simulé				
	$Q < Q_2/2$	$Q_2/2 < Q < Q_2$	$Q_2 < Q < Q_{10}$	$Q_{10} < Q < Q_{50}$	$Q > Q_{50}$
Forte	0%	0 à 67%	67 à 100%	100%	100%
Moyenne	0%	0 à 33%	33 à 57%	57 à 61%	61 à 100%
Faible	0%	0 à 20%	20 à 34%	34 à 35%	35 à 100%
Très faible	0%	0%	0%	0%	0 à 100%

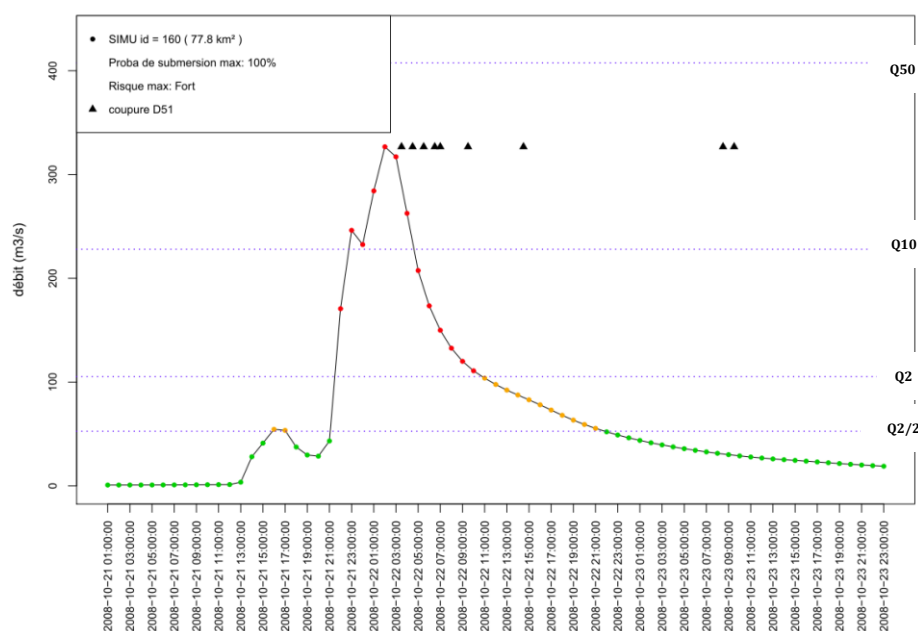


Figure III.14 Exemple d'hydrogramme de débit simulé au niveau d'un point de coupure de vulnérabilité élevée (ID = 160) lors de l'évènement de crue rapide des 21, 22 et 23 Octobre 2010 dans le Gard. Chaque débit horaire est coloré en fonction du risque de submersion calculé en respectant les codes couleurs de la table III.10. Les lignes horizontales en pointillées représentent les quantiles de débit de crues. Les triangles noirs représentent les coupures observées par les agents du service de gestion des routes.

4 Description du cas d'étude

L'objectif principal de cette première application du modèle *MobRISK* consiste à évaluer l'exposition des automobilistes aux submersions des routes qui sont dues à l'événement majeur de crue rapide des 8-9 Septembre 2002 dans un secteur d'étude du département du Gard. Cette section est organisée en deux parties. La première partie présente la zone d'étude sélectionnée pour cette première application ainsi que la population étudiée. La deuxième partie est consacrée à la description de l'événement hydro-météorologique et de ses impacts physiques et humains.

4.1 La zone d'étude

La zone d'étude sélectionnée au sein du Gard présente des caractéristiques similaires au reste du département en termes de vulnérabilité du réseau routier, de répartition entre communes urbaines et rurales et d'importance des submersions routières lors de l'événement des 8-9 Septembre 2002. Cette zone regroupe 61 communes situées autour de la sous-préfecture d'Alès, commune la plus peuplée du Gard après Nîmes (Figure III.15). La zone d'étude comprend 111 511 résidents. La description des caractéristiques socio-démographiques de la population étudiée est présentée dans la table III.11.

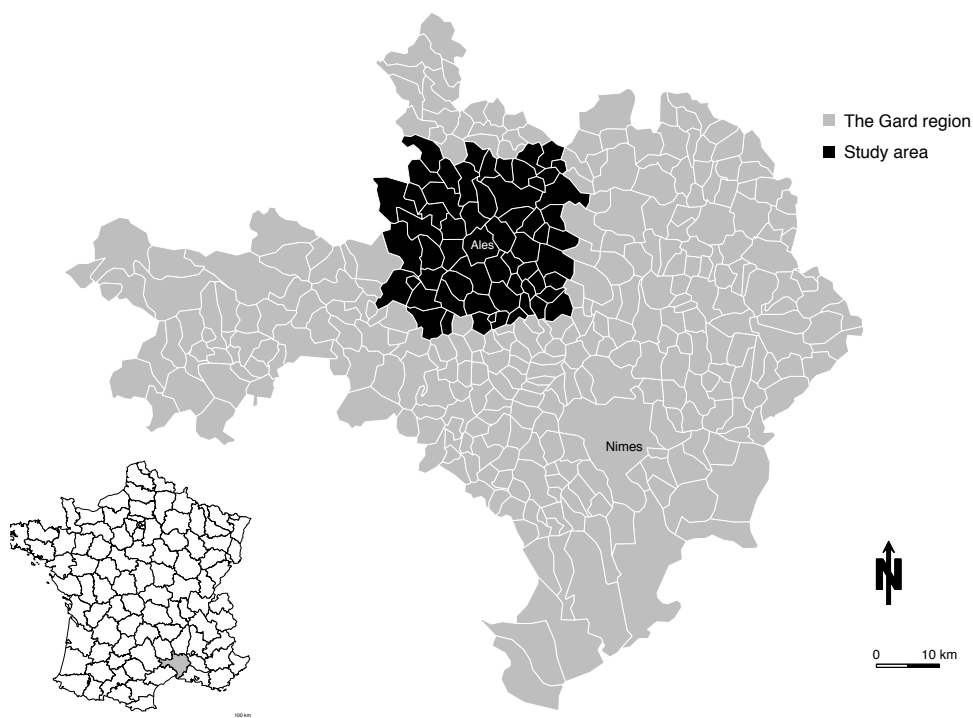


Figure III.15 Carte de la zone d'étude sélectionnée

Le modèle *MobRISK*

Table III.11 Description des caractéristiques socio-démographiques de la population de la zone d'étude

Variables	Modalités	%
Genre	Homme	47.76
	Femme	52.24
Age	< 18 ans	19.84
	[18, 28] ans	10.62
	[29, 45] ans	20.24
	[46, 60] ans	21.78
	> 60 ans	27.52
Le diplôme le plus élevé	Université	14
	Bac, BEP	33.24
	CEP, Collège	18.96
	Pas de diplôme	33.80
Situation professionnelle	Actif	31.53
	Étudiant/ Élève	5.48
	Chômeur	8.08
	Retraité	26.94
	Homme/femme au foyer	5.67
	Autre situation	22.30
Profession	Agriculteurs exploitants	0.44
	Artisans, commerçants et chefs d'entreprise	3.94
	Cadres et fonctions intellectuelles supérieures	3.25
	Techniciens et professions intermédiaires	8.61
	Employés administratifs	12.85
	Ouvriers	9.69
	Retraités	26.94
	Inactifs n'ayant jamais travaillé	34.28
Nombre de personnes du ménage	Une personne	16.23
	Deux personnes	33.47
	Plus que deux personnes	50.30

La zone d'étude est composée de 39 communes rurales et 22 communes urbaines qui sont situées principalement autour de la commune d'Alès (Figure III.16). Le nombre moyen d'habitants par commune est de 1 900 personnes. La commune d'Alès contient à elle seule 40 110 habitants. La figure III.17 montre une concentration de la population dans un premier cercle de communes autour d'Alès.

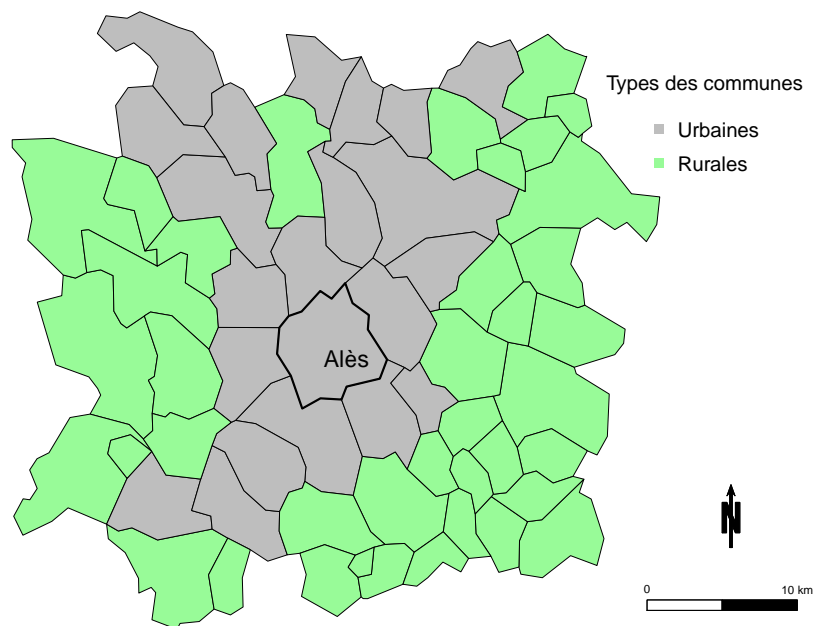


Figure III.16 Répartition spatiale des communes rurales et urbaines dans la zone d'étude

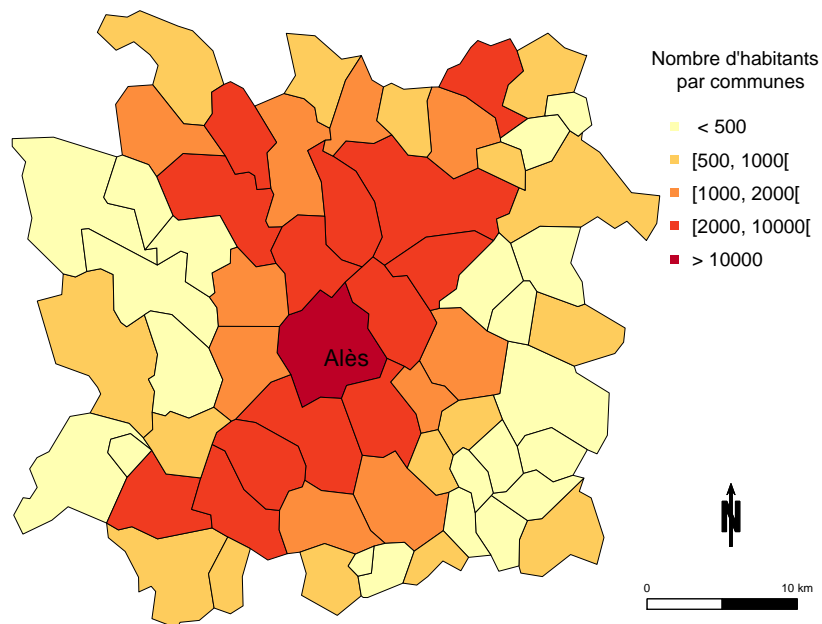


Figure III.17 Répartition spatiale des communes de la zone d'étude par nombre d'habitants

Vulnérabilité du réseau routier :

Le réseau routier de la zone d'étude est constitué de 6 160 sections de routes qui contiennent 738 points de coupure : 523 points de coupure de sensibilité très faible (S_0), 103 points de sensibilité faible (S_1), 75 points de sensibilité moyenne (S_2) et 37 points de coupure de sensibilité élevée (S_3). Le choix de la zone d'étude est fait de manière à retrouver une distribution des niveaux de sensibilité des points de coupure similaire à celle du Gard (71% S_0 , 14% S_1 , 10% S_2 et 5% S_3). La figure III.18 présente la répartition spatiale des classes de sensibilité des points de coupure dans la zone d'étude. On observe que la majorité de ceux situés au nord-ouest de la zone d'étude sont de sensibilité très faible. Cette partie du Gard correspond à une zone de relief en bordure des Cévennes située au niveau du grand bassin versant du Gardon.

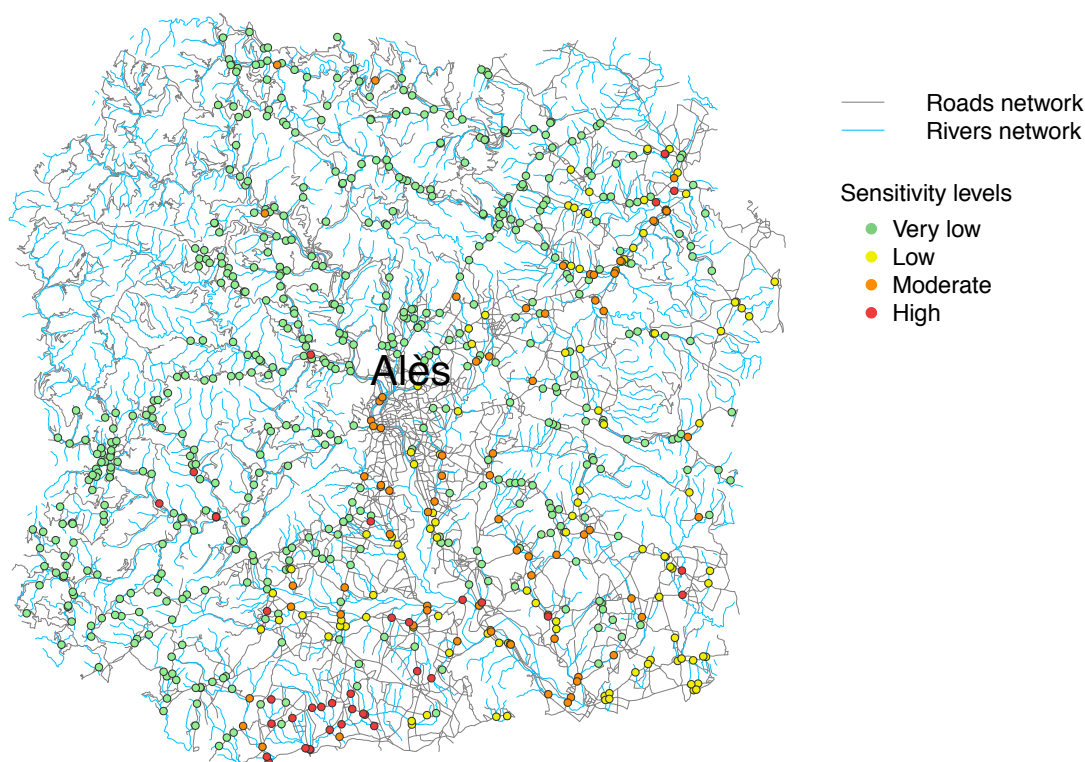


Figure III.18 Localisation des points de coupure de la zone d'étude selon leurs niveaux de sensibilité

4.2 L'événement de crue rapide des 8-9 Septembre 2002

L'épisode pluvieux qui a touché le Gard les 8 et 9 Septembre 2002 est considéré comme l'un des événements hydro-météorologiques les plus importants dans la région depuis la crue de 1958. Il a causé 23 victimes et a engendré des dégâts économiques estimés à 1,2

milliard d'euros. En raison de son intensité, l'événement de 2002 a fait l'objet de plusieurs études qui ont permis de bien caractériser les dynamiques hydro-météorologiques ainsi que les impacts physiques et humains (Delrieu et al., 2005; Gaume et al., 2003; Ruin et al., 2008). Cet événement a été considéré exceptionnel en terme d'étendue spatiale de la zone impactée. Il a engendré des réponses lentes des cours d'eau majeurs qui ont conduit à des ruptures de digues ainsi que des réponses très rapides des petits bassins versants. Il est considéré par les services de prévision des crues comme un événement historique de référence. Outre ses caractéristiques hydro-météorologiques, cet événement présente un intérêt particulier par rapport à notre étude puisque les 8 et 9 Septembre correspondaient à un Dimanche et un Lundi, deux jours caractérisés par des comportements de mobilité différents.

4.2.1 L'événement météorologique

La figure III.19 représente le cumul de pluie durant l'événement de 2002 sur la région Cévennes-Vivarais. On observe que des cumuls de plus de 400mm ont touché une zone très étendue qui va du nord du bassin du Vidourle jusqu'au bassin de la Cèze.

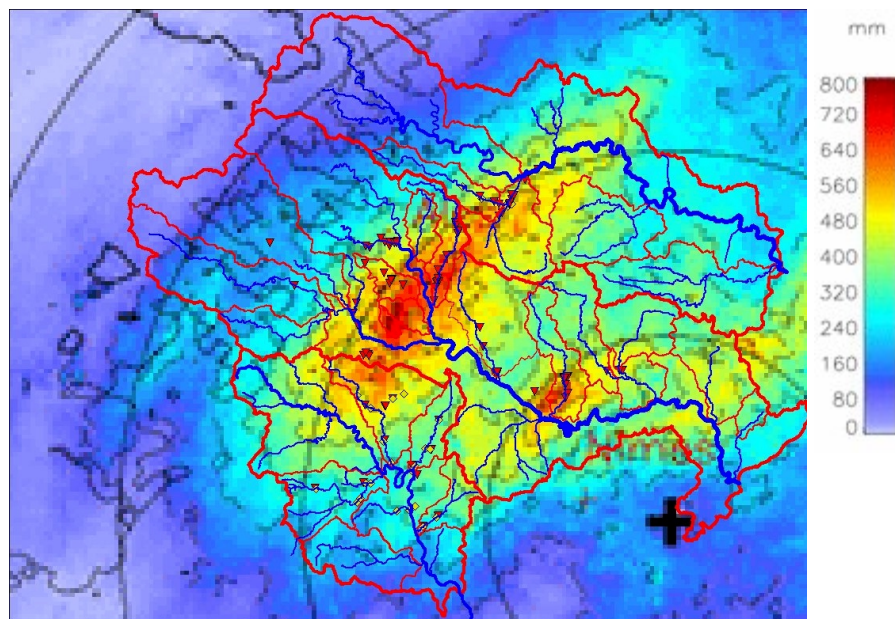


Figure III.19 Cumuls de pluie estimés à partir des mesures calibrées du radar de Nîmes, journées de 8 et 9 Septembre 2002. Source : Gaume et al. (2003)

Selon Delrieu et al. (2005), l'évènement météorologique s'est déroulé en trois phases principales. La première phase a eu lieu le 8 Septembre de 8h à 22h, succédée par une deuxième phase du 8 Septembre 22h au 9 septembre à 4h, et la troisième phase a eu lieu le 9 Septembre de 4h à 12h. La zone d'étude d'Alès a été particulièrement touchée du

8 Septembre à 22h jusqu'au 9 Septembre à 5h où elle a enregistré un épisode pluvieux particulièrement intense. Un cumul de pluie de plus de 700mm a été enregistré sur la zone d'Alès pour la période de l'évènement. Les pluies horaires ont atteint environ 100mm/h à la station pluviométrique d'Alès (Figure III.20). La figure III.21 représente les cartes de précipitation au niveau de huit créneaux horaires du 8 au 9 Septembre. Elle montrent deux pics de pluie dans la zone d'étude d'Alès : le 8 Septembre de 22h à 23h et le 9 Septembre de 5h à 6h.

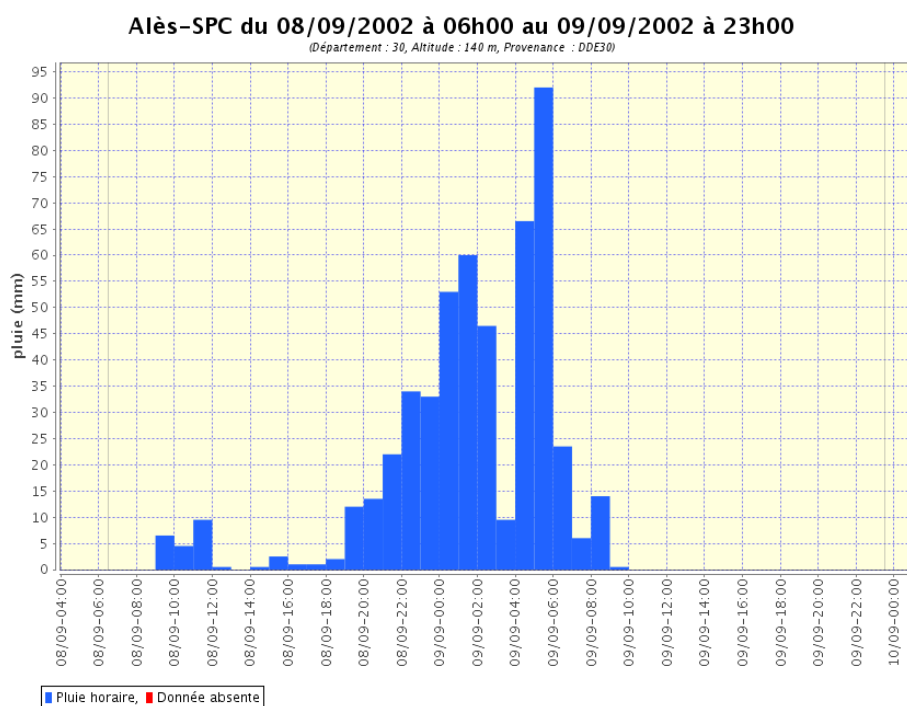
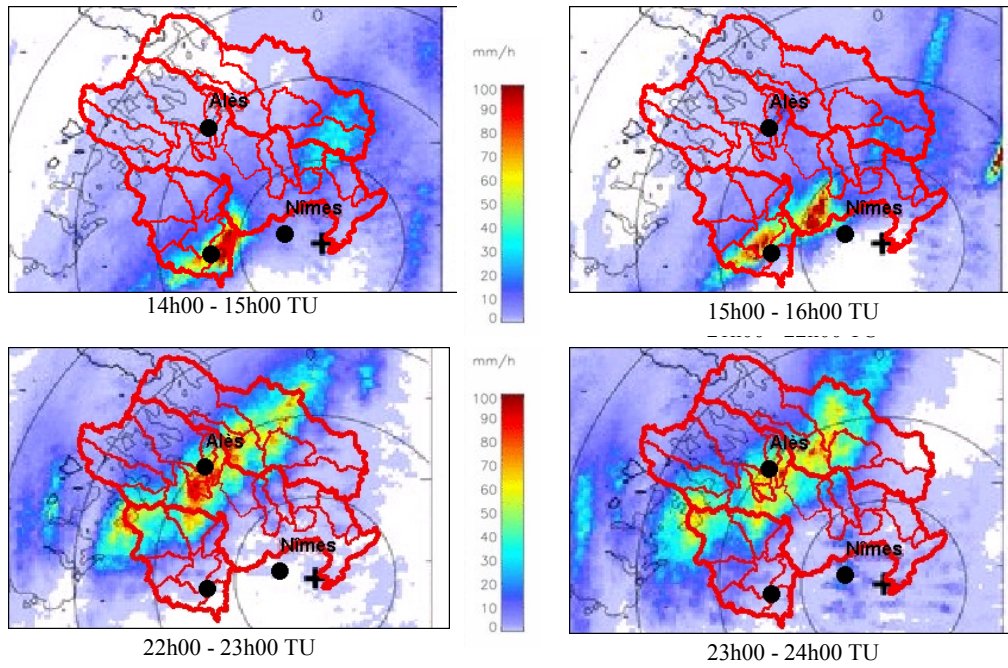


Figure III.20 Série temporelle de pluie horaire enregistrée au niveau de la station pluviométrique d'Alès lors de l'évènement des 8-9 Septembre 2002 (hyétoGRAMME). Source : OHMCV

8/9/2002



9/9/2002

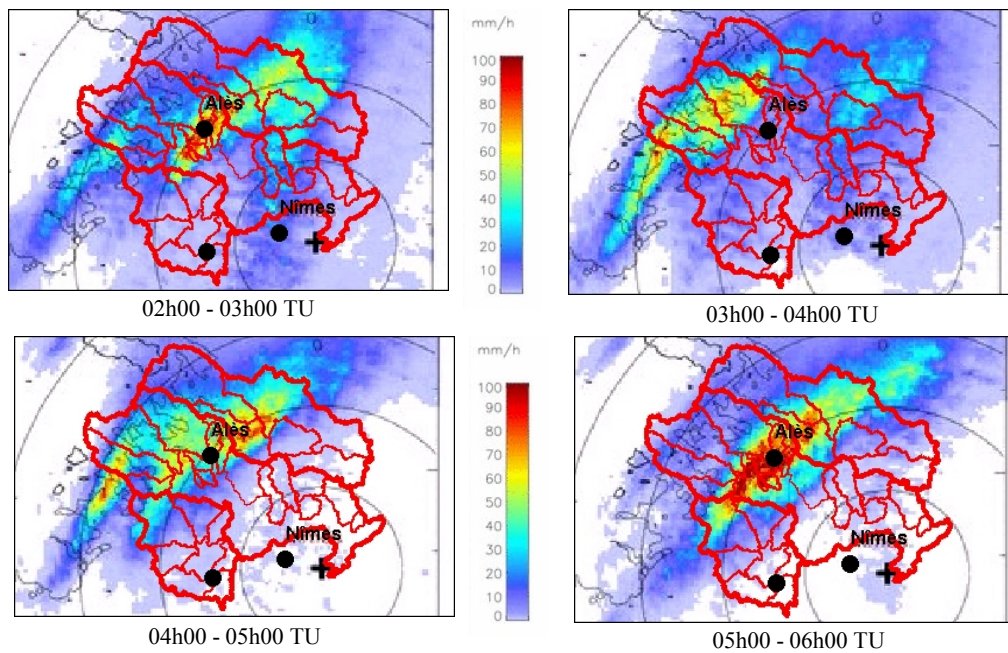


Figure III.21 Cumuls de pluie estimés à partir des mesures calibrées du radar de Nîmes, journées de 8 et 9 Septembre 2002. Source : Gaume et al. (2003)

4.2.2 L'évènement hydrologique

Vu son intensité, l'évènement de 2002 a fait l'objet de plusieurs études de retour d'expérience hydrologique afin d'estimer les débits de pointe en 77 points du réseau hydrographique (Gaume et al., 2003). Des débits spécifiques de pointe supérieurs à $15m^3s^{-1}km^{-2}$ ont été estimés sur la partie centrale du bassin du Gardon et le nord de celui du Vidourle. De plus, des débits supérieurs à $20m^3s^{-1}km^{-2}$ ont été estimés sur quelques petits sous-bassins versants du Gardon (Figure III.22). Plusieurs travaux de modélisation hydrologique ont été conduits pour simuler les débits de pointe et les comparer aux débits estimés à partir des campagnes de retour d'expérience (Anquetin et al., 2010; Braud et al., 2010; Gaume and Bouvier, 2004; Manus et al., 2008). Ces travaux ont souligné le caractère exceptionnel des processus hydrologiques intervenus lors de cet épisode vu l'étendue géographique des zones touchées par des crues aux débits de pointe supérieurs au débit décennal.

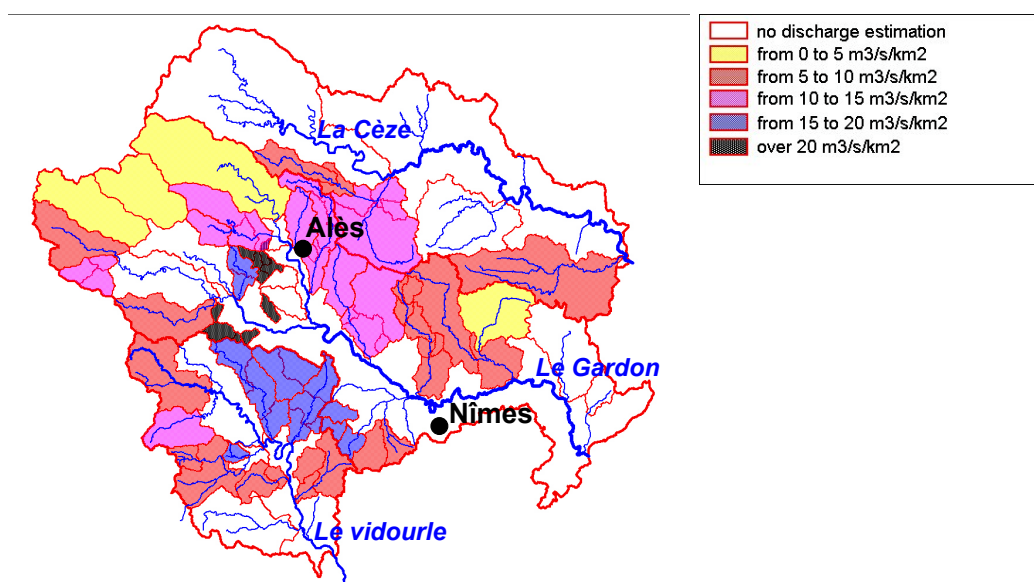


Figure III.22 Répartition spatiale des débits de pointe estimés lors de l'évènement des 8 et 9 Septembre 2002. Source : Gaume et al. (2003)

4.2.3 Prévision

Au niveau de la prévision météorologique, Météo France a diffusé le 8 Septembre à 6h du matin une première carte de vigilance qui place cinq départements du sud-est en vigilance orange : le Gard, l'Hérault, la Lozère, l'Aveyron et le Tarn (Figure III.23). La carte de vigilance a ensuite été actualisée le Lundi 9 Septembre à 1h30 du matin en incluant quatre autres départements en vigilance orange (la Haute-Loire, l'Ardèche, le Vaucluse, les Bouches-du-Rhône). Le département du Gard, quant à lui, a été placé en vigilance rouge (niveau maximal).

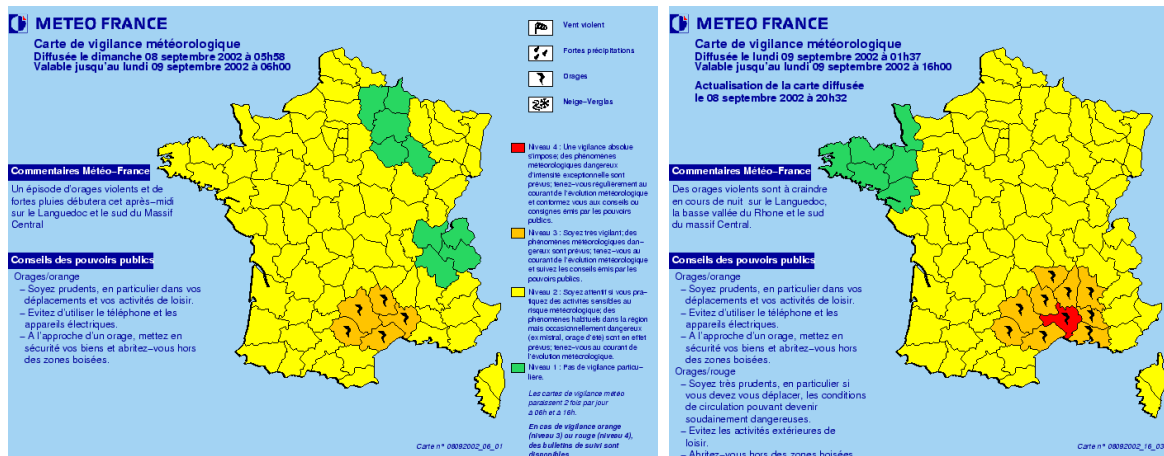


Figure III.23 Cartes de vigilance météorologique diffusées par Météo France lors de l'évènement des 8 et 9 Septembre 2002

4.2.4 Les impacts

Les dommages matériels dûs à l'évènement de 2002 ont été estimés à 1.2 milliards d'euros. Un ensemble de 299 communes ont été classées en catastrophe naturelle avec 7 200 logements et 3 000 entreprises sinistrés. Le réseau routier du Gard a été fortement touché vu que 75% des sections de routes ont été impraticables pendant plusieurs heures (210 routes départementales et 6 routes nationales) (Huet et al., 2003; Ruin, 2007). La carte de l'ensemble des sections de route coupées lors de cet évènement montre l'étendue du réseau routier impacté, surtout au niveau de la RN106 qui relie les communes Nîmes et Alès et au niveau du réseau routier situé dans la zone d'étude d'Alès (Figure III.24).

Une analyse approfondie des circonstances des accidents des 23 victimes de l'évènement a été effectuée par Ruin et al. (2008) qui a permis de localiser les différents lieux d'accidents, dont 15 qui se trouvent dans le bassin versant du Gard. La description des circonstances des décès des différentes victimes dans le département du Gard montre que 13 accidents ont eu lieu à l'extérieur (5 automobilistes piégés dans leurs véhicules, 5 personnes en camping et 3 personnes en déplacement piéton) et 10 victimes ont perdu la vie dans leur domicile. La seule victime enregistrée dans la zone d'étude était localisée à St Christol les Alès (la commune au sud d'Alès). La victime correspond à un automobiliste de 55 ans piégé dans sa voiture sur la route D6110. L'horaire de l'accident répertorié est le 9 Septembre à 4h du matin, ce qui correspond au pic de l'épisode pluvieux dans cette zone.

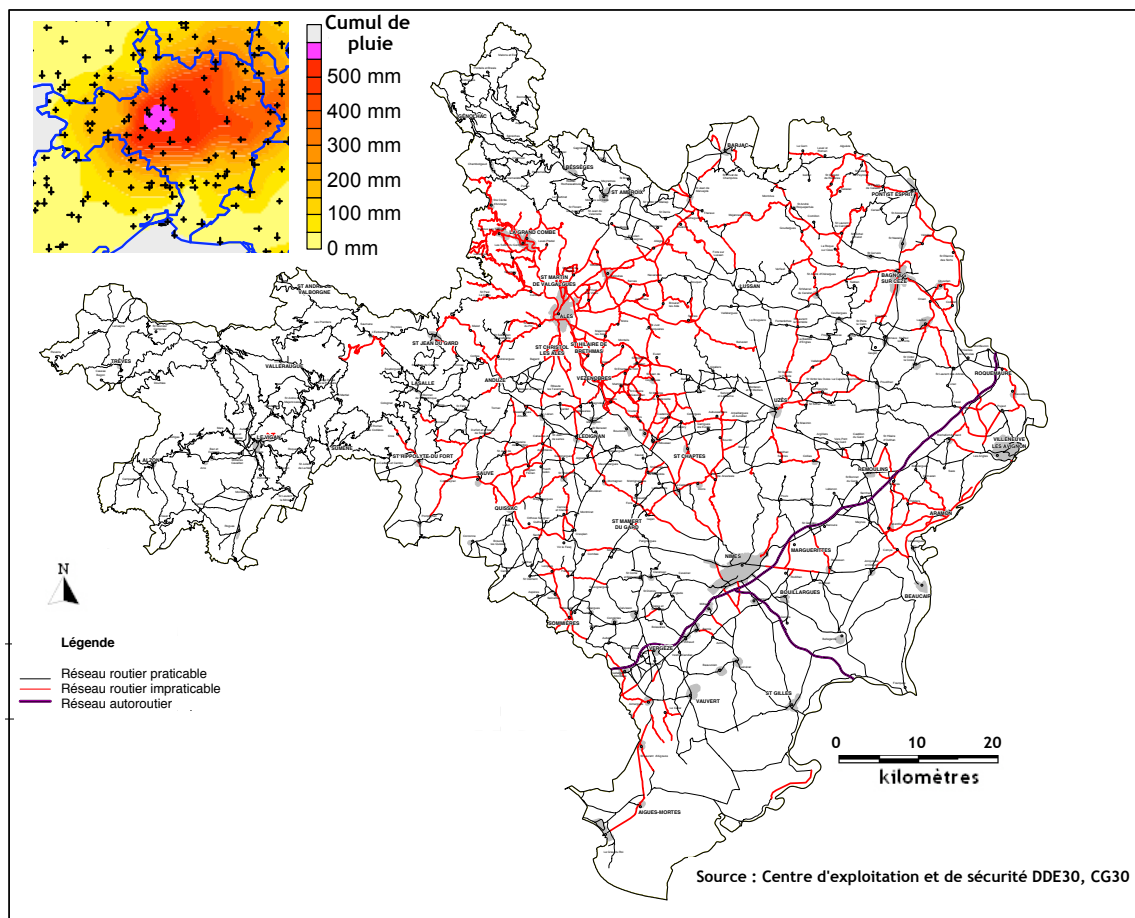


Figure III.24 Carte du niveau de coupure maximal constaté lors de l'évènement des 8 et 9 Septembre 2002 au niveau du réseau routier du Gard. Source : DDE30, Ruin (2007)

5 Synthèse

Ce chapitre a permis de décrire en détail l'approche de simulation utilisée dans *MobRISK*, les modules principaux qui le constituent ainsi que les différentes données utilisées. *MobRISK* s'appuie sur un système de simulation à événements discrets (DES) qui permet de représenter les changements d'états des éléments qui composent l'environnement étudié. La version de *MobRISK* utilisée dans cette thèse prend en considération six types d'événements répartis en deux catégories : les événements qui ne génèrent pas de décisions d'adaptation (submersion des routes et déplacements individuels) et des événements qui impliquent une prise de décision d'adaptation (traverser un point de coupure, fin d'activité en cours, perception d'un signe environnemental ou réception d'une information de vigilance).

Sont aussi décrits les trois modules principaux qui constituent *MobRISK* :

- Simulation de la mobilité routière des individus.
- Simulation des changements environnementaux (précipitations et submersions des routes).
- Simulation des décisions d'adaptation des comportements de mobilité aux changements environnementaux perçus.

La troisième partie est consacrée à la description des différentes données utilisées qui sont stockées dans une base de données spatiale relationnelle. Ces données peuvent être classées en deux catégories : les données sociales (caractéristiques socio-démographiques de la population, données de mobilité et de déplacement...) et les données spatiales (réseaux routier et hydrographique, points de coupure, précipitations...).

Pour cette première application de *MobRISK*, nous avons choisi de travailler sur l'évènement des 8-9 Septembre 2002, considéré comme un évènement de référence dans la région, dans une zone d'étude située au nord-ouest du département du Gard (regroupant 61 communes autour d'Alès) qui a été fortement touchée par cet évènement. La dernière partie du chapitre a permis de décrire les caractéristiques socio-démographiques de la population étudiée, la vulnérabilité du réseau routier et les dynamiques spatio-temporelles de l'évènement hydro-météorologique observées dans la zone d'étude.

Chapitre IV

MobRISK comme outil de simulation de la mobilité routière quotidienne : Cas d'étude

L'estimation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes pour l'évènement des 8-9 Septembre 2002 repose sur la simulation de la mobilité routière pendant les deux jours de l'évènement. La simulation de la mobilité individuelle dans *MobRISK* se base sur une approche *activity-based* dans laquelle les déplacements résultent du besoin d'effectuer un programme d'activités distribuées dans l'espace. Les modèles de mobilité "*activity-based*" intègrent généralement un simulateur de programmes d'activités qui permet de reproduire les emplois du temps des individus en fonction de leurs caractéristiques socio-démographiques. Ces relations entre les caractéristiques socio-démographiques et les *patterns* d'activités-déplacements sont définies à partir d'analyses statistiques des données issues des enquêtes nationales de mobilité qui sont effectuées à différentes échelles territoriales. Puisque l'objectif principal du développement de *MobRISK* est de simuler essentiellement l'exposition des individus aux submersions des routes, l'approche utilisée dans la modélisation de la mobilité quotidienne a été simplifiée. Ceci consiste à remplacer la procédure de simulation des programmes d'activités par une méthode qui permet d'attribuer directement des *patterns* d'activités-déplacements (issus des données ENTD) aux individus en fonction de leurs caractéristiques socio-démographiques. Ceci permet de conserver la complexité et la cohérence interne des emplois du temps réels.

Nous présentons dans ce chapitre une revue de littérature consacrée à l'étude des effets des caractéristiques socio-démographiques sur la mobilité quotidienne, caractérisée généralement en termes de nombre de déplacements et de durées d'activités. Ensuite, nous proposons de prendre en compte le caractère séquentiel des emplois du temps. Pour cela, nous présentons

***MobRISK* comme outil de simulation de la mobilité routière quotidienne : Cas d'étude**

les méthodes d'analyse de séquence et leurs applications en sciences sociales et plus particulièrement la méthode d'analyse de dissimilarité introduite par Studer et al. (2011) qui permet d'étudier les effets de variables catégorielles sur les dissimilarités entre les séquences. La troisième partie de ce chapitre est consacrée à l'application de l'analyse de dissimilarité sur les données issues de l'ENTD afin d'extraire des règles d'attribution de séquences d'activités aux individus en fonction de leurs caractéristiques socio-démographiques. Puisque l'évènement des 8-9 Septembre 2002 correspondait à un dimanche et un lundi, nous proposons d'étudier indépendamment les *patterns* d'activités-déplacements des jours de weekend et des jours de semaine. Finalement, la dernière partie présente les résultats de la simulation des mobilités sur la zone d'étude d'Alès pour un jour de weekend et un jour de semaine afin d'avoir une mobilité similaire à celle de l'évènement de 2002. Une évaluation de la mobilité simulée est proposée à l'aide des données d'observation disponibles.

1 Effets des variables socio-démographiques sur les comportements de mobilité

Plusieurs travaux ont souligné le rôle déterminant des caractéristiques socio-démographiques dans l'étude de comportements de mobilité individuelle (Hanson and Hanson, 1981). Lu and Pas (1999) ont montré que les variables les plus déterminantes dans l'explication des variations des comportements de mobilité sont l'âge, le genre, le statut professionnel et le nombre d'enfants. D'autres travaux ont souligné particulièrement l'effet du genre sur le nombre et les motifs des déplacements (Elias et al., 2008; Pas, 1984). Bhat and Misra (1999) ont montré que les personnes les plus âgées ont tendance à avoir des espaces d'activités plus réduits. Ettema and van der Lippe (2009) ont souligné que le genre, le statut familial et la présence d'enfants dans le ménage affectent significativement les déplacements liés aux activités de loisirs. André-Poyaud et al. (2016) ont implémenté une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des données de mobilité issues des Enquêtes Ménage et Déplacement (EMD) en France afin d'identifier des typologies de mobilités. Les résultats ont permis d'identifier huit profils de mobilité qui se différencient principalement en fonction de l'âge, du statut professionnel et de la distance entre le lieu de résidence et le lieu de travail. Vaughn et al. (1999) ont conduit une analyse de régression multivariée pour définir les variables socio-démographiques qui expliquent la variabilité des comportements de mobilité à l'échelle du ménage. Les résultats ont montré que le nombre d'actifs et d'enfants au sein du ménage a un effet significatif sur les déplacements quotidiens et plus particulièrement les déplacements professionnels et scolaires. Les relations entre les variables socio-démographiques et les déplacements quotidiens ont été exploitées pour le développement d'un modèle de mobilité *activity-based* de manière à attribuer des *patterns* d'activités aux ménages en fonction des caractéristiques des personnes qui les composent (Barrett et al., 1995; Smith et al., 1995).

Les comportements de mobilité sont généralement caractérisés en termes de nombre, durée et motifs des déplacements et des durées des activités effectuées. Cependant, ceci ne prend pas en compte le caractère séquentiel des déplacements individuels qui sont considérés comme des entités distinctes et séparées. Récemment, certains auteurs ont souligné l'importance de traiter la mobilité quotidienne comme une séquence d'activités et utiliser ainsi les méthodes statistiques d'analyse d'objets séquentiels afin de mieux caractériser, explorer et classifier les mobilités (Gabadinho et al., 2011; Joh and Timmermans, 2011). Nous décrivons dans la section suivante ces méthodes d'analyse de séquences et certains exemples d'application dans l'analyse des mobilités et des déplacements.

2 Méthodes d'analyse de séquences

2.1 Champs d'application

Les méthodes d'analyse de séquences ont été principalement développées au début dans le cadre de travaux en biologie moléculaire. Elles permettent d'analyser et comparer des séquences d'ADN ou d'ARN et d'identifier les régions de similarités entre un ensemble de séquences (Kruskal, 1983). Les premières applications de l'analyse séquentielle en sciences sociales ont été introduites par Abbott and Forrest (1986) dans l'étude des parcours de vie (*Life Course Analysis*). L'approche holistique qui caractérise l'analyse des séquences, en considérant la succession des états dans une vie individuelle, a permis d'extraire des *patterns* cachés dans les parcours de vie et d'identifier des typologies plus riches qui intègrent les temporalités des transitions d'états.

Les applications des méthodes d'analyse des séquences dans le domaine du transport et de la mobilité ont généralement pour but de classer les comportements de mobilité ou de comparer les *patterns* d'activités simulés avec des données d'observation pour calibrer/évaluer les modèles de simulation des emplois du temps. Wilson (1998) s'est appuyé sur les outils d'analyse des séquences pour examiner les temporalités des activités quotidiennes et comparer les emplois du temps individuels. Lesnard and Kan (2009) ont appliqué ces méthodes pour analyser des journées et semaines de travail provenant des données nationales d'emplois du temps en Grande Bretagne. Ceci leur a permis d'extraire diverses typologies dans l'organisation des temporalités de travail. Joh et al. (2001) ont adapté les méthodes d'analyse des séquences pour étudier les *patterns* de mobilité en intégrant différentes dimensions dans la comparaison des déplacements quotidiens tels que la localisation des activités, le mode de transport et les types d'activités. Ils ont ainsi mis en place des classifications des *patterns* de mobilité (à base d'arbres de décision) afin d'identifier les différents profils de mobilité ainsi que les *patterns* représentatifs de chaque profil (Joh and Timmermans, 2011).

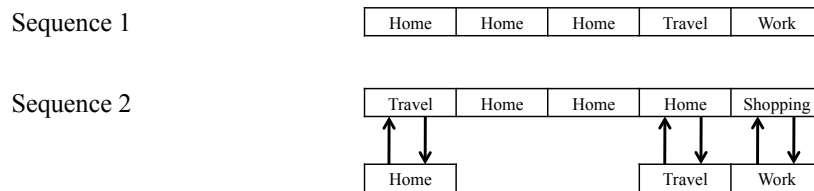
Définitions

Une séquence : Une séquence peut être définie comme une liste ordonnée d'éléments dans le temps (Gabadinho et al., 2011). On peut distinguer entre les séquences d'états, où on représente une succession de périodes dans lesquelles les éléments de la séquence occupent un état donné, et les séquences d'évènements, où ne sont représentée que les transitions d'états. Dans cette thèse, les séquences d'activités sont considérées comme des séquences d'états qui représentent des activités qui se succèdent dans le temps.

2.2 Comparaison des séquences

L'approche utilisée dans la comparaison des séquences consiste à mesurer le niveau de similarité entre une paire de séquences en fonction du nombre d'opérations nécessaires pour transformer une séquence en une autre (les aligner/ les apparier). Trois opérations élémentaires sont considérées : l'insertion ou la suppression d'un élément dans la séquence et la substitution d'un élément par un autre. La figure IV.1 illustre un exemple d'alignement de deux séquences en utilisant les différents types d'opérations.

i) Using substitutions only



ii) Using insertions and deletions only

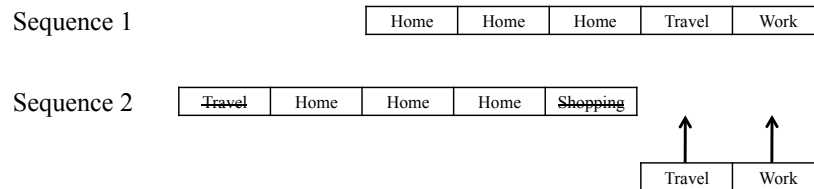


Figure IV.1 Illustration des différentes opérations utilisées pour aligner deux séquences. Dans le premier cas, seulement les opérations de substitutions sont utilisées. L'alignement de la séquence 2 à la séquence 1 nécessite alors la substitution de trois activités. Dans le deuxième cas, seulement les opérations d'insertions et suppressions sont utilisées. L'alignement de la séquence 2 à la séquence 1 nécessite donc la suppression des activités "Travel" (au début de la séquence 2) et "Shopping" (à la fin de la séquence 2) et de l'insertion des activités "Travel" et "Work".

Nous pouvons distinguer trois mesures de distance dans la littérature : la distance de Hamming (Hamming, 1950) et deux versions de la distance de Levenshtein (Levenshtein, 1966). La différence entre ces mesures se résume par les types d'opérations employées pour aligner les séquences (Table IV.1). La distance de Hamming se base seulement sur les opérations de substitutions afin d'aligner les séquences. Cependant, les séquences doivent être de longueurs égales. Levenshtein (1966) propose d'utiliser les opérations d'insertion et de suppression afin de pouvoir détecter les similarités locales entre des séquences de longueurs différentes. Deux versions ont été proposées : la première ne prend en compte que les opérations d'insertion

MobRISK comme outil de simulation de la mobilité routière quotidienne : Cas d'étude

et de suppression alors que la deuxième permet de prendre en compte les trois opérations possibles (appelée la méthode d'appariement optimal, *Optimal Matching*).

Table IV.1 Les différentes méthodes de mesure de distances entre des séquences

Mesure des distances	Opérations utilisées	
	Substitutions	Insertions et suppressions
Hamming	Oui (coût = 1)	Non
Levenshtein v1	Non	Oui (coût = 1)
Levenshtein v2 (Appariement Optimal)	Oui (coût = 1)	Oui (coût = 1)

La méthode d'appariement optimal (OM) est couramment utilisée dans l'application des méthodes d'analyse de séquences en sciences sociales (Lesnard, 2006). Ceci s'explique principalement par la flexibilité d'adapter la mesure des distances offerte par l'OM. En effet, puisque la distance mesurée entre deux séquences dépend du nombre d'opérations nécessaires pour les aligner, l'OM permet d'attribuer des poids ou coûts différents aux opérations d'insertions/suppressions et de substitutions. Il existe deux manières pour personnaliser le calcul des distances dans l'OM. La première consiste à donner des coûts ou poids différents aux opérations de substitutions et d'insertions/suppressions (qui sont généralement fixés à 1 par défaut). La deuxième méthode consiste à modifier les coûts attribués aux différentes opérations de substitutions. On peut estimer, par exemple, qu'une activité de "loisir" est plus similaire à une activité de "visite" qu'à une activité de "travail" en terme de niveau d'obligation ou de flexibilité de l'activité concernée. On peut alors attribuer des coûts moins élevés dans la substitution de l'activité "loisir" par "visite". Ainsi, une séquence d'activités constituée de "*Domicile - Loisir - Domicile*" serait plus similaire à une séquence "*Domicile - Visite - Domicile*" qu'à une séquence "*Domicile - Travail - Domicile*" même si le nombre d'éléments à substituer est le même.

La définition des coûts des différentes opérations constitue l'aspect central et délicat des méthodes d'appariement optimal car ils déterminent directement le calcul des distances. Cependant, le choix des coûts à attribuer constitue un défi méthodologique dans l'utilisation de l'OM (Gauthier et al., 2009). Plus de détails concernant le fonctionnement de la méthode d'appariement optimal et de la détermination des coûts sont disponibles dans l'annexe C.

2.3 Effets des variables catégorielles sur les dissimilarités entre les séquences

Analyse des dissimilarités des séquences

En plus de la comparaison des séquences, Studer et al. (2011) proposent une méthode qui permet d'analyser les effets de variables catégorielles sur les distances entre les séquences, appelée "analyse de dissimilarités". Elle consiste à évaluer l'association entre des objets caractérisés par une matrice de dissimilarité et une ou plusieurs variables catégorielles à l'aide d'une généralisation des principes de l'analyse de variance (ANOVA). Cette généralisation de

l'ANOVA pour des objets séquentiels a été introduite par Anderson (2001) dans ses travaux d'analyse des écosystèmes. Dans les tests d'ANOVA, la variance est mesurée en fonction de la somme des carrés de l'écart à la moyenne. Anderson (2001) a proposé d'exprimer la somme des carrés en fonction des distances Euclidiennes d_{eij} (Equation IV.1). En généralisant la somme des carrés SC à d'autres mesures de dissimilarités, nous retrouvons les principes de l'ANOVA où la somme des carrés totale SC_{Total} est égale à la somme des carrés expliqués $SC_{Expliqué}$ par une variable catégorielle plus la somme des carrés résiduels $SC_{Résiduel}$ (Équation IV.2). Ainsi, il est possible de mesurer la part de la variance expliquée par une variable spécifique (Équation IV.3) et comparer la variance expliquée avec la variance résiduelle (Équation IV.4). Studer et al. (2011) proposent d'utiliser les tests de permutation afin de mesurer la significativité de la statistique F . Les tests de permutations consistent à permuter aléatoirement le groupe d'appartenance des séquences et à mesurer à chaque fois la valeur de $F_{permuted}$. Après n permutations, on obtient une distribution des $F_{permuted}$. Ainsi, la proportion de $F_{Observed}$ supérieurs à $F_{permuted}$ peut renseigner sur la significativité de l'association entre la variable catégorielle considérée et les dissimilarités entre les séquences. Il est considéré généralement qu'il est nécessaire d'effectuer 5 000 permutations pour un seuil de significativité de 1% et 1 000 permutations pour un seuil de significativité de 5% (Manly, 2006; Studer et al., 2011).

$$SC = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (y_i - y_j)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n (d_{eij})^2 \quad (\text{IV.1})$$

$$SC_{Total} = SC_{Expliqué} + SC_{Résiduel} \quad (\text{IV.2})$$

$$R^2 = \frac{SC_{Expliqué}}{SC_{Total}} \quad (\text{IV.3})$$

$$F_{Observed} = \frac{SC_{Expliqué}/(m-1)}{SC_{Résiduel}/(n-1)} \quad (\text{IV.4})$$

Fonctionnement de l'analyse de variance (ANOVA)

L'analyse de variance (ANOVA) permet d'étudier les effets d'un ou de plusieurs facteurs sur une variable quantitative à travers une comparaison de moyennes par groupes. Il s'agit de comparer la variance inter-groupes de la variable quantitative (écart des moyennes des groupes à la moyenne totale) à la variance intra-groupes (somme des fluctuations dans chaque groupe). Si la différence entre les groupes n'est pas importante, ces deux variances sont à peu près égales. Sinon, il existe un effet significatif du groupe sur la variable quantitative considérée. Ainsi la variabilité totale est décomposée en deux sources : la variabilité intra-groupe (appelée variabilité résiduelle) et la variabilité inter-groupes due aux écarts de moyennes entre les modalités d'un facteur (appelée variabilité expliquée). La significativité de la différence entre ces deux variances est souvent testée en calculant leur ratio F qui correspond au test de Fisher ($F = SC_{Expliqué}/SC_{Résiduel}$). Il s'agit ensuite de vérifier si le rapport ne dépasse pas une certaine valeur théorique retrouvée dans la table de Fisher.

Analyse par arbre de régression

Afin de généraliser l'analyse de dissimilarité pour plusieurs variables catégorielles et de prendre en compte les interactions entre les variables, Studer et al. (2011) proposent une analyse par arbre de régression basée sur les résultats de l'analyse de dissimilarité. La méthode consiste à regrouper tous les individus avec leurs séquences respectives dans un noeud de base. Ensuite, une analyse de dissimilarité est implémentée afin d'identifier la variable socio-démographique qui explique le plus de variance dans la dissimilarité entre les séquences. Les individus sont alors partitionnés en deux groupes en fonction de cette variable de manière à avoir des séquences homogènes/similaires dans chaque noeud enfant. L'analyse de dissimilarité est ensuite ré-implémentée sur les individus et séquences qui constituent ces noeuds enfants. Cette opération est répétée de manière récursive jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'effets significatifs des variables socio-démographiques sur les dissimilarités entre les séquences d'activités. Le niveau de significativité est évalué à chaque fois à la base des tests de permutations comme expliqué précédemment. Cette analyse en arbre de régression permet de détecter les interactions entre les différentes variables et de produire une classification des séquences en fonction des effets des variables sélectionnées sur leurs dissimilarités. On peut alors extraire des règles d'attribution de séquences d'activités en fonction des variables socio-démographiques à partir de l'arbre généré.

3 Analyse des données de mobilités dans la région Languedoc-Roussillon

Les méthodes d'analyse de séquences, et plus particulièrement l'analyse des dissimilarités développée par Studer et al. (2011), constituent des outils intéressants pour évaluer les effets des caractéristiques socio-démographiques sur les comportements de mobilité considérés comme des séquences d'activités-déplacements. Nous proposons dans cette section d'appliquer ces méthodes sur les données de déplacements issus de l'ENTD afin d'identifier des règles d'attribution de séquences d'activités à la population de la zone d'étude d'Alès. La première partie présente une analyse descriptive de la mobilité correspondant à l'échantillon régional de Languedoc-Roussillon (en termes de nombre de déplacements et durées d'activités). La deuxième et la troisième parties sont consacrées à l'application des méthodes d'analyses de séquences sur les données ENTD qui permettra d'évaluer les effets des variables socio-démographiques sur les dissimilarités entre les séquences d'activités afin d'identifier les variables qui expliquent le mieux les différences entre les *patterns* d'activités-déplacements. Ensuite, la quatrième partie présente les résultats de l'analyse par arbre de régression qui seront utilisés pour attribuer les séquences d'activités à la population de la zone d'étude. La dernière partie est consacrée à l'évaluation de la performance des règles d'attribution identifiées.

3.1 Analyse des déplacements

L'échantillon enquêté est constitué de 1 240 personnes. La table IV.2 contient la description des caractéristiques socio-démographiques de l'échantillon régional enquêté. En moyenne, les individus effectuent 3.7 déplacements pour un jour de semaine et 3.2 déplacements pour un jour de weekend. On observe que le nombre de déplacements quotidiens dépend de certaines caractéristiques socio-démographiques. Les femmes, les personnes âgées de 18 à 45 ans, les chômeurs et les personnes appartenant à des ménages de grande taille et possédant plus d'une voiture effectuent plus de déplacements pendant les jours de semaine (Table IV.2). Cependant, ce sont les hommes, les actifs et les parents qui effectuent le plus de déplacements pendant le weekend (Table IV.2). Ces différences peuvent s'expliquer par les contraintes professionnelles et les besoins familiaux propres aux différents profils socio-démographiques.

MobRISK comme outil de simulation de la mobilité routière quotidienne : Cas d'étude

Table IV.2 Caractéristiques socio-démographiques de l'échantillon enquêté (ENTD) dans la région Languedoc-Roussillon et nombre de déplacements moyens (N_{DEP}) par catégorie socio-démographique pour un jour de semaine (S) et un jour de weekend (W)

Variables	Modalités	%	$N_{DEP}(S)$	$N_{DEP}(W)$
Genre	Homme	44.30	3.61	3.23
	Femme	55.70	3.76	3.17
Age	< 18 ans	7.55	3.40	2.98
	[18, 28] ans	13.43	3.83	2.28
	[29, 45] ans	25.35	4.35	3.49
	[46, 60] ans	24.99	3.80	3.30
	> 60 ans	28.68	3.18	2.89
Le diplôme le plus élevé	Université	25.35	4.04	3.49
	Bac, BEP	35.18	3.86	3.27
	CEP, Collège	19.89	3.39	2.98
	Pas de diplôme	35.18	3.30	2.98
Situation professionnelle	Actif	46.69	4.04	3.46
	Étudiant/ Élève	5.33	3.44	3.21
	Chômeur	4.83	4.08	3.09
	Retraité	28.47	3.25	2.91
	Homme/femme au foyer	5.21	3.91	3.04
	Autre situation	9.47	3.35	2.99
Profession	Agriculteurs exploitants	1.09	3.98	3.53
	Artisans, commerçants et chefs d'entreprise	3.26	4.15	3.32
	Cadres et fonctions intellectuelles supérieures	8.76	4.05	3.62
	Techniciens et professions intermédiaires	15.45	4.09	3.41
	Employés administratifs	10.12	4.09	3.39
	Ouvriers	13.47	3.76	3.30
	Retraités	29.61	3.29	2.92
	Inactifs n'ayant jamais travaillé et non renseignée	18.24	3.59	3.10
Taille du ménage	Une personne	31.31	3.37	3.04
	Deux personnes	33.89	3.46	3.12
	Plus que deux personnes	34.80	3.79	3.37

Quant aux motifs des déplacements, on remarque que plus de 40% des déplacements individuels ont pour motif le retour au domicile. Comme on peut s'y attendre, les déplacements pour des motifs de travail, étude, soins, accompagnements et démarches administratives sont plus nombreux les jours de semaine. Au contraire, les déplacements aux motifs d'achats, de loisirs et de visites sont plus nombreux les jours de weekend (Figure IV.2).

Concernant les durées des activités, nous remarquons que les individus passent en moyenne 18 heures/jour à leur domicile en semaine et 19h/jour le weekend (Figure IV.3). Les durées de transport semblent être similaires entre un jour de semaine et de weekend. Cependant, elles varient selon les caractéristiques socio-démographiques des individus. En semaine, les hommes, les jeunes adultes et les étudiants passent plus de temps dans les transports. La différence

globale entre les durées de transport en semaine et en weekend s'explique principalement par la profession (Figure IV.4).

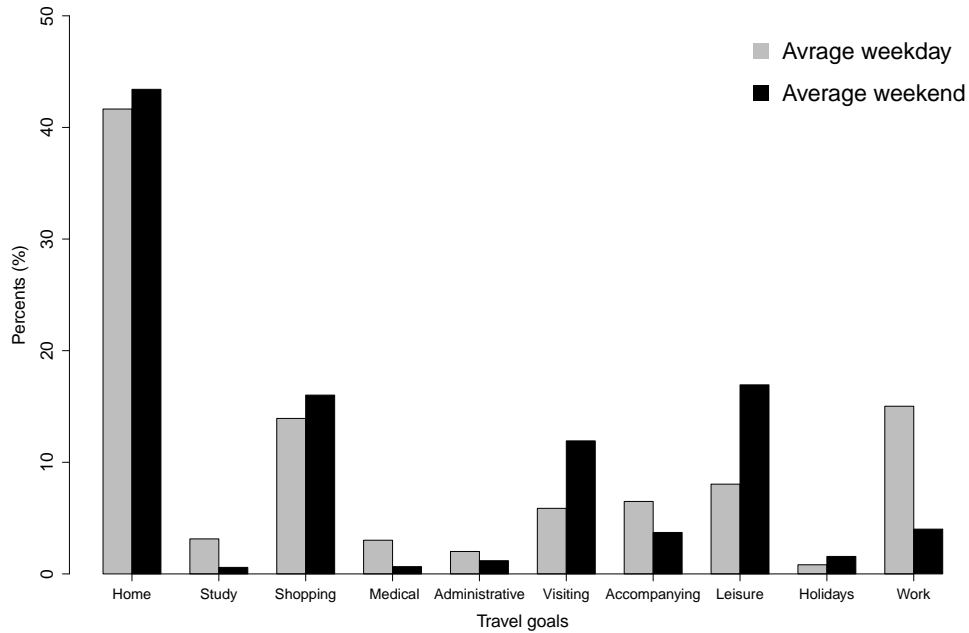


Figure IV.2 Pourcentages des déplacements motorisés par motif pour les jours de semaine et les jours de weekend

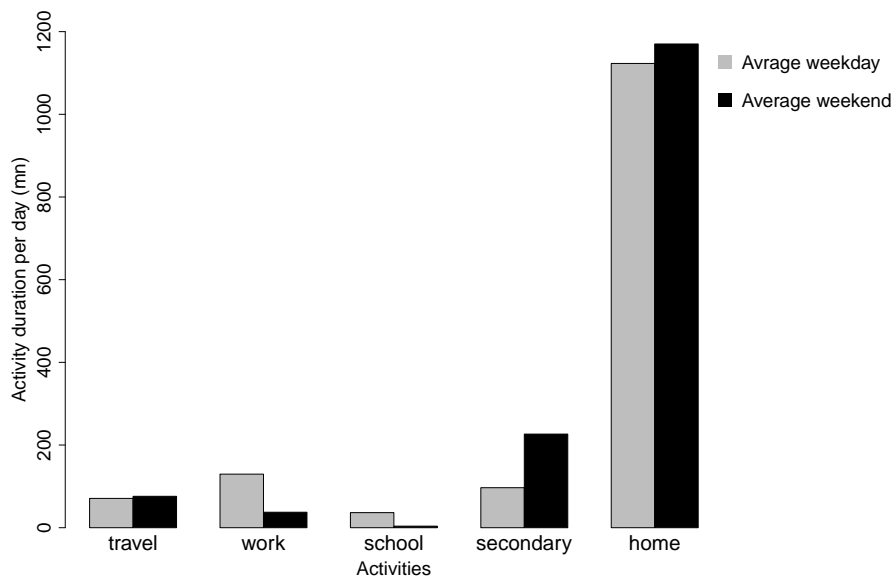


Figure IV.3 Durées moyennes des activités pour un jour de semaine et un jour de weekend

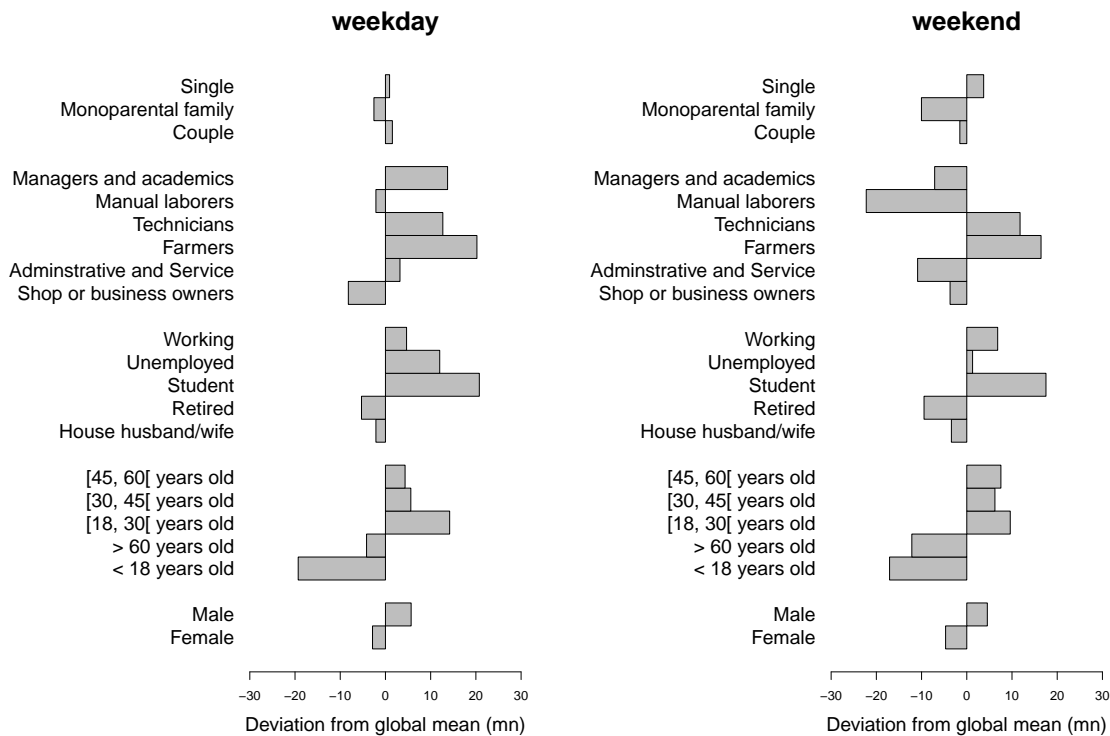


Figure IV.4 Différence par rapport aux durées moyennes de transport par catégorie socio-démographique pour un jour de semaine ($D = 18mn$) et un jour de weekend ($D = 20mn$)

3.2 Analyse des séquences d'activités : visualisation

L'analyse du nombre de déplacements et des durées d'activités des données ENT D a permis de constater certains effets des caractéristiques socio-démographiques sur les déplacements individuels. Cependant, pour passer de ces caractéristiques à des comportements de mobilité, il est essentiel de prendre en compte le caractère séquentiel des déplacements et leurs motifs et de considérer la totalité des *patterns* d'activités-déplacements. Pour cela, nous avons transformé les données de mobilité en séquences d'activités avec un pas de temps de 5 mn.

Les outils d'analyse de séquences offrent la possibilité d'explorer les données séquentielles à l'aide de la visualisation graphique. Il existe deux approches principales de visualisation des séquences d'états : la visualisation en lignes (appelée *index-plot*) qui permet de représenter les individus distinctement avec leurs séquences respectives et la visualisation sous forme de chronogrammes (appelés *State distribution plots*).

La figure IV.5 illustre une visualisation en lignes de 10 séquences sélectionnées aléatoirement à partir des données ENT D. Ainsi, l'axe des abscisses correspond à l'axe du temps et chaque individu est représenté par une ligne (barre) composée de segments de couleurs différentes qui symbolisent les types d'activités. La longueur des segments représente la durée

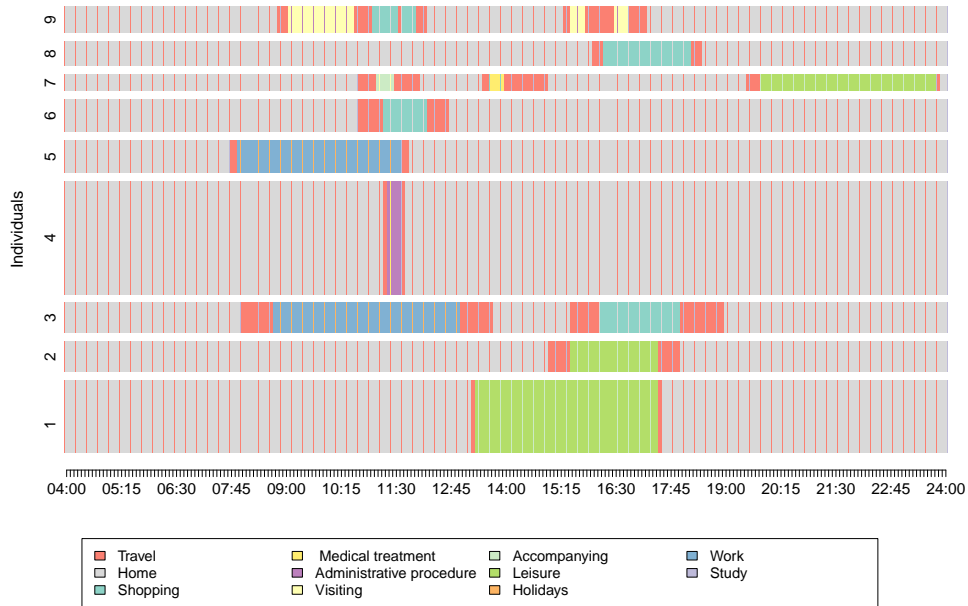


Figure IV.5 Représentation de 10 séquences d'activités représentant les programmes d'activités de 10 individus extraits aléatoirement des données ENT-D

de l'activité. Les poids statistiques des individus sont représentés par les largeurs des barres¹. L'avantage de cette représentation est qu'elle conserve le caractère longitudinal des séquences en permettant de mettre en évidence la diversité des emplois du temps individuels. Cependant, quand le nombre de séquences est élevé, il devient difficile de les interpréter.

Les séquences d'activités peuvent aussi être représentées sous forme de chronogrammes (appelés *State distribution plots*) qui consistent en une succession de coupes instantanées montrant la distribution des individus entre les différents états des séquences à chaque pas de temps. Cette représentation permet une lecture globale de la temporalité des activités quotidiennes. La figure IV.6 représente la distribution des activités effectuées par l'échantillon régional de Languedoc-Roussillon pendant un jour de semaine. On distingue deux pics d'activités à 10h et à 16h qui correspondent principalement aux activités "études" et "travail". La figure IV.7 illustre les distributions des activités en jour de weekend. On observe une forme similaire à la distribution des activités en jours de semaine mais avec des pics beaucoup moins accentués et qui correspondent principalement aux activités "loisirs" et "visites". Le Week-end les horaires de début de déplacements sont plus tardifs.

1. Les poids statistiques se réfèrent aux méthodes d'échantillonnage utilisées lors des enquêtes. Ils renseignent sur le niveau de représentativité des individus. La définition de l'INSEE est disponible dans la section 3.1 du chapitre III

MobRISK comme outil de simulation de la mobilité routière quotidienne : Cas d'étude

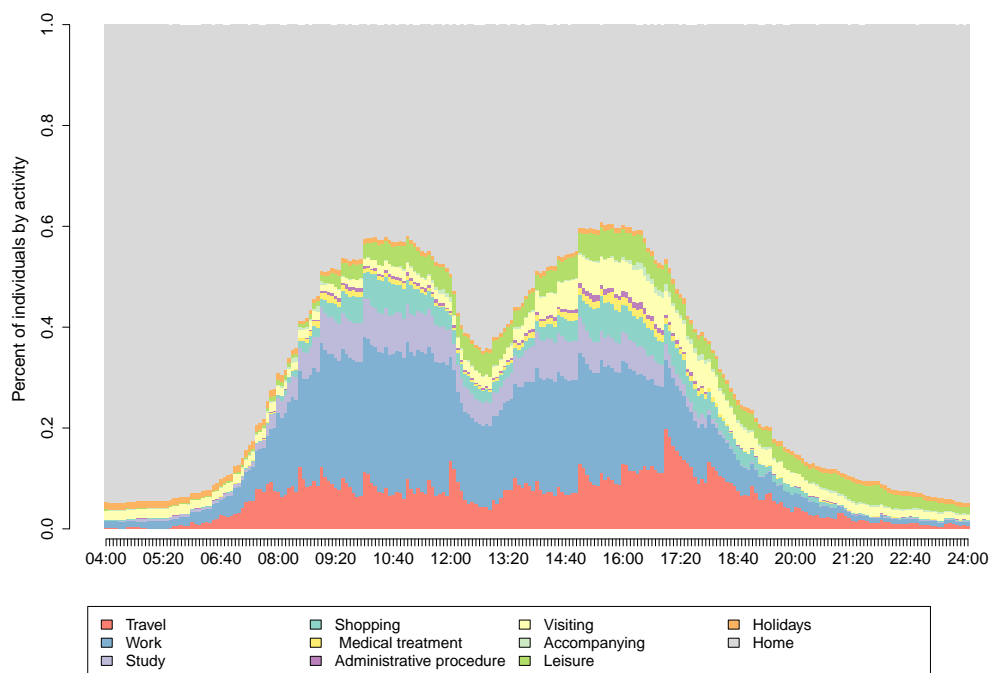


Figure IV.6 Chronogramme des séquences d'activités pour un jour de semaine

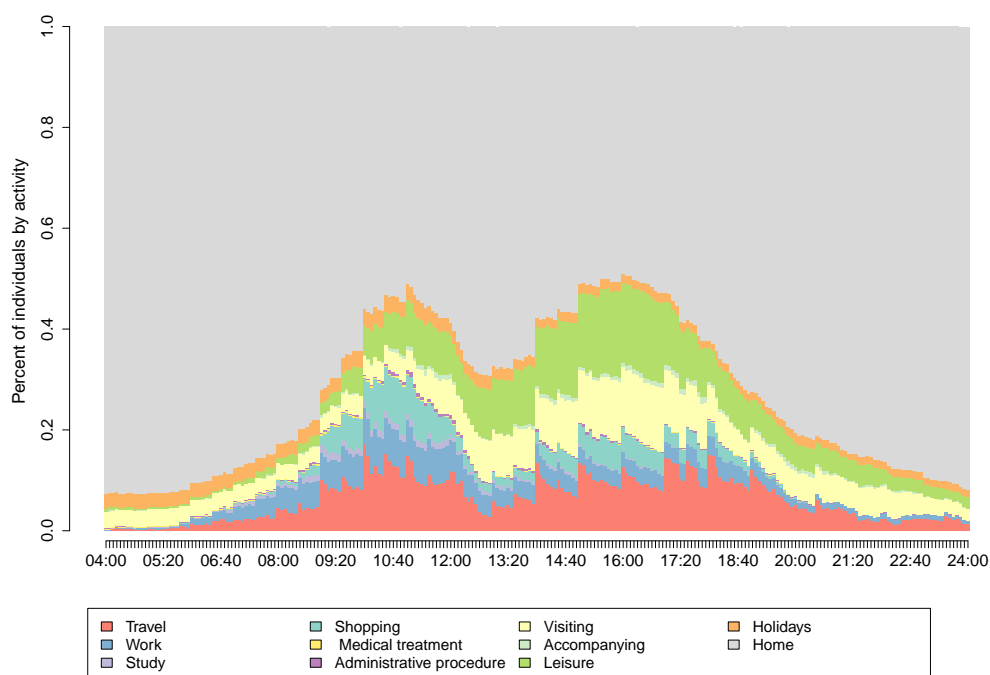


Figure IV.7 Chronogramme des séquences d'activités pour un jour de weekend

3.3 Effets des variables socio-démographiques sur les dissimilarités des séquences d'activités

Comme indiqué dans la section 2.2, la définition d'une matrice des coûts de substitution des éléments des séquences constitue un paramètre important dans la mesure des distances dans l'OM. Deux paramétrisations des coûts (matrices de coûts de substitution) ont été testées dans cette étude en fonction des types d'activités. Dans un premier temps, les paramètres standards ont été conservés en attribuant un même coût de substitution ($c = 1$) pour toutes les opérations de substitution (Table IV.3). Ensuite, nous avons distingué quatre catégories d'activités : les déplacements, les activités à domicile, les activités obligatoires principales (regroupant le travail et les études) et les activités secondaires (achat, accompagnement, loisirs...). Une deuxième matrice de coûts a alors été définie en attribuant des coûts plus élevés aux substitutions des activités appartenant à des catégories différentes (Table IV.4). La raison de cette classification d'activités consiste à considérer que la substitution d'une activité secondaire par une autre activité secondaire a un coût moins élevé que sa substitution par une activité principale. Ceci permettra alors d'accentuer les distances entre les programmes d'activités qui ne contiennent par exemple que des activités secondaires par rapport à ceux qui contiennent plus d'activités principales.

Table IV.3 Matrice des coûts de substitutions des activités (version standard)

	Types d'activités			
	Transport	Domicile	Principales	Secondaires
Transport	0	1	1	1
Domicile	1	0	1	1
Principales	1	1	0	1
Secondaires	1	1	1	0

Table IV.4 Matrice des coûts de substitutions des activités (version paramétrée)

	Types d'activités			
	Transport	Domicile	Principales	Secondaires
Transport	0	3	3	3
Domicile	3	0	2	2
Principales	3	2	1 (0 si même activité)	2
Secondaires	3	2	2	1 (0 si même activité)

Nous avons conduit une analyse de dissimilarité des séquences d'activités afin d'évaluer les effets de huit variables socio-démographiques : genre, âge, niveau d'éducation, statut professionnel, profession, taille du ménage, nombre d'enfants par ménage et type de ménage. Le choix de ces variables est basé sur les travaux Pas (1984) qui ont permis d'identifier les variables socio-démographiques les plus influentes en matière de mobilité. Les résultats montrent que les variables sélectionnées ont globalement un effet significatif sur les dissimilarités des séquences d'activités. Elles expliquent 23.72% de la dissimilarité totale des séquences pour

MobRISK comme outil de simulation de la mobilité routière quotidienne : Cas d'étude

un jour de semaine et seulement 7.34% de la dissimilarité totale pour un jour de weekend (Table IV.5). En regardant les effets des variables indépendamment, nous observons que le statut professionnel, la profession et l'âge sont les variables les plus discriminantes pour les jours de semaine (expliquant respectivement 15.1%, 12.9% et 10.2% de la dissimilarité totale). Les mêmes variables ont les effets les plus importants en jours de weekend expliquant respectivement 2.7%, 2.2% et 2.3% de la dissimilarité totale. Au contraire, le type de ménage ne semble pas avoir un effet significatif sur les dissimilarités entre les séquences d'activités. De la même manière, nous avons conduit une analyse de dissimilarité des séquences d'activités en nous basant sur la matrice de coûts de substitution présentées dans la table IV.4 afin d'évaluer les effets du paramétrage choisi. Les résultats obtenus dans la table IV.6 ne montrent pas de différences marquantes en terme de significativité des effets des variables par rapport à la version standard des paramètres des coûts. Nous avons alors opté pour utiliser la version standard des paramètres de coûts de substitution pour le reste de l'étude.

Table IV.5 Effets des variables socio-démographiques sur les dissimilarités entre les séquences d'activités en utilisant la version standard de la matrice des coûts de substitution (* significativité à 1% en effectuant 5000 permutations)

	<i>F</i>		<i>R</i> ²		<i>p - value</i>	
	<i>Semaine</i>	<i>Weekend</i>	<i>Semaine</i>	<i>Weekend</i>	<i>Semaine</i>	<i>Weekend</i>
Age	16596.38	3059.15	0.102	0.023	0.001*	0.001*
Genre	1882.29	1394.32	0.003	0.002	0.019*	0.086
Niveau d'éducation	6198.73	1260.22	0.030	0.007	0.001*	0.027*
Statut professionnel	17347.59	1929.23	0.151	0.022	0.001*	0.001*
Profession	10890.80	1797.96	0.129	0.027	0.001*	0.001*
Taille du ménage	4551.43	1484.38	0.015	0.005	0.001*	0.016*
Nombre d'enfants/ménage	5305.90	1192.81	0.017	0.004	0.001*	0.089
Type du ménage	1283.36	1146.78	0.006	0.006	0.048	0.104
Nombre de voitures	4354.07	1512.89	0.014	0.005	0.001*	0.015*
Global	8.47	1.86	0.237	0.073	0.001*	0.001*

Table IV.6 Effets des variables socio-démographiques sur les dissimilarités entre les séquences d'activités en utilisant la version paramétrée de la matrice des coûts de substitution (* significativité à 1% en effectuant 5000 permutations)

	<i>F</i>		<i>R</i> ²		<i>p - value</i>	
	<i>Semaine</i>	<i>Weekend</i>	<i>Semaine</i>	<i>Weekend</i>	<i>Semaine</i>	<i>Weekend</i>
Age	20 484	3 977	0.123	0.030	0.001*	0.001*
Genre	1 946	1 509	0.003	0.002	0.016*	0.048*
Niveau d'éducation	7 243	1 421	0.035	0.008	0.001*	0.031*
Statut professionnel	20 039	2 252	0.170	0.026	0.001*	0.001*
Profession	12 142	2 041	0.142	0.031	0.001*	0.001*
Taille du ménage	4 551	1 825	0.015	0.007	0.001*	0.006*
Nombre d'enfants/ménage	6 728	1 353	0.022	0.005	0.001*	0.060
Type du ménage	1 279	1 248	0.006	0.007	0.064	0.088
Nombre de voitures	4 404	1 664	0.014	0.006	0.001*	0.013*
Global	9.98	2.26	0.268	0.088	0.001*	0.001*

3.4 Analyse par arbres de régression et construction de règles d'attribution de séquences d'activités

Les analyses précédentes ont permis d'évaluer les effets des variables socio-démographiques, considérées indépendamment, sur les séquences d'activités. Comme indiqué dans la section 2.3, Studer et al. (2011) ont proposé une méthode d'analyse multivariée par arbre de régression qui permet de classifier les séquences d'activités en fonction des effets des variables socio-démographiques sur les dissimilarités. Nous proposons d'exploiter cette méthode pour extraire des règles d'attribution des séquences d'activités aux individus en fonction de leurs caractéristiques socio-démographiques. Afin de pouvoir évaluer les règles obtenues, nous proposons de diviser les données de départ en deux : d'un côté les données appelées "d'entraînement" ("*train data set*") qui seront utilisées pour la construction des règles d'attribution, de l'autre des données d'évaluation ("*test data set*") qui permettront d'évaluer ces règles. Cette méthode d'évaluation est couramment utilisée dans l'évaluation des modèles statistiques de classification. Généralement, dans l'utilisation courante de cette méthode d'évaluation, deux tiers des données sont échantillonnées aléatoirement pour construire la base d'entraînement ("train") et le tiers restant est utilisé pour l'évaluation. Cependant, dans notre cas, un échantillonnage aléatoire peut modifier la structure socio-démographique de la population utilisée dans les données d'entraînement. Afin de minimiser ces biais, nous avons conduit un échantillonnage "supervisé" de deux tiers de la population de base (représentant 877 individus) de manière à ce que les caractéristiques socio-démographiques de la population échantillonnée respectent celles de la population totale.

Nous avons conduit une analyse par arbre de régression des séquences d'activités de l'échantillon d'entraînement. Les résultats ont permis d'identifier huit groupes de séquences d'activités pour les jours de semaine (Figure. IV.8) et seulement six groupes de séquences pour les jours de weekend (Figure. IV.9). Les huit groupes de séquences d'activités des jours de semaine représentent trois typologies principales d'individus : les actifs (qui sont représentés dans les groupes 1, 2 et 3), les étudiants (groupes 5 et 6) et les non-actifs (groupes 6, 7 et 8). La différence principale entre leurs emplois du temps réside dans la présence/absence des activités "travail" et "études". Ensuite, nous distinguons deux types d'emplois du temps d'actifs en fonction de leur âge : ceux qui ont plus de 45 ans (groupe 1) et ceux qui sont plus jeunes (groupes 2 et 3) et qui semblent avoir des durées de travail plus importantes avec des déplacements professionnels plus matinaux. Enfin, on distingue deux formes d'emplois du temps de jeunes actifs en fonction de leurs niveaux d'éducation. Ceux qui ont des diplômes supérieurs semblent avoir des trajets professionnels plus longs et ont moins tendance à rentrer à leur domicile à midi. Concernant les étudiants, on distingue deux groupes principaux d'emplois du temps en fonction de l'âge : les scolaires (groupe 4, âgés de moins de 18 ans) et les étudiants (groupe 5). En terme de programmes d'activités,

***MobRISK* comme outil de simulation de la mobilité routière quotidienne : Cas d'étude**

nous remarquons que les étudiants ont plus de variabilité dans leurs activités ($S^2 = 77.9$) avec des déplacements longs le soir pour des activités de loisirs et la présence d'activités "travail". Et enfin, les emplois du temps des individus non-actifs semblent se différencier en fonction du genre : les hommes ont des trajets plus longs et passent plus de temps dans des activités de loisirs (groupe 6), alors que les activités "visite" et "achat" sont plus présentes chez les femmes. Dans ce dernier groupe, nous distinguons les femmes au foyer et les chômeuses (groupe 7) des retraitées (groupe 8) qui semblent effectuer plus d'activités de visites et moins d'activités de loisirs avec des horaires de retour à domicile plus précoces.

Concernant les jours de weekend, l'arbre de régression a permis d'obtenir six groupes de séquences d'activités. La variable socio-démographique la plus discriminante entre les séquences est l'âge. La catégorie d'âge de 18 à 28 ans (groupe 1) passe plus de temps dans des activités de loisirs, surtout au milieu de la journée. Concernant les autres catégories d'âge, nous distinguons essentiellement les personnes qui travaillent le weekend (groupes 2 et 3) incluant les agriculteurs, les cadres, les fonctions académiques, les ouvriers et les commerçants. Pour les autres individus, nous identifions principalement les personnes de moins de 18 ans (groupe 4) qui effectuent des activités d'étude au début de la journée et des activités de loisirs l'après midi avec une importante présence à domicile. Les autres catégories d'âges se différencient selon les statuts professionnels (groupes 5 et 6).

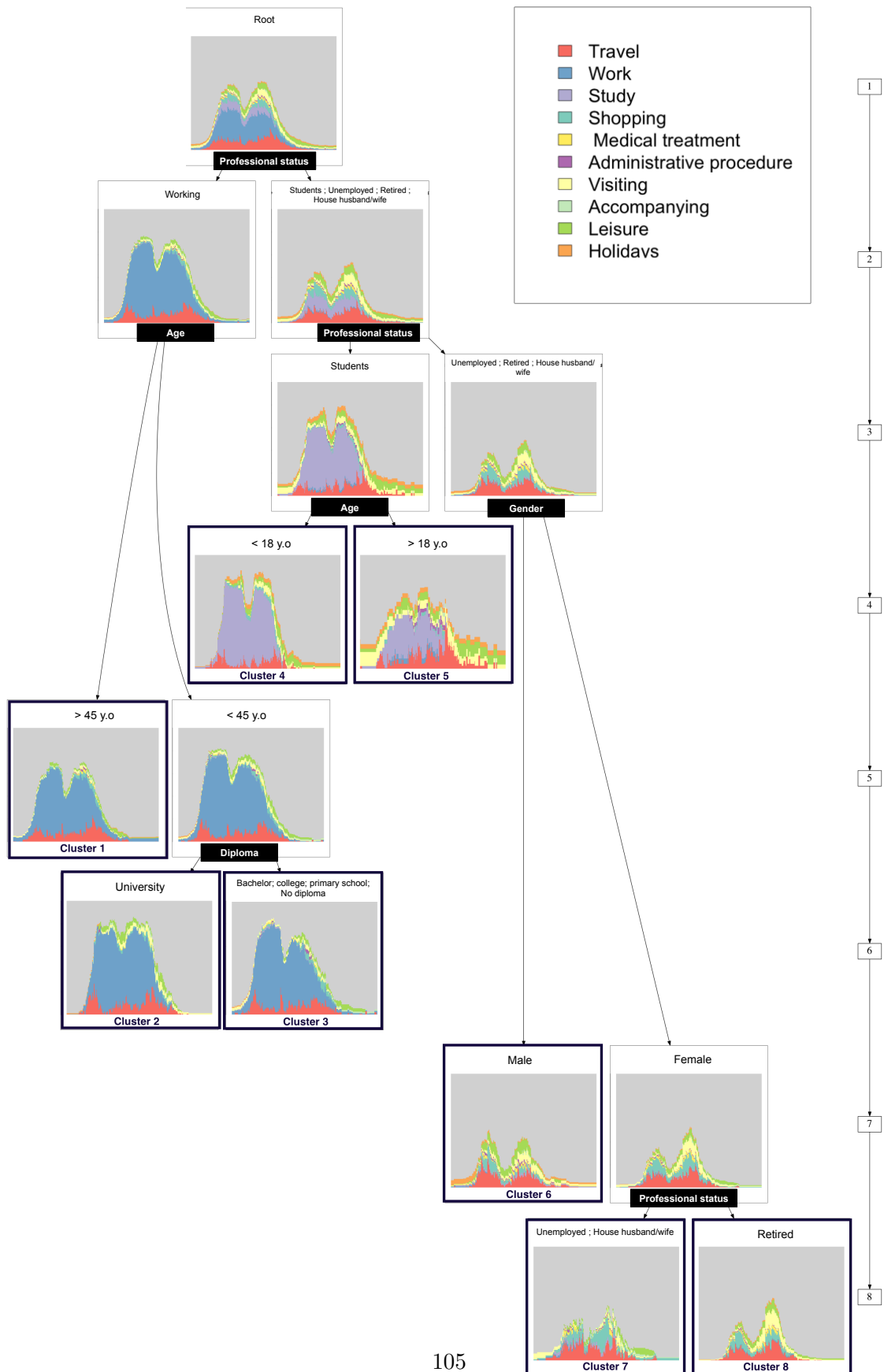


Figure IV.8 Arbre de régression des séquences d'activités pour un jour de semaine

MobRISK comme outil de simulation de la mobilité routière quotidienne : Cas d'étude

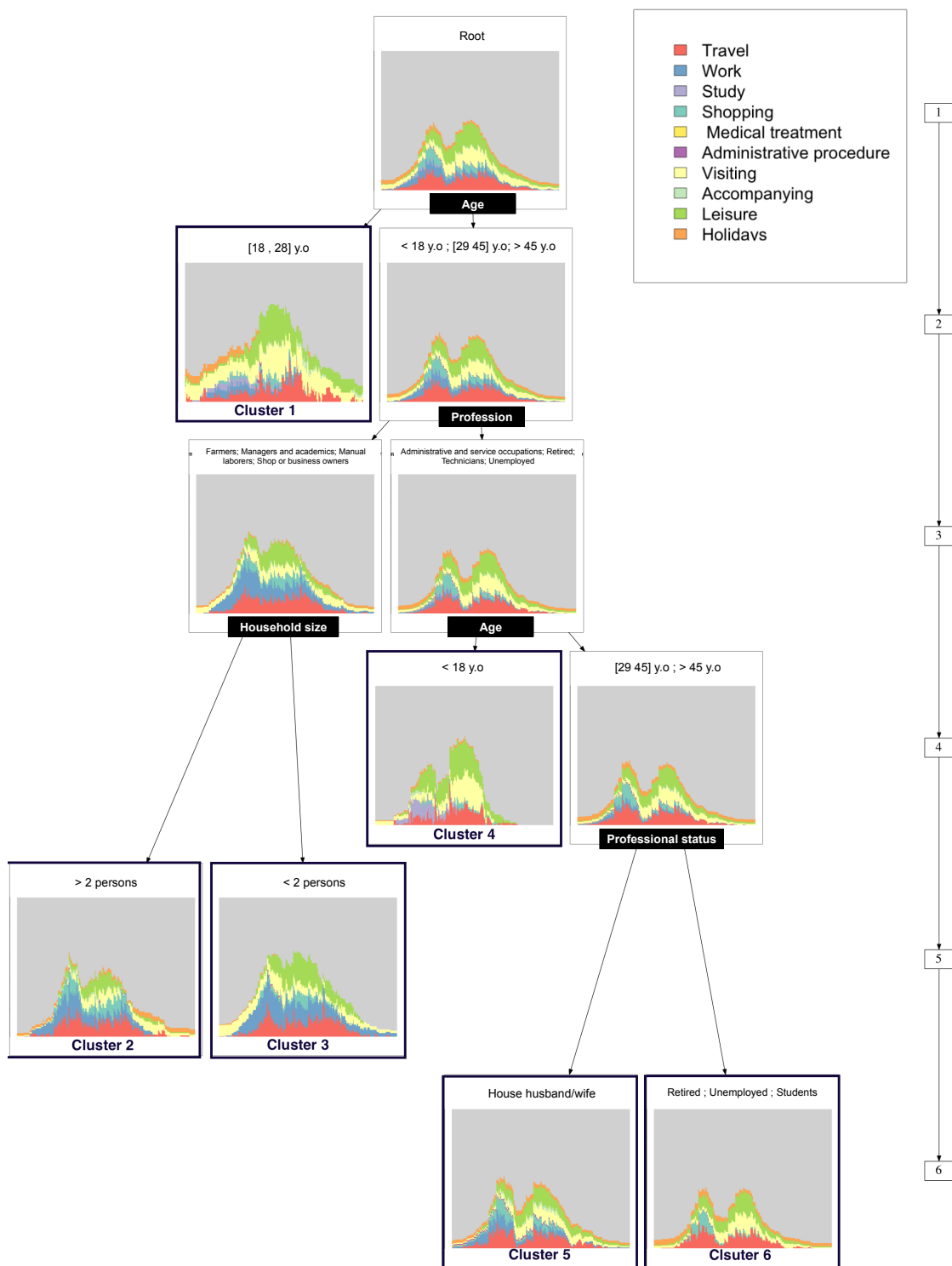


Figure IV.9 Arbre de régression des séquences d'activités pour un jour de weekend

Attribution des séquences d'activités :

Les résultats de l'analyse par arbre de régression sont utilisés pour attribuer des séquences d'activités aux individus appartenant à l'échantillon "test" en fonction de leurs profils socio-démographiques. La méthode consiste à identifier pour chaque individu le groupe de séquences d'activités qui correspond à son profil socio-démographique et lui attribuer ensuite aléatoirement une séquence d'activités parmi celles présentes dans le groupe correspondant. Ceci permet d'obtenir pour chaque individu de la base de "test" une séquence d'activité réelle (observée) et une séquence attribuée à l'aide des règles définies par l'analyse précédente. Afin d'éviter d'échantillonner plusieurs fois des séquences atypiques dans chaque groupe de séquences, nous avons choisi d'introduire un paramètre de poids qui est utilisé pour superviser la procédure d'échantillonnage. Pour cela, nous avons identifié la séquence représentative ou centrale dans chaque groupe (qui a la distance moyenne la plus faible par rapport aux autres séquences de son groupe d'appartenance). La distance entre chaque séquence et la séquence représentative est calculée et utilisée ensuite comme un poids dans l'échantillonnage de manière à réduire la probabilité d'échantillonner les séquences qui sont très distinctes de la séquence représentative. Les figures IV.10 et IV.11 illustrent deux exemples d'attribution de séquences d'activités à un individu pour un jour de semaine et un jour de weekend.

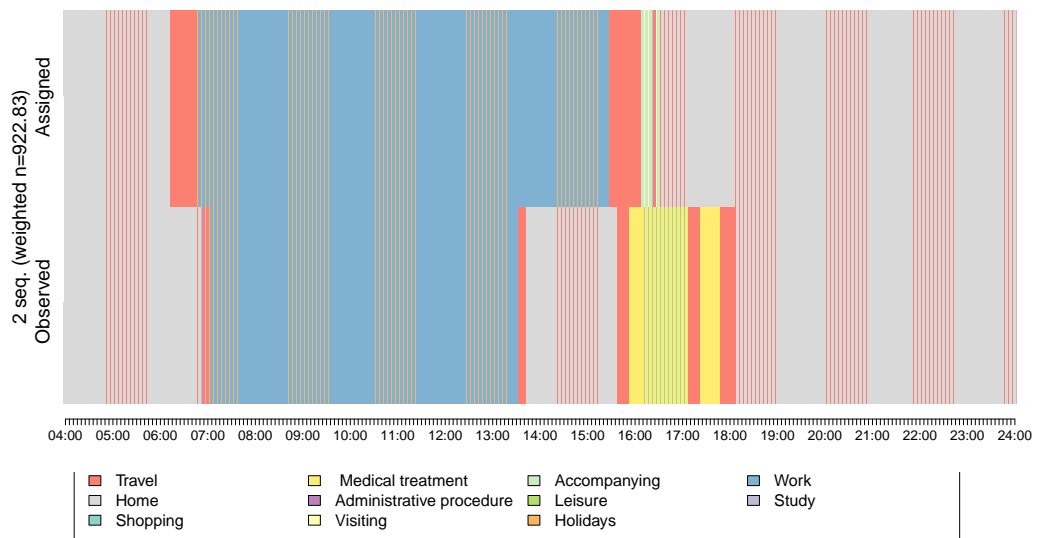


Figure IV.10 Illustration d'une attribution d'un emploi du temps d'un jour de semaine

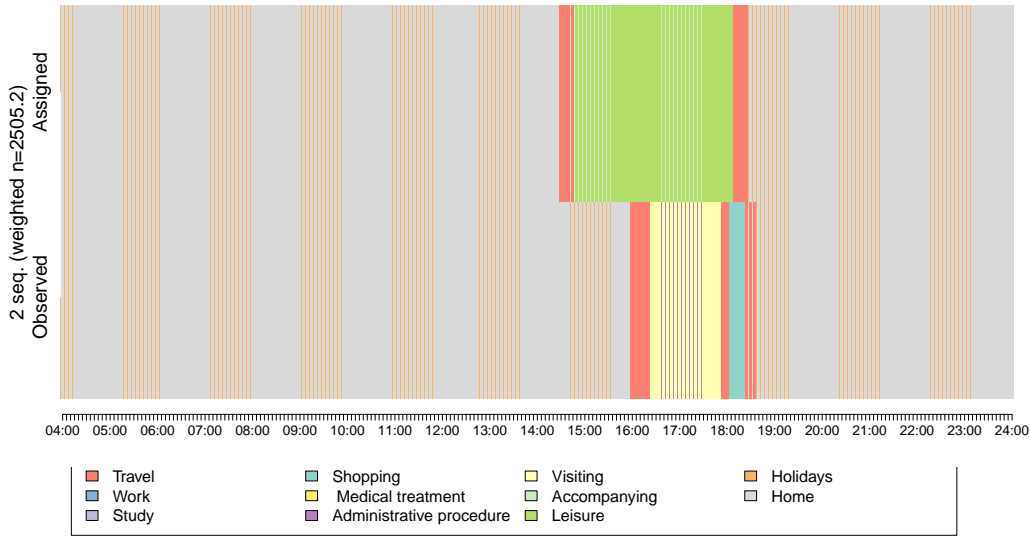


Figure IV.11 Illustration d'une attribution d'un emploi du temps d'un jour de weekend

3.5 Évaluation des règles d'attribution des séquences d'activités

Pour évaluer la performance de l'attribution des séquences d'activités, les distances entre les séquences observées et attribuées sont calculées ($d_{Observed/Assigned}$) pour chaque individu de la base de "test". Ces distances sont comparées ensuite aux distances entre la séquence observée de chaque individu et toutes les autres séquences des deux bases "train" et "test" ($d_{Observed/All sequences}$). Nous considérons alors que l'attribution est performante dès lors que $d_{Observed/Assigned}$ est considérablement inférieure à $d_{Observed/All sequences}$. Ce qui veut dire que la distance entre la séquence attribuée et la séquence observée est inférieure à la distance moyenne entre la séquence observée et toutes les autres séquences. Plus $d_{Observed/Assigned}$ est supérieure à ($d_{Observed/All sequences}$), plus l'attribution est considérée performante.

Les résultats de l'évaluation montrent que l'attribution des séquences d'activités est plutôt performante pour les jours de semaine puisque la distance moyenne entre les séquences attribuées et observées ($d_{Observed/Assigned} = 80$) est inférieure à la distance moyenne entre les séquences observées et les autres séquences ($d_{Observed/All sequences} = 110$). Cependant, l'attribution de séquences d'activités en jour de weekend est moins performante ($d_{Observed/Assigned} = 138$ et $d_{Observed/All sequences} = 111$). Ceci peut s'expliquer par le faible effet des variables socio-démographiques sur les dissimilarités des séquences en jour de weekend comme indiqué dans la table IV.5.

Nous remarquons aussi que la performance de la méthode d'attribution dépend des classes de profils socio-démographiques. La figure IV.12 représente les différences entre $d_{Observed/Assigned}$ et $d_{Observed/All sequences}$ en fonction des groupes de séquences. On observe que, pour les jours de semaine, la performance est faible essentiellement pour les individus

appartenant à la classe 3, qui correspond aux jeunes actifs sans diplôme supérieur. Ceci s'explique par l'importance de la variabilité de leurs séquences d'activités qui est la plus élevée parmi toutes les classes ($S^2 = 53.8$). Concernant les jours de weekend, la performance est faible pour les différentes classes de séquences d'activités (Figure IV.12).

Nous pouvons conclure de cette analyse que la méthode d'attribution de séquences d'activités développées nous permet globalement d'assigner une séquence d'activités aux individus similaire à la leur en se basant seulement sur leurs caractéristiques socio-démographiques. En d'autres termes, ceci implique que les personnes qui appartiennent aux mêmes catégories socio-démographiques, en fonction des variables utilisées, ont des *patterns* d'activités-déplacements assez similaires. Cependant, nous avons vu que cette méthode présente certaines limites qui s'expliquent par la variabilité intra-groupes des *patterns* d'activités et par les limites explicatives des variables sélectionnées (surtout en jours de weekend).

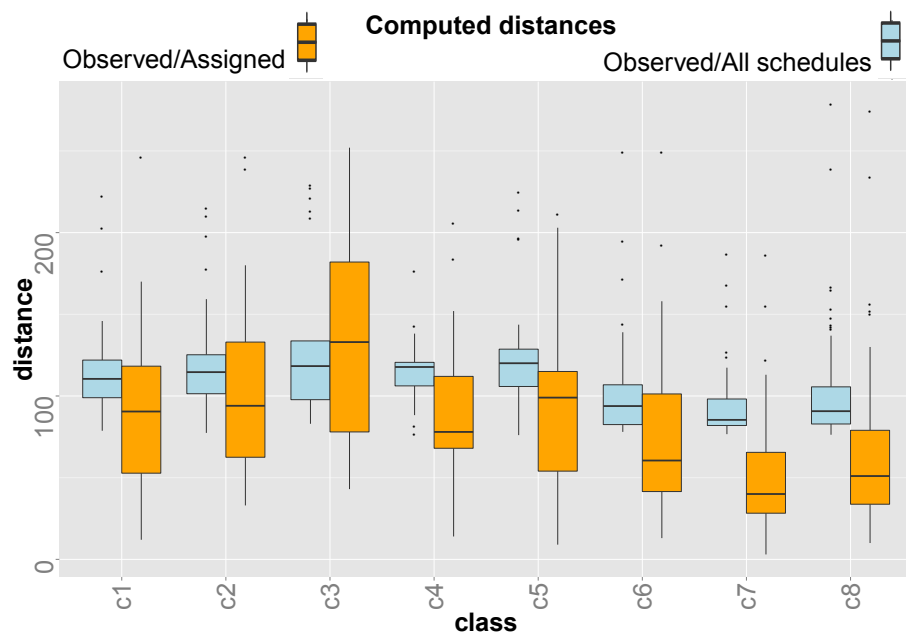


Figure IV.12 Comparaison des $d_{Observed/Assigned}$ et $d_{Observed/All\ sequences}$ par groupe de séquences d'activités en jour de semaine

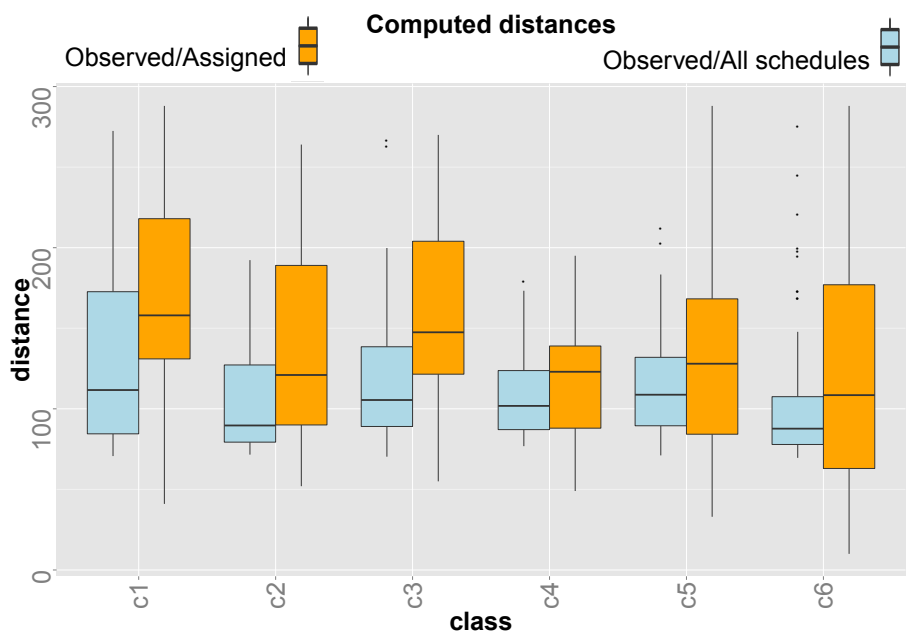


Figure IV.13 Comparaison des $d_{Observed/Assigned}$ et $d_{Observed/All\ sequences}$ par groupe de séquences d'activités en jour de weekend

4 Application du modèle d'attribution d'emplois du temps à la population d'Alès

4.1 Mobilité simulée

L'attribution des séquences d'activités (d'un jour de weekend et un jour de semaine) à la population de la zone d'étude d'Alès permet de simuler les *patterns* de mobilité qui correspondent à la période de l'évènement du 8-9 Septembre 2002. La simulation de la mobilité a généré 737 135 déplacements : 333 453 déplacements le dimanche et 403 682 déplacements le lundi. Le nombre moyen de déplacements par individu est de 3.06 le dimanche et de 3.64 le lundi. Le comptage du trafic routier journalier simulé au niveau des nœuds du réseau routier montre qu'en moyenne les nœuds routiers sont fréquentés par 565 automobilistes le dimanche (max = 54 380) et 863 automobilistes le lundi (max = 77 010).

La distribution spatiale du trafic routier journalier au niveau des nœuds du réseau routier souligne une concentration du trafic autour de la commune d'Alès et particulièrement au niveau des routes principales reliant Alès aux autres grandes villes du Gard (Figures IV.14 et IV.15). Nous observons aussi un effet des bords puisqu'une grande partie des nœuds routiers situés au niveau des limites de la zone d'étude représentent un trafic routier nul. La comparaison du trafic simulé entre les deux journées de dimanche et lundi montre que globalement le trafic est plus important en lundi et que la différence est plus importante au niveau des axes routiers fréquentés pour les mobilités professionnelles (la D910 reliant Saint-Christol-les-Alès à Anduze, la D6110, la N106, la D981, la D904) (Figure IV.16).

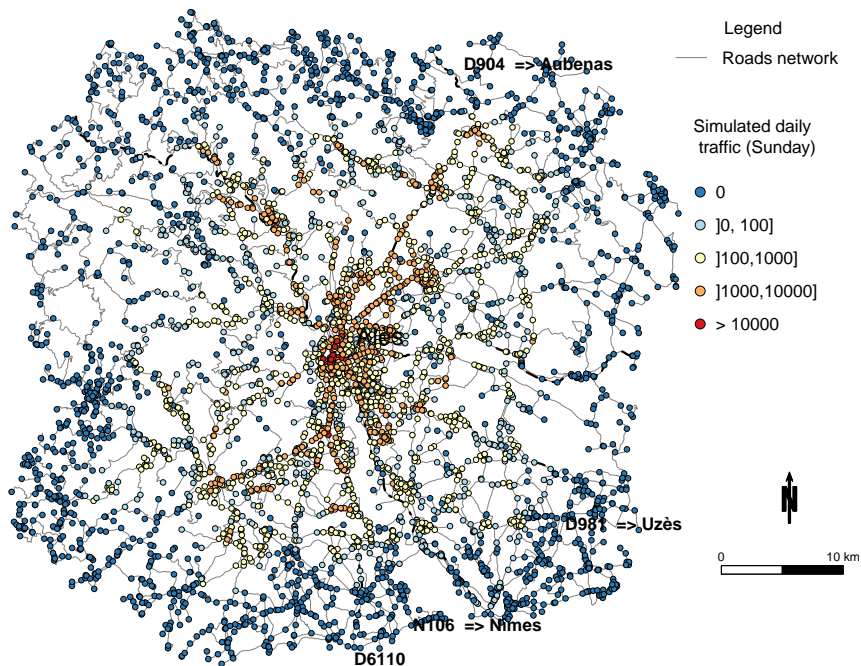


Figure IV.14 Carte du trafic routier journalier simulé pour la journée de dimanche

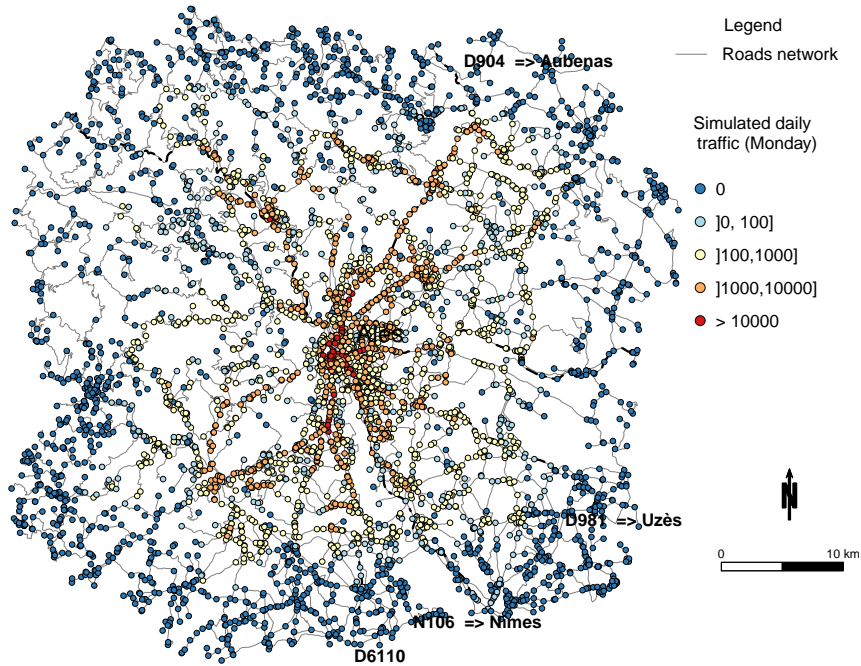


Figure IV.15 Carte du trafic routier journalier simulé pour la journée de lundi

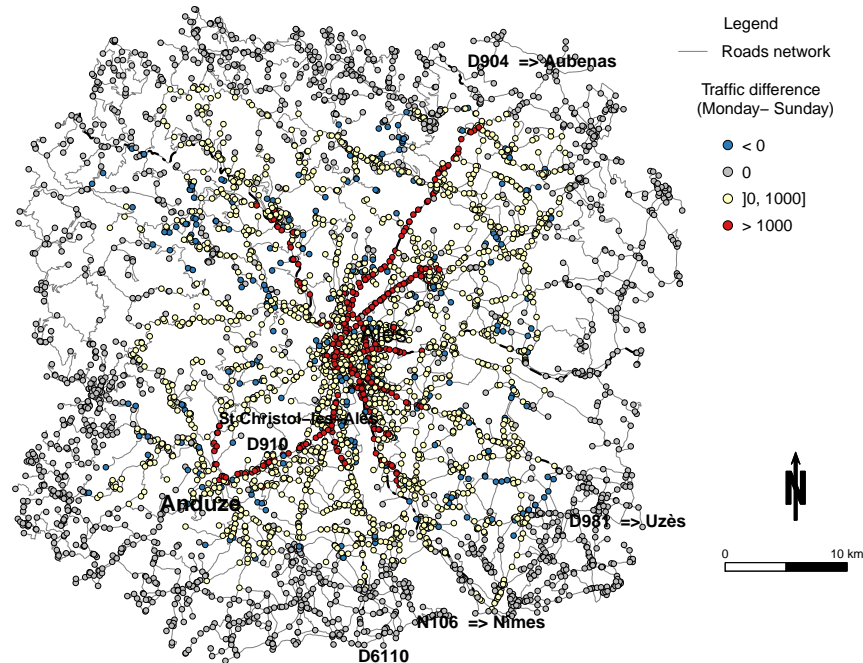


Figure IV.16 Écart du trafic simulé entre la journée du lundi et celle du dimanche

4.2 Évaluation de la mobilité simulée

Deux méthodes d'évaluation des résultats de la simulation des mobilités individuelles sont proposées. La première méthode consiste à comparer les durées des trajets simulés avec les durées des trajets issues des données ENT-D. La deuxième méthode consiste à comparer les flux de trafic simulé au niveau des noeuds routiers avec les données de trafic observé issues des stations SIREDO de comptage routier.

4.2.1 Évaluation des durées des trajets :

Alors que la durée moyenne des trajets motorisés effectués selon les données ENT-D pour l'échantillon de la région Languedoc-Roussillon est de 18mn, nous observons que la durée moyenne des trajets simulés par *MobRISK* est de 3mn. La figure IV.17 représente les distributions des durées des trajets issues des données ENT-D et des simulations de *MobRISK*. La grande différence entre les durées de trajets simulées et observées est liée aux activités secondaires.

La sous-estimation des durées des trajets est potentiellement due à certaines hypothèses utilisées dans la modélisation de la mobilité :

MobRISK comme outil de simulation de la mobilité routière quotidienne : Cas d'étude

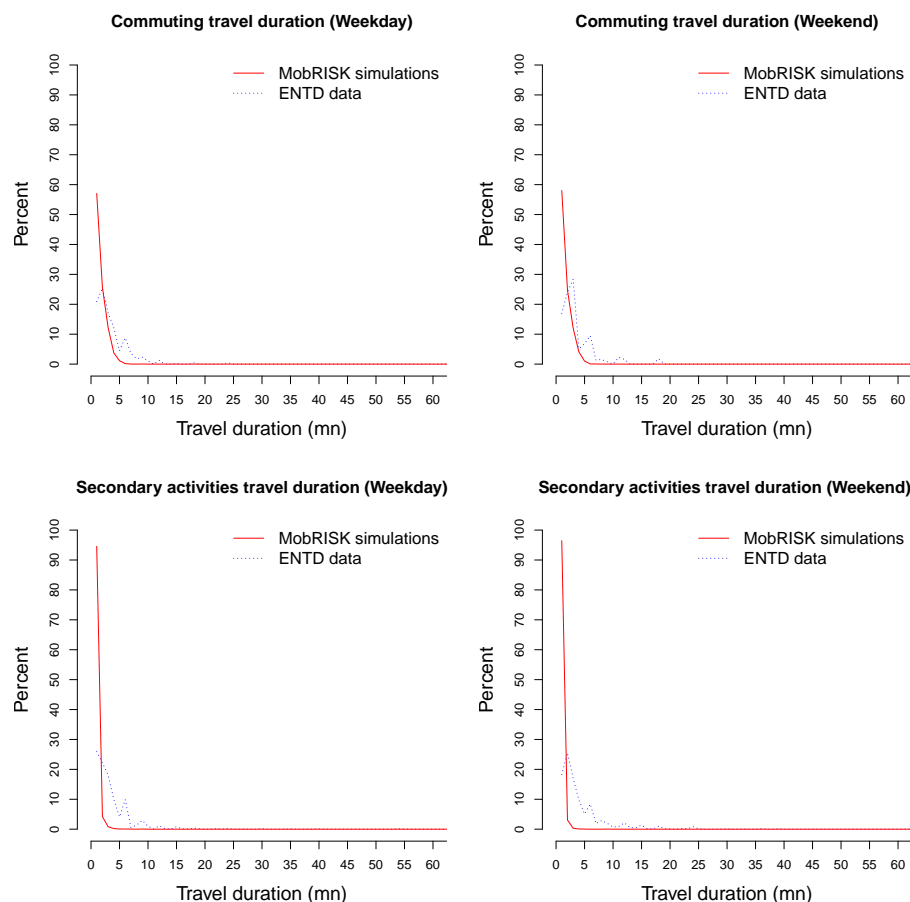


Figure IV.17 Comparaison de durées de trajet selon les motifs de déplacement dans les données ENTD et les simulations de *MobRISK*

- **Règles de choix de route** : Même si le critère de choix du chemin le plus court en temps est considéré comme le critère principal de choix de route, il faut noter que ceci implique une connaissance parfaite du réseau routier par les automobilistes ce qui n'est pas toujours le cas. Abdel-Aty et al. (1997) ont montré que dans certains cas les individus se basent sur d'autres critères dans le choix de leurs itinéraires tels que la minimisation d'intersection et du nombre de route, le choix des routes les plus sûres et les plus habituelles, la prise en compte de la dimension esthétique des paysages traversés et du confort... Il est nécessaire alors de prendre en compte la dimension psychologique dans les règles de choix de route afin de donner un aspect plus réaliste et de réduire le déterminisme du choix du chemin le plus court. Certaines théories, comme l'utilité aléatoire (*Random Utility Theory*) qui consiste à intégrer une variable aléatoire dans le choix des routes, peuvent alors être adoptées pour améliorer le modèle du choix de route (Ben-Akiva and Bierlaire, 1999).

- **La localisation des activités secondaires** : La figure IV.17 montre que la grande différence entre les durées de trajets simulées et observées est liée aux activités secondaires. Ceci est potentiellement dû aux règles utilisées dans la définition des zones d'activités secondaires (dans un rayon de 500 m autour du chef lieu de la commune de résidence) qui ne semblent pas conforme à la réalité.

4.2.2 Évaluation du trafic journalier simulé

La Direction Départementale de l'Équipement (DDE) du Gard a conduit une campagne de mesure du flux routier sur certains axes routiers du département en se basant sur les stations SIREDO. Le recueil des données SIREDO (Système Informatique de REcueil des DONnées) permet d'enregistrer plusieurs informations concernant le trafic sur certains axes principaux du réseau routier. Ces comptages se basent sur des boucles électromagnétiques situées au niveau des chaussées et connectées à un système central de recueil de données décrivant le comptage du nombre de véhicules, leurs longueurs, les vitesses... Parmi ces indicateurs de trafic, on dispose des données du trafic moyen journalier annuel (MJA) qui correspond à l'année de 2002. Nous proposons d'utiliser ces informations afin de comparer le trafic compté par les stations SIREDO sur les axes routiers principaux et le trafic simulé par *MobRISK*. Puisque le trafic dans *MobRISK* est simulé au niveau des nœuds du réseau routier, nous avons identifié ceux qui sont situés sur les axes principaux concernés par les données SIREDO (566 nœuds routiers) (Figure IV.18)².

Afin de pouvoir comparer le trafic simulé avec le trafic observé, nous avons annualisé le trafic simulé en comptant 251 jours ouvrés et 114 jours de weekend et jours fériés (issus du calendrier de l'année de 2002). Ainsi, pour chaque nœud routier appartenant à un axe concerné par le dispositif SIREDO, nous disposons du trafic observé et du trafic simulé. Les données de comptage attestent que le trafic moyen dans les noeuds sélectionnés est de 6 974 véhicules/noeud (Max= 22 300 véhicules/noeud) alors que le trafic moyen simulé à l'aide de *MobRISK* est de 2 195 véhicules/noeud (Max= 15 080 véhicules/noeud). La figure IV.19 montre que le trafic est globalement sous-estimé dans la plupart des noeuds routiers considérés. L'angle de la droite de régression linéaire du trafic simulé par rapport aux données de comptage indique que la sous-estimation est plus importante au niveau des axes routiers les plus fréquentés.

Plusieurs raisons peuvent expliquer la sous estimation du trafic simulé :

- **La délimitation de la zone d'étude** : Le trafic simulé résulte de la mobilité des habitants de la zone d'étude alors que les données de comptage prennent en compte la mobilité des individus qui proviennent des communes en dehors de la zone sélectionnée surtout au niveau des grands axes routiers qui drainent un flux de trafic important entre les grandes villes du

2. Il faut noter que le fait que les données de comptage routier sont collectées au niveau des sections de routes, alors que la simulation du trafic dans *MobRISK* est faite au niveau des noeuds routiers, introduit des biais dans la comparaison de ces deux données.

MobRISK comme outil de simulation de la mobilité routière quotidienne : Cas d'étude

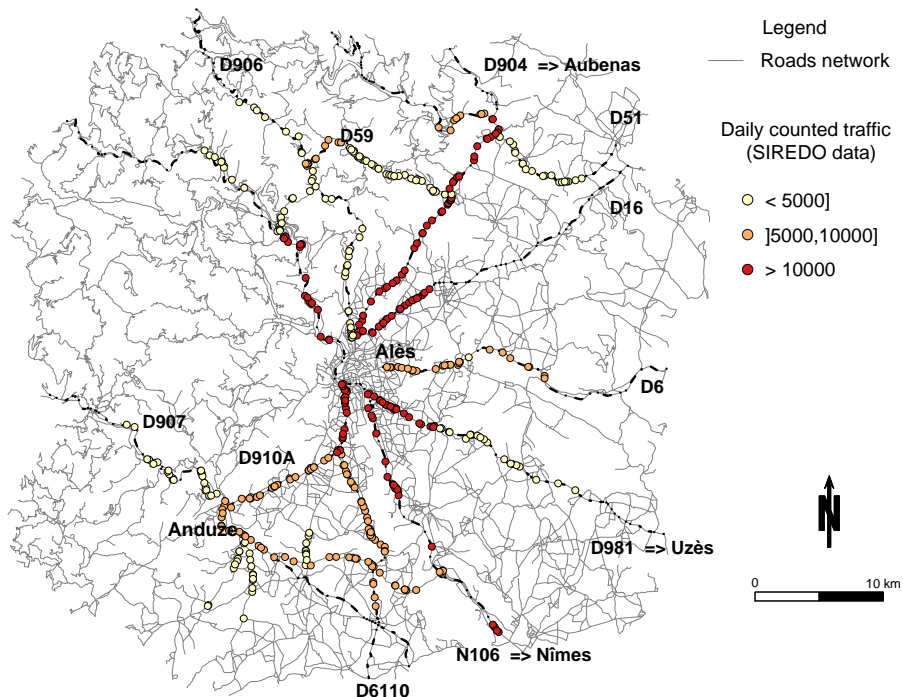


Figure IV.18 Données du comptage du trafic routier SIREDO au niveau des noeuds routiers de la zone d'étude

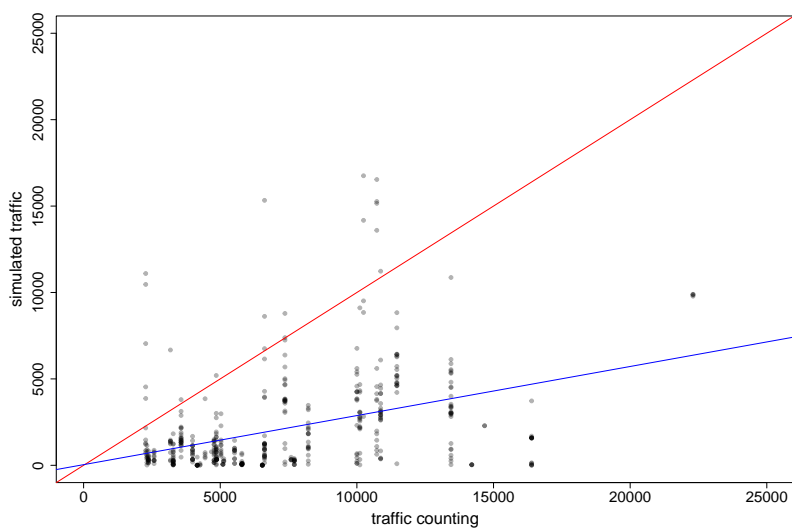


Figure IV.19 Comparaison du trafic simulé avec le trafic observé à partir des données SIREDO au niveau des nœuds routiers situés sur les principaux axes routiers observés. La ligne rouge correspond au modèle parfait représentant un coefficient de corrélation de 1. La ligne bleue correspond à la droite de régression linéaire du trafic simulé par rapport aux données de comptage.

Gard et des départements limitrophes.

- **Types de trafic considérés :** *MobRISK* ne simule pas le trafic lié aux déplacements routiers professionnels (tels que le transport des marchandises) ni le trafic lié aux transports en commun (les taxis et les bus).
- **La définition des zones d'activités :** La délimitation des zones d'activités secondaires à une zone d'un rayon de 500 m autour du chef lieu de la commune de résidence peut aussi potentiellement réduire le trafic au niveau du réseau routier. En effet, agrandir l'étendue spatiale des zones d'activités permet de générer des itinéraires plus longs et donc plus de trafic sur les routes.

5 Conclusions et perspectives

Ce chapitre a présenté l'implémentation du module de simulation des mobilités dans *MobRISK* pour le cas d'étude d'Alès. L'approche utilisée s'appuie sur une adaptation des méthodes d'analyse des séquences dans le but de définir des règles d'attribution de séquences d'activités et de les appliquer aux individus en fonction de leurs caractéristiques socio-démographiques. Les premières analyses ont souligné les effets significatifs des variables socio-démographiques sur les comportements de mobilité issus des données ENT-D. Ensuite, l'application de l'analyse des dissimilarités des séquences d'activités a permis de classer les séquences en fonction des effets des variables socio-démographiques sur leurs dissimilarités. Les analyses des séquences d'activités mettent en évidence quelques résultats principaux :

Les effets des caractéristiques socio-démographiques sur les comportements de mobilité

Les variables socio-démographiques sélectionnées (âge, genre, statut professionnel, profession, niveau d'éducation et nombre d'enfants par ménage) ont des effets significatifs sur les comportements de mobilité en termes de nombre et durée de déplacements, de durée d'activités et de dissimilarités des *patterns* d'activités-déplacements. Ces effets sont plus importants au niveau des mobilités en jours de semaine que celles de weekend.

La classification des séquences d'activités

L'application des méthodes d'analyse de séquences sur les données d'emplois du temps a permis d'explorer les *patterns* de déplacements-activités et d'identifier des classes de séquences d'activités en fonction des effets des variables socio-démographiques sur les dissimilarités entre les séquences. Huit profils d'emplois du temps en jour de semaine et six profils d'emplois du temps en jour de weekend ont été définis. Les résultats de la classification ont permis d'extraire des règles d'attribution de séquences d'activités aux individus en fonction de leurs

***MobRISK* comme outil de simulation de la mobilité routière quotidienne : Cas d'étude**

caractéristiques socio-démographiques.

L'évaluation de la méthode d'attribution des séquences d'activités

L'évaluation de la méthode d'attribution des séquences d'activités a montré que les règles d'attribution de séquences d'activités sont plus performantes pour les jours de semaine que les jours de weekend. Ceci résulte du faible effet des variables socio-démographiques sélectionnées sur les *patterns* de déplacement en jours de weekend.

Certains efforts sont nécessaires afin d'améliorer la méthode d'attribution d'emplois du temps et de mieux évaluer sa performance :

- **Intégration d'autres variables :** Outre les variables socio-démographiques, il est nécessaire d'explorer les effets d'autres variables, tels que le caractère urbain ou rural de la commune résidence, sur les comportements de mobilité afin de mieux expliquer les variabilités entre les individus. Ceci pourrait potentiellement améliorer l'attribution d'emplois du temps de weekend.
- **Les paramètres des coûts :** Même si les paramètres de coûts testés dans cette étude ne semblent pas avoir un effet significatif sur les résultats de l'analyse des dissimilarités entre les séquences, il faudrait tester d'autres matrices de coûts.
- **Méthode d'évaluation :** Le développement des règles d'attribution de séquences d'activités est basé sur seulement une partie des données (70%) afin de pouvoir les évaluer à l'aide de la partie restante. Cette méthode peut introduire quelques biais dus essentiellement à la réduction des données et à l'échantillonnage. Le choix de cette méthode d'évaluation résulte de l'absence d'autres données de mobilité sur le domaine d'étude permettant la comparaison entre les *patterns* attribués et les *patterns* observés. Cependant, des Enquêtes Ménages et Déplacements (EMD) ont été conduites en 2015 dans la zone de Nîmes Métropole. Les données issues de ces enquêtes, une fois disponibles, pourraient être utilisées pour mieux évaluer la méthode d'attribution d'emplois du temps appliquée sur Nîmes.

La dernière partie de cette section était consacrée à la simulation des mobilités individuelles de la population de la zone d'étude pour un jour de weekend et un jour de semaine afin de générer un trafic routier représentatif de la période de l'évènement des dimanche 8 et lundi 9 Septembre 2002. La comparaison des durées des trajets simulés avec celles issues des données ENTD met en évidence la sous-estimation des durées de trajets dans *MobRISK*, qui concerne principalement les trajets à destination d'activités secondaires (achat, loisirs...). Au niveau du trafic, une sous-estimation du trafic moyen journalier annualisé (MJA) simulé au niveau des noeuds routiers par rapport aux données de comptage routier a aussi été soulignée. La sous-estimation du trafic routier est expliquée par l'effet de la délimitation de la zone d'étude,

le critère de choix du chemin le plus court et la non-représentation du trafic spécifique aux activités de transport de marchandises et du transport en commun. Les règles utilisées dans la définition des zones d'activités secondaires ont aussi été pointées comme une source principale de la sous-estimation du trafic routier.

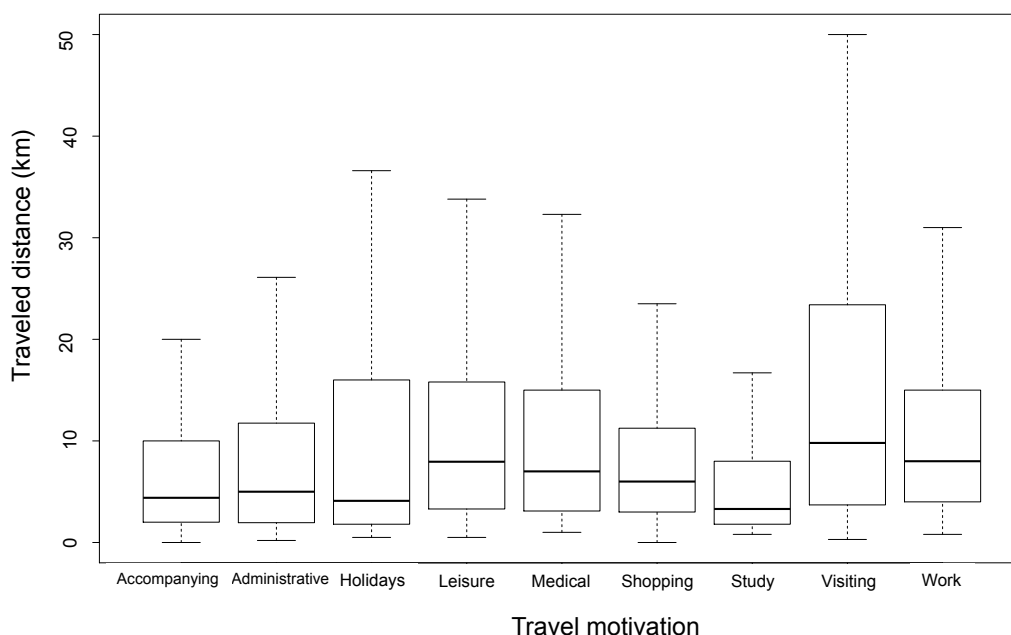


Figure IV.20 Comparaison des distances parcourues selon les motifs de déplacement motorisé issus de l'échantillon régional du Languedoc-Roussillon des données ENTD

La figure IV.20 représente les distributions des distances parcourues par motif de déplacement issues des données ENTD. Alors que, dans *MobRISK* les zones d'activités secondaires s'étendent sur un rayon de 500 m autour de la commune de résidence, les données ENTD montrent que les distances moyennes parcourues pour les déplacements de motifs d'achats, loisirs, accompagnements, visites, administratifs et médicaux sont respectivement 9.3 km, 16.2 km, 8.1 km, 22.7 km, 10.7 km, et 15 km. La prise en compte de ces activités secondaires amène à redéfinir les zones d'activités dans *MobRISK* en se basant sur les analyses des distances parcourues issues des données ENTD et de différencier les différentes activités secondaires afin de pouvoir reproduire le trafic de manière réaliste.

Les distances parcourues semblent dépendre aussi du caractère rural ou urbain de la commune de résidence des individus. La distance moyenne parcourue par les habitants des communes rurales est 16.2 km alors que celle des habitants des communes urbaines est de 13 km. L'effet du type de commune de résidence est particulièrement important pour les déplacements pour motifs administratifs et de soins médicaux. Les habitants des communes rurales parcourent en moyenne 9 km de plus pour les déplacements liés à des

***MobRISK* comme outil de simulation de la mobilité routière quotidienne : Cas d'étude**

motifs administratifs et 14.2 km de plus pour les déplacements médicaux (Table IV.7). Ceci est principalement dû au manque d'équipements administratifs et de santé dans les communes rurales. La définition des zones d'activités des individus doit alors prendre en compte cette distinction en fonction du type de commune de résidence.

Table IV.7 Effets du type de commune de résidence sur les distances parcourues en fonction des motifs des déplacements

Motifs de déplacements	Distances moyennes parcourues (km)	
	Communes rurales	Communes urbaines
Travail	15.2	12.7
Étude	7.6	6.1
Vacances	20	22
Loisirs	16.7	16.6
Accompagnements	12	14
Visites	23.7	21.4
Procédures administratives	16.5	7.5
Soins médicaux	23	8.8
Achats	11	7.7
Global	16.2	13

6 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'implémentation du modèle *MobRISK* afin de simuler les mobilités quotidiennes correspondant au cas d'étude sélectionné.

Nous avons décrit le développement d'une méthode d'attribution de programmes d'activités à la population de la zone d'étude à partir des données issues des enquêtes ENTD administrées à l'échelle de la région Languedoc-Roussillon. Ceci nous a permis d'explorer les potentialités des techniques d'analyse des séquences pour identifier des règles d'attribution de programmes d'activités en fonction des caractéristiques socio-démographiques des individus et de discuter les limites de cette méthode. Ensuite, l'attribution de programmes d'activités a permis d'utiliser le module de simulation de la mobilité, intégré dans *MobRISK*, afin de quantifier le trafic routier au niveau de la zone d'étude pour une période similaire à celle de l'évènement de crue rapide de 2002 (un jour de weekend et un jour de semaine). L'évaluation du trafic simulé, en fonction des durées de trajet et du débit de trafic enregistré au niveau des noeuds routiers, indique globalement une sous-estimation du trafic liée aux hypothèses et paramètres introduites dans le modèle. Des pistes d'amélioration de cette partie du modèle ont été explorées.

La simulation de la mobilité quotidienne dans notre thèse est utilisée dans l'objectif d'évaluer l'exposition des automobilistes aux submersions des routes. Ceci explique des choix de simplification dans la modélisation "*activity-based*" (attribution de programmes d'activités au lieu de les simuler, définition arbitraire des zones d'activités secondaires). Ces choix peuvent potentiellement générer des biais dans la simulation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes, qui doivent être prises en considération dans l'interprétation des résultats.

Chapitre V

MobRISK comme outil de simulation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes : Cas d'étude

Ce chapitre présente l'application du modèle *MobRISK* afin de simuler l'exposition des automobilistes aux submersions des routes dans la zone d'étude et pour l'évènement de crue rapide des 8-9 Septembre 2002. Les résultats présentés dans cette première application n'intègrent pas le modèle de décision et les capacités des individus à adapter leurs comportements de mobilité face à l'évènement. Cette simulation considère donc l'exposition "maximale", c'est à dire lorsque les individus poursuivent leurs programmes d'activités et déplacements normalement sans prise en compte du risque.

Les objectifs principaux de cette première application consistent à :

- Mesurer l'exposition des automobilistes résidant dans le domaine d'étude aux submersions des routes dues à l'évènement des 8-9 Septembre 2002.
- Caractériser les dynamiques spatio-temporelles de l'exposition aux submersions des routes.
- Identifier les profils socio-démographiques des personnes les plus exposées aux submersions des routes.

1 Introduction

Nous avons présenté dans le chapitre précédent les résultats de la simulation des mobilités routières individuelles de la population de la zone d'étude pour un jour de semaine et un jour de weekend. Le choix de cette fenêtre temporelle permet d'obtenir des comportements de mobilité similaires à la période de l'évènement de crue rapide étudié qui a eu lieu un dimanche et un lundi. La simulation à événements discrets (DES) implémentée dans *MobRISK* permet de simuler les déplacements individuels au niveau des nœuds routiers. Afin d'identifier les points de coupure traversés par les automobilistes durant la période de l'évènement, les 738 points de coupure (identifiés dans la zone d'étude) ont été intégrés dans le graphe du réseau routier de la zone d'étude qui contient 3 900 nœuds routiers. Ceci permet de quantifier le trafic routier au niveau des points de coupure et d'identifier leurs niveaux de submersion quand ils sont traversés par les automobilistes.

L'analyse de la simulation de l'exposition des automobilistes permet de répondre à deux objectifs principaux :

i) Caractériser les dynamiques spatio-temporelles de l'exposition en intégrant les dynamiques sociales liées à la mobilité quotidienne et les dynamiques physiques liées à la submersion des routes dues aux réponses hydrologiques des bassins versants. On essaie alors de localiser les points de coupure qui ont présenté le plus de danger du fait de la coïncidence d'un trafic important et d'un risque de submersion élevé. Du point de vue "temporel", on essaiera d'identifier les périodes ou fenêtres temporelles où le risque pour les automobilistes traversant des points de coupure était le plus élevé.

ii) Explorer les effets des caractéristiques socio-démographiques sur l'exposition individuelle en identifiant les profils socio-démographiques des automobilistes les plus exposés de par leurs *patterns* de mobilité.

Cette section est organisée comme suit. La première partie est consacrée à l'étude des dynamiques spatio-temporelles de l'exposition des automobilistes. Tout d'abord, les résultats de la quantification du trafic routier au niveau des points de coupure sans prendre en compte les niveaux de submersions des routes seront présentés. Ceci permet de localiser les points de coupure les plus fréquentés et d'explorer la temporalité du trafic au niveau des points de coupure. Ensuite, nous étudierons les dynamiques de submersion des points de coupure en intégrant les classes de sensibilité et les débits simulés dans les rivières. Enfin, nous présenterons la construction d'un indice qui permet de mesurer le nombre d'automobilistes pouvant se retrouver en situation de danger du fait d'un niveau de submersion important des points de coupure qu'ils traversent. La deuxième partie est consacrée à l'évaluation des effets

des caractéristiques socio-démographiques sur l'exposition aux submersions des routes.

2 Dynamiques spatio-temporelles de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes

2.1 Simulation du trafic aux points de coupure

Une première méthode pour estimer l'exposition des automobilistes aux submersions des routes lors de l'évènement de 2002 consiste à quantifier le trafic routier simulé au niveau des points de coupure identifiés dans la zone d'étude. Les résultats montrent que le trafic au niveau des points de coupure, cumulé sur la période de l'évènement, est de 512 854 personnes et que les automobilistes sont principalement exposés à des points de coupure de sensibilité très faible (Table V.1). De plus, nous observons que le trafic routier simulé est important au niveau des points de coupure de sensibilité moyenne qui ne représentent pourtant que 10% du nombre total des points de coupure.

Table V.1 Quantification du trafic routier simulé au niveau des points de coupure (*pc*) pendant la période de l'évènement

Niveaux de sensibilité des <i>pc</i>	Nombre de <i>pc</i>	Pourcentage des <i>pc</i> par classe de sensibilité	Trafic routier simulé au niveau des <i>pc</i>	Pourcentage du trafic routier simulé
Très faible S_0	523	71%	327 603	63.88%
Faible S_1	103	14%	81 488	15.89%
Moyenne S_2	75	10%	98 021	19.11%
Élevée S_3	37	5%	5 742	1.12%
Total	738	100%	512 854	100%

La distribution spatiale du trafic routier dans les points de coupure montre une concentration de l'exposition au niveau des axes routiers principaux qui relie la commune d'Alès aux autres grandes communes du Gard : *D6110*, *D981*, *D904* et *N106* (Figure. V.1). Le nombre d'automobilistes exposés dépassent 10 000 individus à certains points de coupure. La figure V.2 représente la dynamique temporelle du trafic routier simulé aux points de coupure. On peut identifier deux pics d'exposition le dimanche à 10h et à 16h où le nombre d'automobilistes traversant des points de coupure par heure dépasse 25 000 individus. Concernant le lundi, trois pics d'exposition apparaissent à 7h, 13h et 17h qui correspondent essentiellement aux horaires des mobilités professionnelles et scolaires (le nombre d'automobilistes exposés aux coupures des routes atteint 40 000 automobilistes/h).

MobRISK comme outil de simulation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes : Cas d'étude

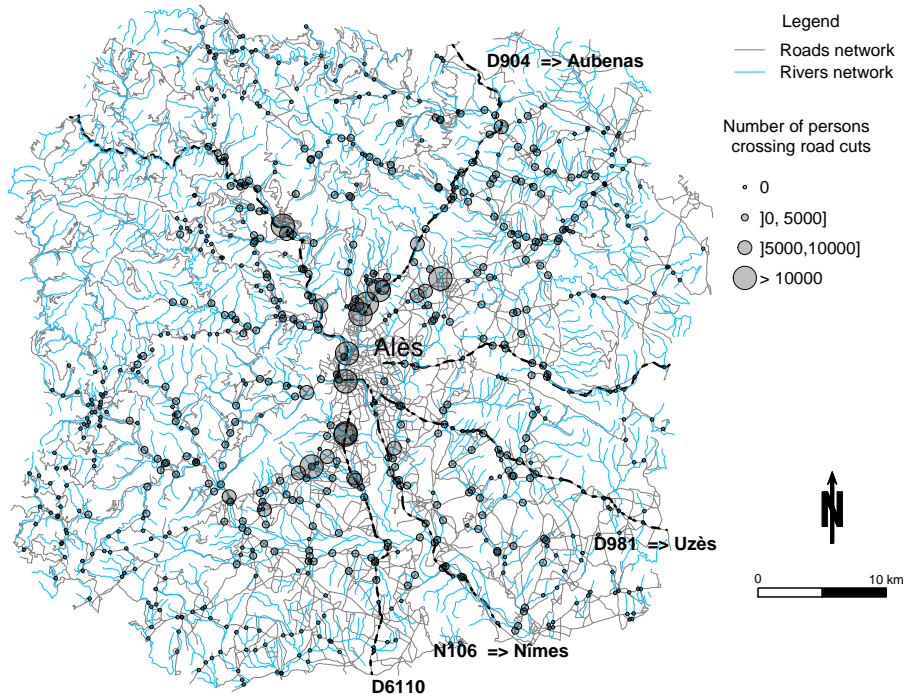


Figure V.1 Simulation du trafic routier aux points de coupe

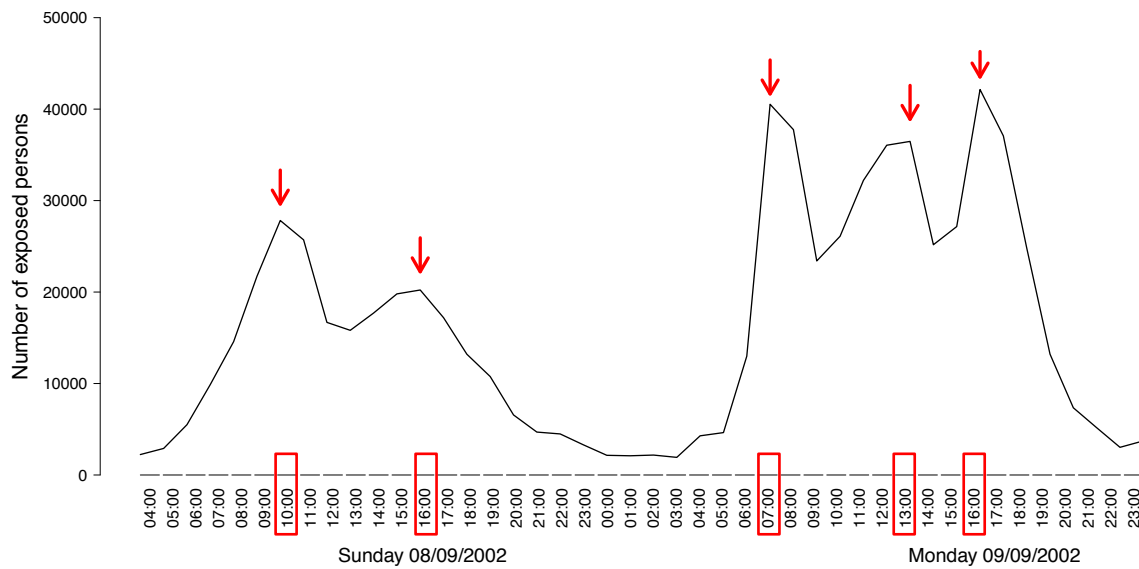


Figure V.2 Dynamique temporelle du trafic routier aux points de coupe

2.1.1 Simulation de la submersion des routes pendant l'évènement de 2002

Comme indiqué dans la section 3.2.6 du chapitre III, nous disposons de données décrivant les probabilités de submersion des routes obtenues en croisant les débits simulés au niveau des points de coupure et les niveaux de sensibilités de ces points. Nous constatons que la période qui représente un risque élevé de submersion a eu lieu entre le dimanche 8 septembre à 21h et le lundi 9 septembre à 6h (Figure V.3). En effet, cette période correspond à la réaction des bassins versants à la deuxième phase de l'évènement météorologique (Delrieu et al., 2005). En se basant sur la temporalité du trafic simulé au niveau des points de coupure, cette phase est celle qui compte le moins d'automobilistes traversant des points de coupure. Ainsi, le décalage temporel entre le risque de submersion des routes et le trafic routier a potentiellement réduit les accidents associés à la mobilité routière.



Figure V.3 Dynamique temporelle des niveaux de probabilités de submersion des points de coupure

2.1.2 Coïncidence entre dynamiques des mobilités et des submersions aux points de coupure

La superposition des dynamiques temporelles du trafic simulé au niveau des points de coupure et du risque de submersion des routes a permis d'observer un décalage entre les pics d'exposition et les pics du risque hydro-météorologique (Figure V.3). Afin de mieux caractériser l'exposition des automobilistes, nous avons construit un indice qui permet de quantifier le nombre de personnes qui sont significativement en danger en combinant le risque hydrologique (représenté par les probabilités de submersion) et l'exposition sociale (représentée par le trafic simulé aux points de coupure). Le développement de cet indice

***MobRISK* comme outil de simulation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes : Cas d'étude**

consiste à pondérer le nombre d'automobilistes qui traversent les points de coupure par la probabilité de submersion de ces points (Équation V.1).

$$N(Ind_{Endanger})_{pc,t} = \sum_i^{n_{pc}} P(submersion)_{pc,t} * N(Ind_{exposés})_{pc,t} \quad (V.1)$$

La figure V.3 représente l'évolution du nombre de personnes potentiellement en danger sur des routes inondées lors de l'évènement de 2002. La période caractérisée par le plus grand nombre de personnes en danger élevé s'étend du 5h à 11h le lundi 9 septembre incluant un pic de danger à 7h avec plus que 1 500 automobilistes concernés. Nous remarquons que la combinaison du risque hydrologique avec l'exposition sociale permet d'identifier des *patterns* de danger différents de ceux obtenus en regardant indépendamment les dimensions sociales et physiques du risque.

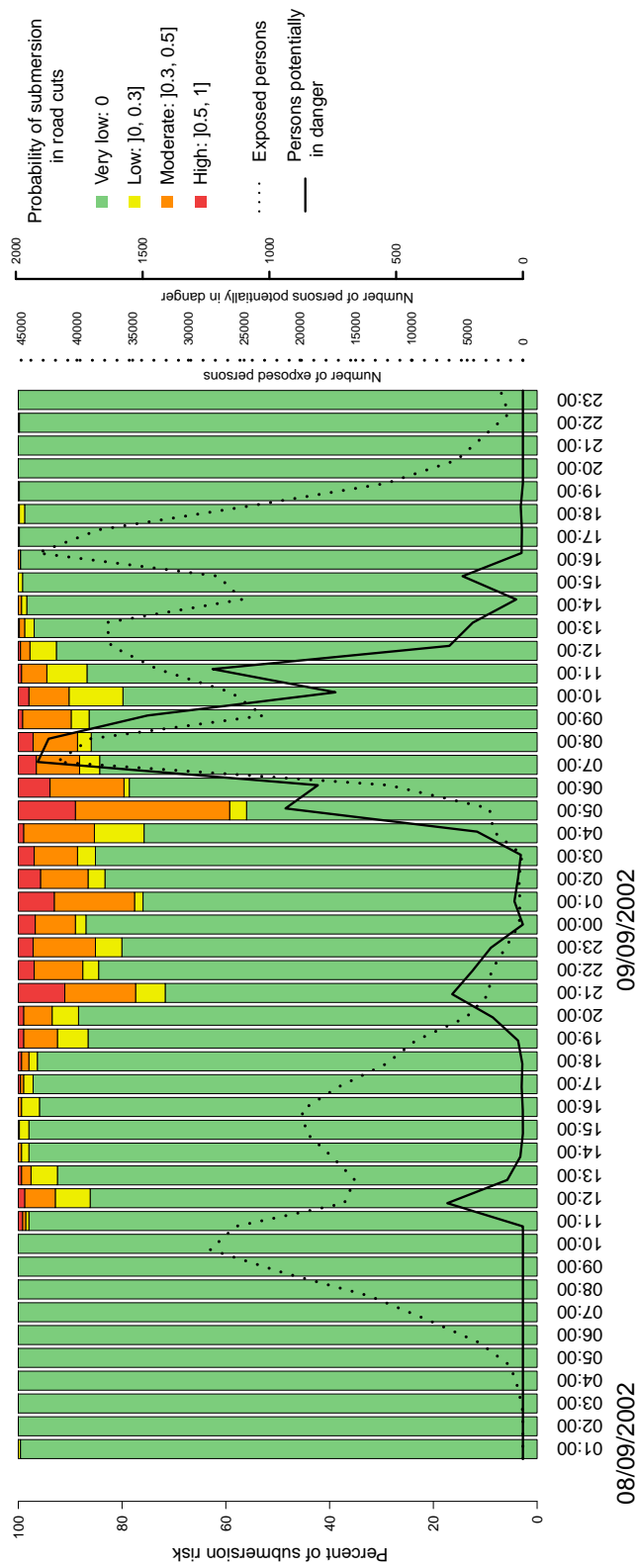


Figure V.4 Dynamique de l'exposition aux submersions des routes : les barres colorées représentent les classes de probabilités de submersion des routes, la courbe en pointillé représente le trafic simulé au niveau des points de coupure et la courbe en ligne continue représente l'indice développé qui permet de mesurer le nombre d'automobilistes potentiellement face aux dangers de submersion.

MobRISK comme outil de simulation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes : Cas d'étude

La figure V.5 représente la distribution spatiale de l'indice proposé, mesurant le nombre cumulé d'automobilistes potentiellement en danger sur les deux jours de l'évènement hydro-météorologique. Nous remarquons que la majorité des points de coupures qui représentent un potentiel danger en terme de coïncidence entre trafic routier et risque de submersion sont localisés autour de la commune d'Alès. La moyenne du nombre d'automobilistes potentiellement en danger est de 15 automobilistes par point de coupure sur la durée de l'évènement. Comme mentionné dans la section 4.2.4, une seule victime a été enregistrée dans la zone d'étude. La géolocalisation de l'accident, d'après les données de Ruin et al. (2008), montre que celui-ci a eu lieu au niveau d'un point de coupure représentant un indice de danger très élevé $N(Ind_{Endanger} = 162)$.

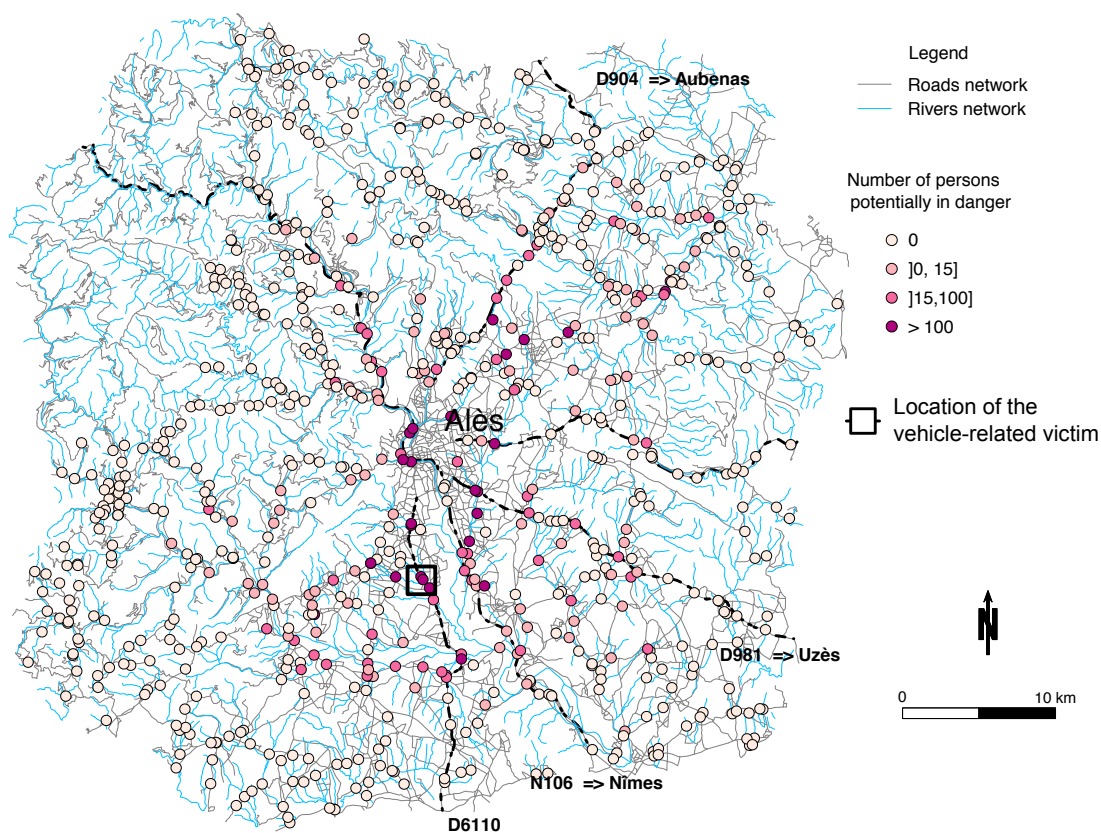


Figure V.5 Distribution spatiale de l'indice représentant le nombre d'automobilistes en danger potentiel cumulé sur la période de l'évènement

3 Effets des caractéristiques socio-démographiques sur le niveau d'exposition

3.1 Méthode de mesure de l'exposition individuelle

Les résultats précédents ont permis de caractériser les dynamiques spatio-temporelles de l'exposition des automobilistes en prenant en compte les mobilités routières individuelles et les dynamiques de submersion des routes. Les caractéristiques socio-démographiques ayant un effet significatif sur les comportements de mobilité, nous essayons dans cette section d'explorer leurs effets sur le niveau d'exposition. Le modèle *MobRISK* permet de mesurer l'exposition individuelle en fonction des probabilités de submersion des points de coupure au moment où ils sont traversés par chaque automobiliste. L'exposition individuelle est définie comme "la probabilité qu'un automobiliste traverse un point de coupure submergé sur les itinéraires parcourus durant la période de l'évènement". Puisque les automobilistes sont susceptibles de traverser plus qu'un point de coupure, l'exposition totale est mesurée en fonction de la probabilité jointe de submersion au niveau de tous les points de coupure traversés sur un itinéraire donné. Nous proposons alors de mesurer, pour chaque automobiliste, la probabilité que tous les points de coupure traversés ne soient pas submergés. La probabilité complémentaire permet ainsi d'estimer l'exposition (Équation V.2).

$$Exposure(ind) = 1 - \prod_k (1 - P(Sub_k)) \quad (V.2)$$

Une illustration du calcul de l'exposition individuelle en fonction des probabilités de submersion des points de coupure traversés est présentée dans la figure V.6. Prenons l'exemple d'un automobiliste qui a traversé trois points de coupure rc_i avec les probabilités de submersion suivantes au moment où il les a traversés : $P(Sub_{rc1}) = 0.8$, $P(Sub_{rc2}) = 0.4$ et $P(Sub_{rc3}) = 0.5$. L'exposition totale de l'automobiliste peut être représentée sous la forme d'un arbre de probabilité où les nœuds réfèrent aux points de coupure traversés et les arcs réfèrent aux probabilités de submersion au niveau de ces points. Tout d'abord, on calcule la probabilité que tous les points de coupure traversés ne soient pas submergés $P(\overline{Sub_{rc_i}})$. Ceci correspond au produit des probabilités de non-submersion dans tous les points de coupure traversés comme indiqué dans l'équation V.3. En retenant l'hypothèse de l'indépendance entre les évènements de submersion des points de coupure, la probabilité que l'automobiliste rencontre au moins une route submergée correspondrait alors à la probabilité complémentaire de $P(\overline{Sub_{rc_i}})$ (Équation. V.3)¹.

1. Un rappel des concepts de probabilités utilisés (probabilité complémentaire, arbre de probabilité...) est disponible dans l'annexe A

$$\begin{aligned}
 P(\overline{Sub_{rc_i}}) &= (1 - P(Sub_{rc1})) * (1 - P(Sub_{rc2})) * (1 - P(Sub_{rc3})) \\
 &= 0.06 \\
 P(Sub_{rc_i}) &= 1 - P(\overline{Sub_{rc_i}}) \\
 &= 0.94
 \end{aligned}$$

(V.3)

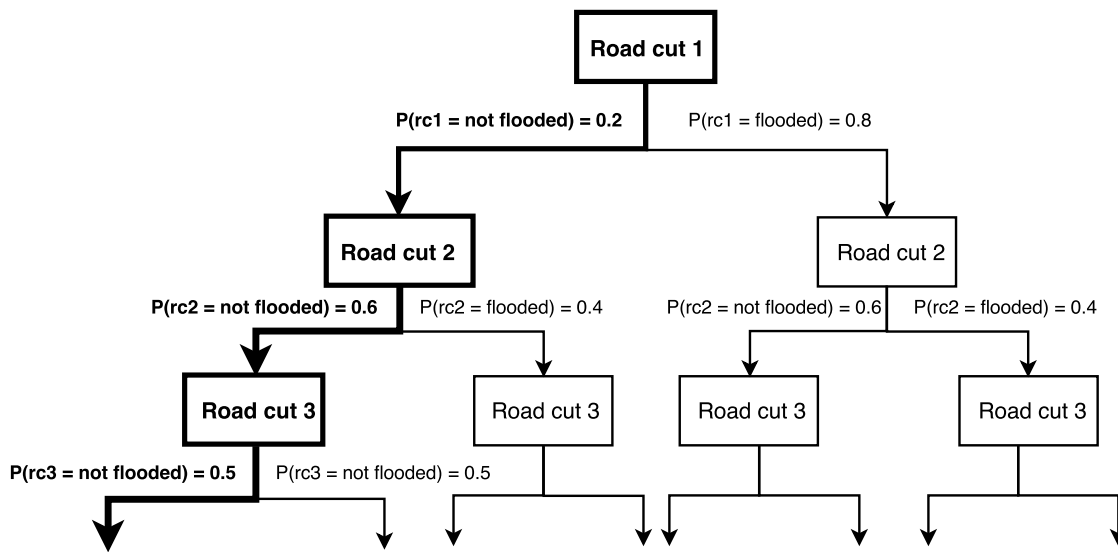


Figure V.6 Illustration d'un arbre de probabilités pour calculer l'exposition individuelle

3.2 Résultats

Les résultats obtenus montrent que l'exposition moyenne durant la période de l'évènement est de 0.17. Nous constatons que 75% des automobilistes ont une exposition nulle et que le niveau d'exposition varie significativement en fonction des caractéristiques socio-démographiques. La table V.2 indique les valeurs d'expositions moyennes selon les variables suivantes : genre, âge, statut professionnel et profession. Les résultats montrent que les hommes sont plus exposés que les femmes ($Exposition_{homme} = 0.18$; $Exposition_{femme} = 0.15$). La catégorie d'âge de 29 à 45 ans semblent être la plus exposée ($Exposition_{29-45} = 0.23$) alors que l'exposition moyenne des personnes âgées de plus de 60 ans est de 0.11. En terme de statut professionnel, l'exposition est très élevée chez les actifs ($Exposition_{Actifs} = 0.28$) alors que les chômeurs et les retraités ont une probabilité de rencontrer des routes submergées de 0.10. Enfin, l'exposition des actifs varie en fonction de leurs professions puisque la catégorie

des cadres et des personnes ayant des professions intellectuelles supérieures semble plus exposée aux submersions des routes que les agriculteurs par exemple ($Exposition_{Cadres} = 0.28$; $Exposition_{Agriculteurs} = 0.16$).

Table V.2 Description des caractéristiques socio-démographiques de la population de la zone d'étude

Variables	Modalités	Exposition moyenne
Genre	Homme	0.18
	Femme	0.15
Age	< 18 ans	0.14
	[18, 28] ans	0.21
	[29, 45] ans	0.23
	[46, 60] ans	0.20
	> 60 ans	0.11
Statut professionnel	Actif	0.28
	Étudiant/ Élève	0.22
	Chômeur	0.10
	Retraité	0.10
	Homme/femme au foyer	0.09
	Autre situation	0.12
Profession	Agriculteurs exploitants	0.16
	Artisans, commerçants et chefs d'entreprise	0.21
	Cadres et fonctions intellectuelles supérieures	0.28
	Techniciens et professions intermédiaires	0.22
	Employés administratifs	0.27
	Ouvriers	0.27
	Retraités	0.10
	Inactifs n'ayant jamais travaillé	0.13

Nous avons effectué un test statistique d'analyse de variance afin d'évaluer la significativité statistique des liens entre des variables socio-démographiques sélectionnées et le niveau d'exposition. Les résultats présentés dans la table V.3 indiquent que les quatre variables sélectionnées ont des effets significatifs et que le statut professionnel semble être la variable la plus discriminante (la statistique F est la plus élevée : $F(5, 32633) = 366.9$)².

Table V.3 Résultats de l'analyse de variance de l'exposition en fonction des variables socio-démographiques (* Niveau de significativité : $p < .1$; ** Niveau de significativité : $p < .05$; *** Niveau de significativité : $p < .01$.)

Variables	F	p-value
Genre	$F(1, 32637) = 48.03$	0.00***
Age	$F(4, 32634) = 166.5$	0.00***
Statut professionnel	$F(5, 32633) = 366.9$	0.00***
Profession	$F(7, 32631) = 174.6$	0.00***

2. Les détails concernant le fonctionnement de l'ANOVA sont disponibles dans l'encadré "ANOVA" de la section 2.3 du chapitre IV

MobRISK comme outil de simulation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes : Cas d'étude

Afin d'identifier des classes socio-démographiques d'individus en fonction de leurs niveaux d'exposition, nous avons dressé une classification par arbre de régression qui permet de partitionner la population en fonction des effets des variables socio-démographiques sur l'exposition aux submersions routières. Cette technique consiste à regrouper tous les individus dans un premier noeud et de les partitionner en fonction de la variable socio-démographique qui explique le plus de variance du niveau d'exposition en identifiant les groupes les plus homogènes et l'exposition moyenne au niveau de chaque groupe (en utilisant le test d'ANOVA). Cette opération est répétée de manière récursive sur chaque groupe d'individus jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'effet significatif des variables socio-démographique sur le niveau d'exposition. La figure V.7 illustre les résultats obtenus à partir de l'analyse par arbre de régression. Nous identifions quatre principaux profils socio-démographiques de personnes exposées :

- Les femmes/hommes au foyer, les retraités et les chômeurs sont les personnes les moins exposées (Exposition moyenne = 0.11)
- Les étudiants/élèves et les actifs exerçant ces professions : artisans, commerçants, agriculteurs et employés administratifs (Exposition moyenne = 0.24)
- Les actifs de sexe féminin et exerçant l'une de ces professions : techniciens et professions intermédiaires, ouvriers et cadres (Exposition moyenne = 0.27)
- Les actifs de sexe masculin et exerçant l'une de ces professions : techniciens et professions intermédiaires, ouvriers et cadres (Exposition moyenne = 0.33)

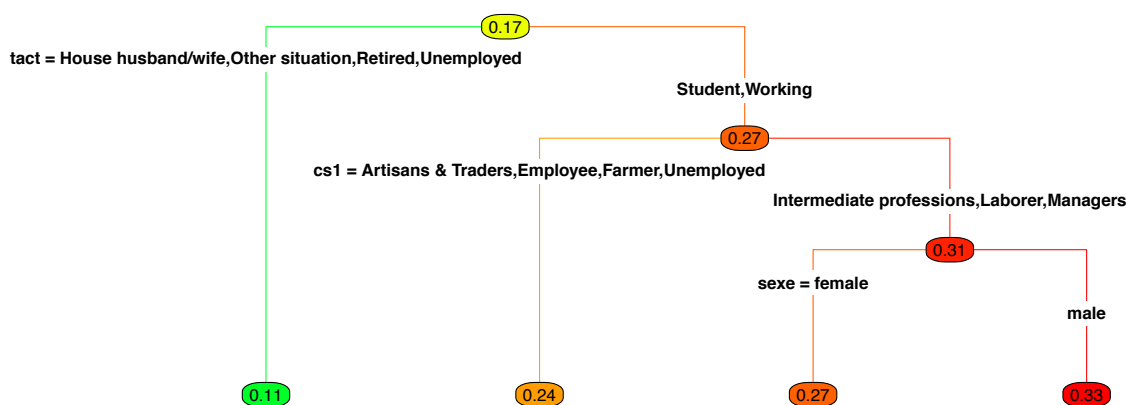


Figure V.7 Classification des individus en fonction des effets des variables socio-démographiques sur le niveau d'exposition.

4 Conclusion et perspectives

Les résultats de l'application de *MobRISK* dans le cas d'étude d'Alès soulignent l'importance de croiser les dynamiques sociales et physiques pour mieux caractériser et évaluer l'exposition des automobilistes aux crues rapides. La construction d'un indice de danger qui combine le trafic simulé et les probabilités de submersion au niveau des points de coupure a permis de localiser les routes qui ont présenté le plus de danger pour les automobilistes lors de l'évènement des 8 et 9 Septembre 2002. La seule observation d'accident meurtrier lié à cet évènement sur notre zone d'étude se trouve bien sur une section de route identifiée comme très dangereuse à partir des résultats de simulation. Ce résultat encourageant montre une certaine cohérence de l'indice développé. Cependant, plus d'efforts sont nécessaires dans la collecte des données d'impacts et d'accidents liés aux submersions des routes afin de mieux évaluer et essayer de valider l'indice proposé. En effet, vu l'importance de l'évènement étudié, plusieurs campagnes de retour d'expérience ont été effectuées par les hydrologues pour comprendre les processus hydrologiques en jeu (Gaume et al., 2003). Les données collectées sont exploitées pour la calibration et l'évaluation des modèles hydrologiques et pour caractériser les dynamiques hydro-météorologiques de cet évènement. Cependant, il est aussi nécessaire de coupler ces données avec les impacts humains pour mieux comprendre ces phénomènes. Depuis peu, des efforts sont fournis dans la mise en place de campagnes de retour d'expérience socio-hydro-météorologique. Ceci a permis, par exemple, d'étudier l'évènement de crue rapide qui a eu lieu dans le Var le 15 Juin 2010 et qui a causé 26 victimes (dont 13 personnes piégées dans leur véhicule). Une équipe composée d'hydrologues, géographes et psychologues a effectué des enquêtes de retour d'expérience en collectant des données sociales et hydrologiques (Ruin et al., 2014). Les données collectées à l'aide d'une grille d'entretien, développée spécialement dans l'objectif de comprendre les réactions mises en oeuvre pour faire face à l'évolution rapide des circonstances hydro-météorologiques ont mis en évidence l'avantage de coupler l'observation des processus physiques et sociaux afin de mieux reconstituer l'exposition aux crues rapides. Des efforts systématiques de la collecte de ce type d'information dans le but de construire une base de données d'impacts sociaux s'inscrivent depuis quelques années dans le cadre du programme de recherche HYMEX qui vise à améliorer la compréhension et la modélisation du cycle de l'eau en Méditerranée (Llasat et al., 2013). Le développement d'une telle base de données à l'échelle de la Méditerranée devrait permettre de mieux évaluer les résultats obtenus à partir des simulations de l'exposition implémentées avec le modèle *MobRISK*.

Outre l'étude des dynamiques spatio-temporelles de l'exposition, nous avons mesuré l'exposition individuelle définie comme la probabilité de traverser une section de route submergée. Ceci nous permet essentiellement d'explorer les relations entre les caractéristiques socio-démographiques et l'exposition aux crues rapides qui a fait l'objet de nombreuses études (Llasat et al., 2013; Ruin, 2007; Terti et al., 2015). Les résultats obtenus ont souligné la

***MobRISK* comme outil de simulation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes : Cas d'étude**

sur-exposition des actifs d'âge moyen à ce type de phénomène. Ces résultats mettent en évidence l'importance de prendre en considération la mobilité individuelle dans l'évaluation de l'exposition sociale aux crues rapides. En effet, dans la plupart des travaux antérieurs sur l'exposition sociale, les individus sont localisés au niveau de leurs lieux de résidence. Par conséquent, l'exposition des individus qui sont sur les routes et dans les différents autres lieux d'activités n'est pas prise en compte. Certes les données d'emplois du temps montrent que les populations passent une part non-négligeable de leur temps à domicile (le pourcentage du temps passé à domicile concernant l'échantillon sélectionné de la région Languedoc-Roussillon à partir des données ENT-D est de 70%). Cependant, les individus semblent être plus vulnérables quand ils se retrouvent dans un lieu autre que leur domicile et plus particulièrement sur les routes (Ruin, 2007; Terti et al., 2015). Ceci explique la nécessité d'intégrer la mobilité quotidienne dans l'évaluation de l'exposition sociale.

Cependant, la définition de l'exposition utilisée dans ce travail se restreint au calcul de la probabilité de traverser une route submergée. Plus d'efforts sont nécessaires pour mieux caractériser le risque associé à la submersion des automobilistes en intégrant par exemple la hauteur et le débit d'eau sur les routes. Ceci exige une connaissance plus détaillée des interactions entre les caractéristiques géomorphologiques des routes et les débits. De plus, la connaissance de la distribution des hauteurs d'eau lors d'évènements hydro-météorologiques permettrait d'étendre la mesure de l'exposition dans *MobRISK* en incluant l'exposition des individus dans les différents lieux d'activités.

Vers l'intégration des décisions d'adaptation des comportements de mobilité

Comme nous l'avons précisé au début de ce chapitre, les résultats présentés ici correspondent à une version du modèle qui n'intègre pas le modèle de décision et les possibles modifications que les individus peuvent apporter à leur mobilité face à l'évènement (version 2.0 de *MobRISK*). En effet, ceci peut être interprété comme si les automobilistes étaient indifférents vis à vis des perturbations hydro-météorologiques. L'intégration du modèle de décision fait l'objet du chapitre suivant. Celui-ci nous permettra d'évaluer les effets de différents comportements et décisions sur l'exposition des automobilistes aux submersions des routes en se basant sur la méthode présentée ici dans la quantification de cette exposition.

Chapitre VI

MobRISK comme outil de simulation des comportements d'adaptation des mobilités face à une crise hydro-météorologique

"La théorie des probabilités n'est au fond que le bon sens réduit au calcul" (Laplace)

Les analyses précédentes ont permis d'estimer l'exposition des automobilistes aux submersions des routes sans prendre en compte les décisions d'adaptations possibles générées par le modèle de décision. Nous présentons dans ce chapitre les résultats de l'intégration du modèle de décision pour le même cas d'étude de la zone d'Alès et de l'évènement des 8 et 9 Septembre 2002. Il faut noter que l'objectif du modèle de décision ne consiste pas à représenter la façon dont les individus adaptent leurs mobilités dans la réalité, mais plutôt à tester les effets de différents scénarios de comportement sur l'exposition des individus aux submersions des routes.

La première partie décrit le développement du modèle de décision en spécifiant les variables utilisées, la structure du modèle ainsi que les différents paramètres nécessaires. La deuxième partie présente l'approche choisie pour la construction de scénarios de décision. La troisième partie est consacrée à l'étude de l'effet de différentes règles de décision face au risque sur l'exposition des automobilistes. Enfin, la quatrième partie analyse l'effet de différentes règles d'évaluation du danger sur l'exposition.

1 Développement d'un prototype de modèle de décision d'adaptation des comportements de mobilité

1.1 Structure globale du modèle de décision

Le modèle de décision est implémenté quand l'un des types d'évènements suivants est déclenché : "*Bottleneck*" (la rencontre d'un tronçon de route submergé), "*Broadcast*" (la réception d'une information de vigilance orange ou rouge), "*Environmental cue*" (la perception d'un signe de dégradation de la situation environnementale) et "*Activity-end*" (la fin de l'activité en cours et la planification d'un déplacement)¹. La description détaillée de ces évènements est présentée dans le chapitre III. Les variables qui interviennent pour les prises de décision diffèrent en fonction du contexte de décision (du point de vue des critères de décision et des alternatives possibles), ainsi chaque type d'évènement est rattaché à un modèle de décision spécifique.

L'approche choisie pour la modélisation de la prise de décision d'adaptation se base sur les réseaux Bayésiens. La description des fondements théoriques des réseaux Bayésiens est présentée en détail dans la section 3.3.4 du chapitre II. Nous rappelons que les étapes nécessaires pour le développement d'un modèle de décision basé sur les réseaux Bayésiens consistent à :

- Identifier les variables qui peuvent intervenir dans la prise de décision ainsi que les différents états/modalités possibles pour chaque variable. Ces variables constituent les nœuds du réseau Bayésien.
- Définir les relations de causalités entre les variables sélectionnées. Ces relations constituent la structure ou le graphe du réseau Bayésien.
- Définir les paramètres du modèle qui sont représentés par les tables de probabilités conditionnelles permettant de quantifier les relations de causalités entre les nœuds parents et enfants du graphe.

Même si les variables d'entrée varient en fonction du type d'évènement déclencheur, la structure globale du modèle de décision est la même pour les différents types d'évènements. L'approche adoptée consiste à considérer que les décisions d'adaptation de la mobilité dépendent essentiellement de trois principales composantes : l'évaluation du danger, l'évaluation de la flexibilité de l'activité planifiée et les règles de décision adoptées (Cools and Creemers, 2013; Ruin, 2007; Terti et al., 2015) (Figure VI.1).

1. Le développement et l'utilisation du modèle de décision sont documentés sous la forme d'un tutoriel en anglais adressé aux potentiels utilisateurs de *MobRISK*. Nous avons préféré conserver les appellations des différents évènements et variables utilisées en anglais, tels qu'ils ont été décrits dans le tutoriel.

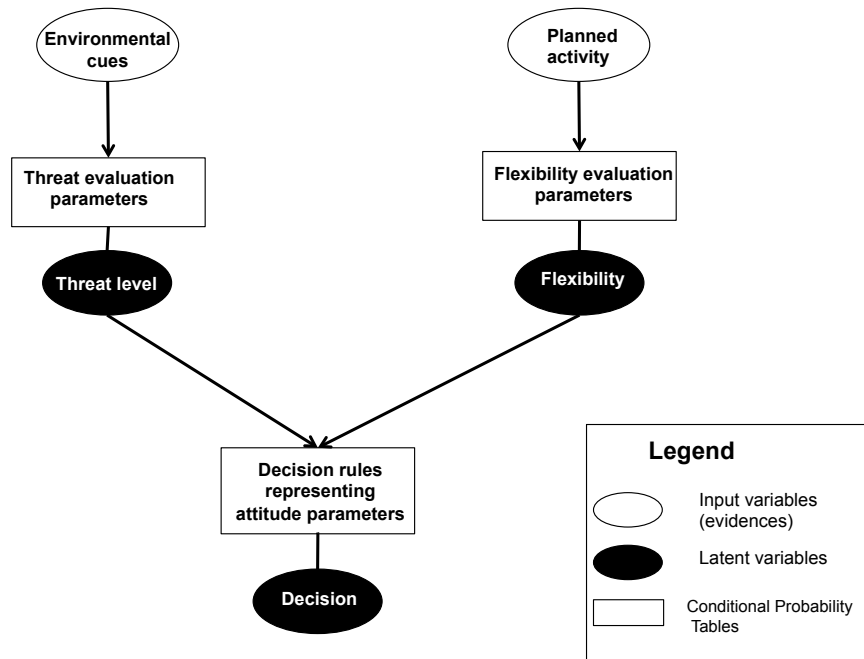


Figure VI.1 Structure générale du réseau Bayésien pour le modèle de décision

- **L'évaluation du danger** : Elle renvoie à une évaluation de la dangerosité de l'évènement déclencheur de la prise de décision en fonction des signes environnementaux perçus par l'individu. Le niveau d'évaluation du danger est discrétisé en trois classes : faible, modéré et élevé.

- **L'évaluation de la flexibilité des activités** : Le niveau de flexibilité représente l'importance et l'urgence perçue du motif de déplacement et donc sa propension à être plus ou moins facilement modifié ou annulé. Deux niveaux de flexibilité sont considérés : faible et élevée. Le niveau de flexibilité dépend essentiellement de la nature de l'activité elle-même. Nous avons considéré que le retour à domicile a une flexibilité très faible, tout comme les activités de travail et d'étude. Au contraire, nous avons considéré les activités secondaires comme plus flexibles en distinguant cependant deux groupes : les activités d'accompagnement, de soins médicaux et de procédures administratives étant considérées un peu moins flexibles que les activités de loisir, d'achat et de vacances (Table. VI.1). Cette classification provient des travaux antérieurs sur l'effet de la flexibilité des activités sur les comportements d'adaptation dans des conditions météorologiques défavorables (Cools and Creemers, 2013).

- **Les règles de décision** : Outre l'évaluation du danger et de la flexibilité des activités planifiées, les individus peuvent adopter différentes règles de décision pour adapter leurs mobilités aux circonstances environnementales défavorables et dangereuses. Par exemple, deux personnes peuvent attribuer le même niveau de danger à l'action de traverser une route

MobRISK comme outil de simulation des comportements d'adaptation des mobilités face à une crise hydro-météorologique

Table VI.1 Table de probabilités conditionnelles relative à l'évaluation du niveau de flexibilité des motifs des déplacements. Par exemple, la probabilité que (Flexibility = "Low") sachant (Activity = "Home") est estimée à 1.

	Activity	Home	Shopping	Medical	Administrative	Visiting	Accompanying	Leisure	Holidays	Work	Study
P(Flexibility)	Low	1	0.2	0.4	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2	0.8	0.8
	High	0	0.8	0.6	0.6	0.8	0.6	0.8	0.8	0.2	0.2

submergée cependant elles peuvent agir différemment sur la base de cette même évaluation. Cette différence de comportement peut s'expliquer par des attitudes différentes des personnes par rapport au danger évalué. Nous avons vu dans la littérature qu'on peut distinguer entre trois principaux types d'attitudes face aux risques : la forte aversion au risque qui caractérise les individus très prudents ou "risquophobes", la neutralité face au risque qui renvoie à un comportement indifférent par rapport au risque, et une faible aversion au risque qui caractérise les personnes les moins prudentes ou "risquophiles" (qui cherchent la prise de risque) (Kahneman and Tversky, 1979). Nous essayons alors de définir des règles de décision qui permettent de représenter ces différentes attitudes face au risque.

1.2 Description des déclinaisons de la structure du modèle Bayésien

Cette section est consacrée à la description des déclinaisons du modèle de décision correspondant aux différents types d'événements déclencheurs considérés ("*Bottleneck*", "*Activity-end*", "*Environmental cue*" et "*Broadcast*"). Pour chaque déclinaison du modèle, nous présentons la structure du réseau Bayésien (décrivant les relations entre les variables), la description des décisions implémentées et les paramètres utilisés dans l'évaluation du danger et de la flexibilité des activités (sous la forme des tables de probabilités conditionnelles).

1.2.1 Évènement "*Bottleneck*"

La figure VI.2 schématise la structure du réseau Bayésien du modèle de décision associé à un évènement "*Bottleneck*".

- Les décisions possibles :

Nous avons considéré trois décisions possibles :

- "*KEEP TRAVEL*" : Traverser la route submergée et poursuivre sa route ;
- "*HOME*" : Ne pas traverser la route submergée et annuler l'activité planifiée pour rentrer au domicile ;
- "*STOP*" : S'arrêter devant la route submergée. La durée de l'arrêt est introduite comme paramètre du modèle. Les individus ré-évaluent la situation environnementale après la durée d'arrêt choisie.

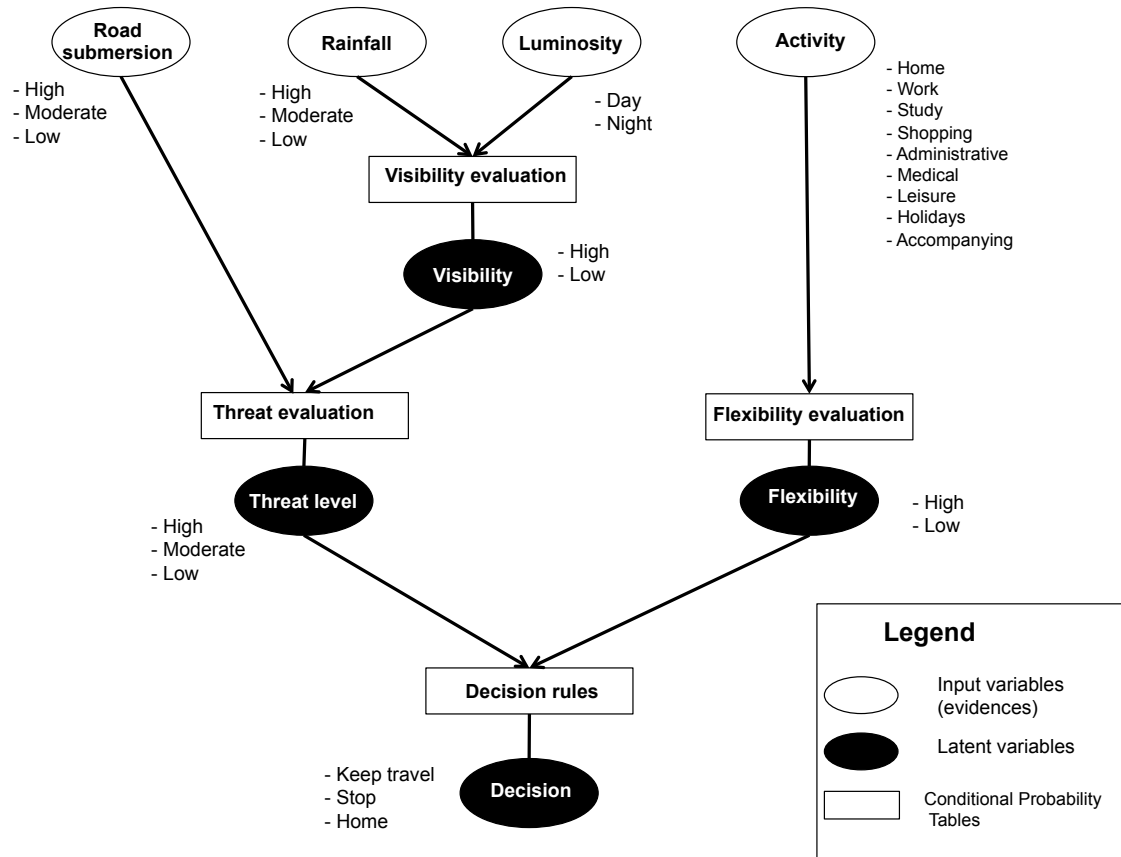


Figure VI.2 Structure du réseau Bayésien pour l'évènement "Bottleneck"

- L'évaluation du danger :

Nous considérons que l'évaluation du danger dans la situation de traverser un point de coupure est basée sur le niveau de submersion de la route et le niveau de visibilité. Puisque l'on ne dispose pas des niveaux de submersion des routes mais plutôt des probabilités de submersion, une relation directe a été établie entre les probabilités de submersion enregistrées lorsque les automobilistes se trouvent devant un point de coupure et le niveau de submersion estimé. On considère alors trois niveaux de submersion : faible pour une probabilité de submersion inférieure à 10%, modéré pour une probabilité inférieure à 50% et élevé pour une probabilité supérieure à 50%.

La visibilité est définie en deux niveaux : bonne ou mauvaise. Elle est évaluée en fonction du niveau de précipitation au niveau du point de coupure au moment de le traverser et de la luminosité. Le niveau de précipitation provient des données de ré-analyses de précipitations fournies par l'OHMCV, au pas de temps de 15mn, concernant l'évènement de 2002 (la description de ces données est fournie dans la section 3.2.3 du chapitre III. Les valeurs de précipitations ont été discrétisées en trois niveaux : faible (< 20mm/15mn), moyen (entre

MobRISK comme outil de simulation des comportements d'adaptation des mobilités face à une crise hydro-météorologique

20mm/15mn et 50mm/15mn) et élevé ($> 50\text{mm}/15\text{mn}$). Concernant la luminosité, nous avons considéré deux niveaux (jour et nuit) en se basant sur les heures de lever et coucher du soleil correspondant à la date de l'évènement étudié. Par exemple, la visibilité est considérée comme mauvaise lorsque le niveau de précipitation au niveau du point de coupure est élevé et que la luminosité est faible (Table. VI.2).

Table VI.2 Table de probabilités conditionnelles relative à l'évaluation du niveau de visibilité. Par exemple, la probabilité que (Visibility = "Good") sachant (Luminosity = "Day") et (Rainfall = "Low") est estimée à **0.8**.

	Luminosity	Day			Night		
	Rainfall	Low	Moderate	High	Low	Moderate	High
P(Visibility)	Good	0.8	0.5	0.2	0.4	0.2	0
	Bad	0.2	0.5	0.8	0.6	0.8	1

Comme indiqué dans la structure du modèle de décision pour l'évènement "*Bottleneck*", l'évaluation du danger dépend des niveaux de submersion de la route et de la visibilité. Nous considérons, dans un premier temps, qu'il y a plus de chance que le danger évalué soit élevé lorsque le niveau de submersion est élevé et que la visibilité est faible. La table VI.3 contient les différentes probabilités conditionnelles attribuées au niveau de danger évalué en fonction de ces deux variables environnementales.

Table VI.3 Table de probabilités conditionnelles relative à l'évaluation du danger. Par exemple, la probabilité que (Threat = "Low") sachant (Visibility = "Good") et (Road submersion = "Low") est estimée à **1**.

	Visibility	Good			Bad		
	Road submersion	Low	Moderate	High	Low	Moderate	High
P(Threat)	Low	1	0.8	0.6	0.8	0.2	0
	Moderate	0	0.2	0.4	0.2	0.4	0.4
	High	0	0	0	0	0.4	0.6

- L'évaluation du niveau de flexibilité :

L'évaluation du niveau de flexibilité de l'activité dépend uniquement du type de motif de déplacement. Ainsi, le retour à domicile est considéré comme un motif non flexible et les activités "travail" et "étude" sont majoritairement non flexibles. Comme indiqué précédemment, concernant les activités secondaires, nous avons distingué les activités d'accompagnement, de soins médicaux et de procédures administratives qui sont à 60% flexibles et les activités de loisir, d'achat et de vacances qui sont flexibles à 80% (Table VI.1).

1.2.2 Évènement "*Activity-end*"

La figure VI.3 représente le réseau Bayésien qui correspond à l'évènement "*Activity-end*". La différence par rapport à l'évènement "*Bottleneck*" se situe au niveau des variables utilisées pour évaluer le danger et au niveau des décisions possibles considérées.

- Les décisions possibles :

Nous avons considéré trois décisions possibles :

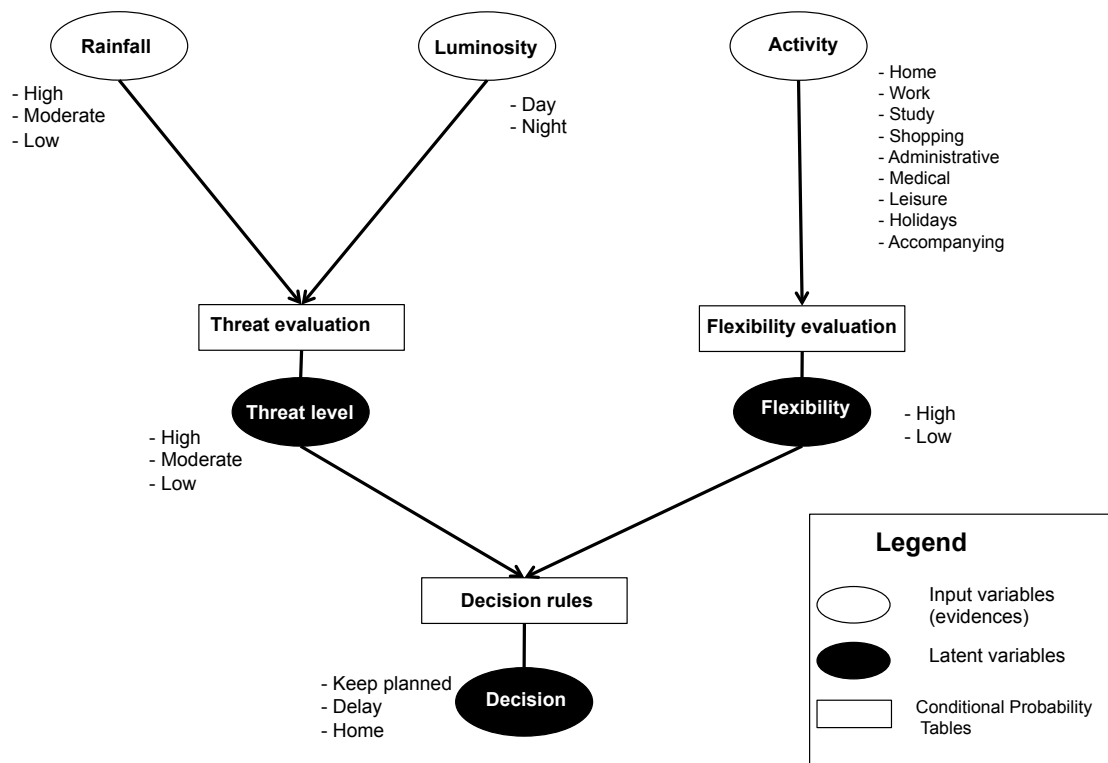


Figure VI.3 Structure du réseau Bayésien pour l'évènement "Activity-end"

- "KEEP PLANNED" : Aucune modification n'est apportée aux déplacements et aux activités planifiées ;
- "HOME" : Annulation de l'activité planifiée et retour à la maison ;
- "DELAY" : Décalage de l'heure de départ pour effectuer l'activité planifiée. La durée du décalage est introduite comme paramètre du modèle. Après cette durée, l'individu ré-évalue le danger en fonction de l'évolution des conditions environnementales.

- L'évaluation du danger :

De la même manière que pour l'évènement "Bottleneck", l'évaluation du danger est considérée en fonction des variables environnementales. Seuls les niveaux de précipitation et de visibilité sont supposés influencer l'évaluation du danger : la probabilité que le danger évalué soit élevé est supérieure lorsque les précipitations sont fortes et lorsqu'il fait nuit. La table VI.4 représente les valeurs de probabilités utilisées pour évaluer le danger.

- L'évaluation du niveau de flexibilité :

L'évaluation du niveau de flexibilité concernant l'évènement "Activity-end" se fait de la même manière que pour un évènement "Bottleneck".

MobRISK comme outil de simulation des comportements d'adaptation des mobilités face à une crise hydro-météorologique

Table VI.4 Table de probabilités conditionnelles relatives à l'évaluation du niveau de danger. Par exemple, la probabilité que (Threat = "Low") sachant (Luminosity = "Day") et (Rainfall = "Low") est estimée à 1.

	Luminosity	Day			Night		
		Rainfall	Low	Moderate	High	Low	Moderate
P(Threat)	Low	1	0.8	0.6	0.8	0.2	0
	Moderate	0	0.2	0.4	0.2	0.4	0.4
	High	0	0	0	0	0.4	0.6

1.2.3 Évènement "Environmental cue"

La figure VI.4 représente la structure du réseau Bayésien qui correspond à l'évènement "Environmental cue". La différence par rapport aux deux évènements précédents se situe au niveau des variables utilisées pour l'évaluation du danger et des décisions implémentées.

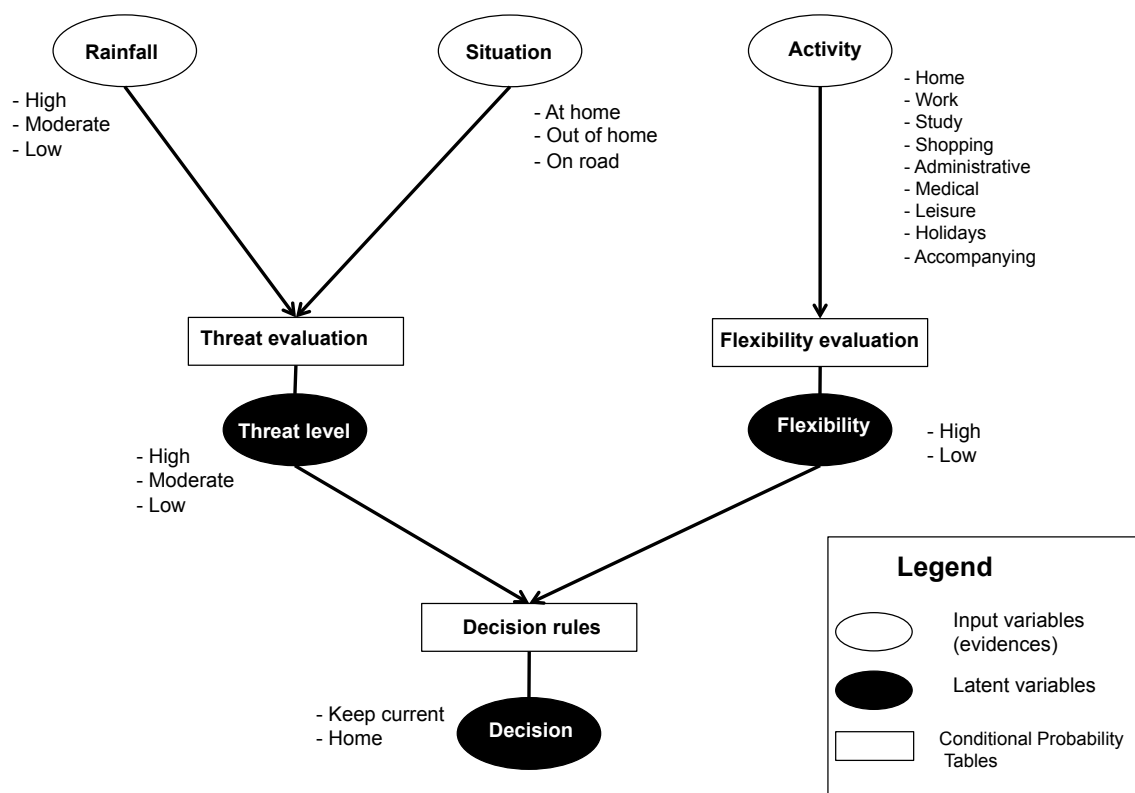


Figure VI.4 Structure du réseau Bayésien pour l'évènement "Environmental Cue"

- Les décisions possibles :

Nous avons considéré deux décisions possibles :

- "KEEP CURRENT" : Aucune modification n'est apportée aux déplacements et aux activités planifiées ;

- *"HOME"* : Annulation de l'activité planifiée ou en cours et retour au lieu de domicile.

- **L'évaluation du danger et de la flexibilité de l'activité :**

La prise de décision dépend de deux variables principales : le niveau de flexibilité de l'activité en cours (si l'individu est sur un lieu d'activité) ou du motif de déplacement (s'il est en déplacement) et le niveau du danger évalué. Concernant l'évaluation du niveau de flexibilité de l'activité, les paramètres utilisés sont les mêmes que ceux des autres évènements (voir les valeurs dans la table VI.1). L'évaluation du danger dépend du type du signe environnemental perçu, du niveau associé et de l'endroit où l'individu perçoit la perturbation environnementale (sur la route, chez soi ou dans un autre lieu d'activité). Dans cette première application du modèle, seules les précipitations sont prises en compte comme signes environnementaux impliquant potentiellement des décisions d'adaptation de la mobilité. Ainsi, le niveau de danger évalué est considéré plus élevé quand les précipitations sont plus fortes (Table VI.5). D'autres variables pourraient être intégrées tels que la vitesse de montée des eaux ou les dégâts physiques observés par les individus (Ruin et al., 2014).

Table VI.5 Table de probabilités conditionnelles relative à l'évaluation du danger. Par exemple, la probabilité que (Threat = "Low") sachant (Rainfall = "Day") et (Situation = "At home") est estimée à 1.

	Rainfall Situation	Low			Moderate			High		
		At home	Out of home	On road	At home	Out of home	On road	At home	Out of home	On road
P(Threat)	Low	1	1	1	0.6	0.6	0.6	0	0	0
	Moderate	0	0	0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	High	0	0	0	0	0	0	0.6	0.6	0.6

1.2.4 Évènement *"Broadcast"*

La figure VI.5 représente la structure du réseau Bayésien qui correspond à l'évènement *"Broadcast"* qui consiste en la réception d'une information de vigilance qui peut engendrer une modification des plannings d'activités chez les individus.

- **Les décisions possibles :**

Comme pour l'évènement "Environmental Cue", les deux décisions possibles implémentées sont :

- *"KEEP CURRENT"* : Aucune modification n'est apportée aux déplacements et aux activités planifiées ;
- *"HOME"* : Annulation de l'activité planifiée ou en cours et retour au domicile.

- **L'évaluation du danger et de la flexibilité de l'activité :**

La structure du modèle est similaire à celle de l'évènement "Environmental Cue". La seule différence se situe au niveau des variables d'entrée pour l'évaluation du danger qui dépend ici

MobRISK comme outil de simulation des comportements d'adaptation des mobilités face à une crise hydro-météorologique

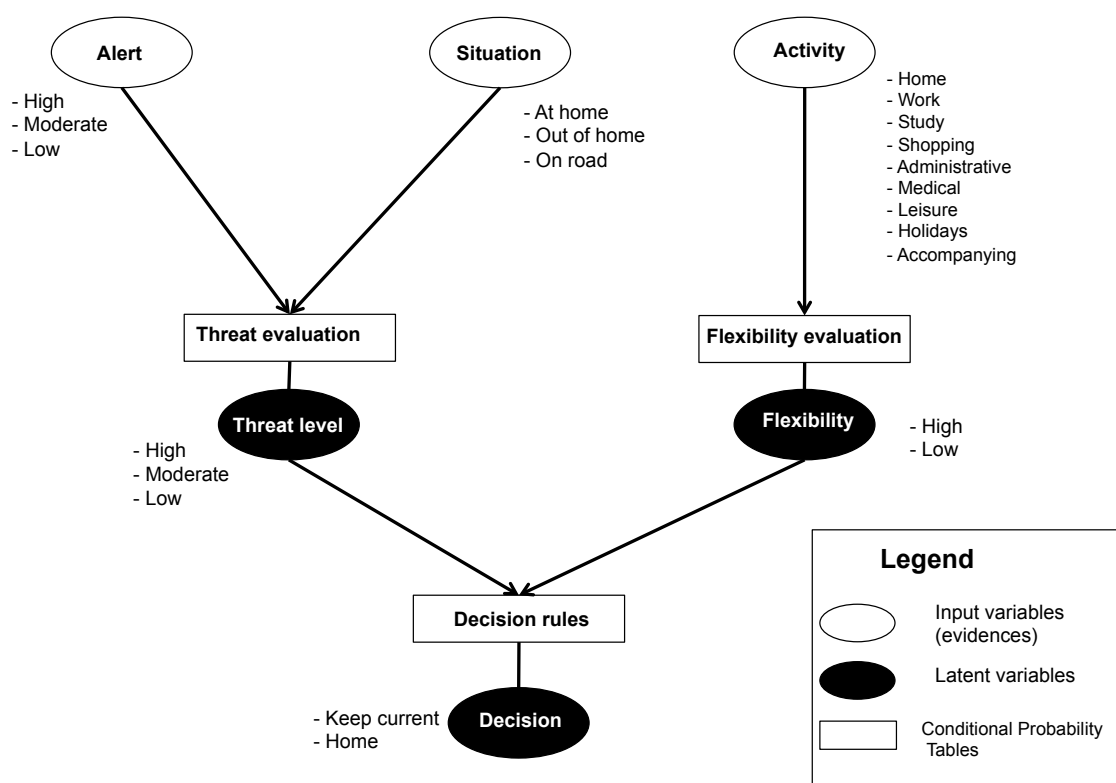


Figure VI.5 Structure du réseau Bayésien pour l'évènement "Broadcast"

de l'information reçue (source et niveau d'alerte ou de vigilance associé) et de la situation dans laquelle l'individu reçoit l'information (à domicile, dans un autre lieu d'activité, sur la route). Pour la première application du modèle, seules les informations de vigilance de Météo-France sont prises en compte (niveaux de vigilance : jaune, orange et rouge). Aucune distinction n'est faite par rapport à la situation de l'individu. Les paramètres utilisés pour associer un niveau de danger évalué en fonction de la vigilance sont présentés dans la table VI.6.

Table VI.6 Table de probabilités conditionnelles relative à l'évaluation du niveau de danger pour l'évènement "Broadcast". Par exemple, la probabilité que (Threat = "Low") sachant (Vigilance = "Jaune") est estimée à 1.

	Vigilance	Jaune	Orange	Rouge
P(Threat)	Low	1	0.6	0
	Moderate	0	0.4	0.4
	High	0	0	0.6

Nous avons décrit dans cette section l'approche utilisée dans la construction du modèle de décision qui consiste à considérer que les décisions d'adaptation dépendent de l'évaluation du danger (en fonction des variables environnementales), de l'évaluation de la flexibilité de

l'activité planifiée ou en cours (en fonction du type d'activité) et des règles de décision (en fonction des niveaux de danger et de flexibilité). Nous avons présenté les paramètres utilisés dans l'évaluation du danger et de la flexibilité des activités dans les quatre déclinaisons de modèle. Nous présentons dans la section suivante les paramètres utilisés pour la variable "Décision" qui seront définis dans le but de construire différents scénarios de règles de décision. Ces règles de décision seront construites de manière à représenter différentes attitudes des individus face aux niveaux de danger perçu.

2 Construction des scénarios de décision

2.1 Objectifs

Comme précisé en début de ce chapitre, l'objectif de la modélisation des décisions d'adaptation dans cette étude ne consiste pas à prédire les comportements individuels ou d'essayer de reproduire exactement les comportements adoptés pour l'évènement d'inondation concerné. Étant donnée la difficulté d'avoir des données d'observation, il serait en effet très hasardeux de vouloir reconstituer les comportements. Il s'agit plutôt de définir des règles de prise de décision afin de construire des scénarios de comportements, et d'évaluer leurs effets sur l'exposition des automobilistes. En effet, la construction de scénarios semble appropriée pour aborder notre problématique puisqu'elle permet d'avoir une approche hypothétique afin d'explorer les effets de différents comportements-types. Ceci permet de mieux envisager l'effet d'actions de prévention contre les risques d'inondation afin d'identifier les comportements à adopter ou au contraire à éviter dans ces situations. L'approche par construction de scénarios est en effet souvent adoptée dans les études qui visent à planifier les actions de prévention contre les risques naturels. Selon la définition proposée par le GIEC par rapport aux développements de scénarios climatiques : *"A scenario is a coherent, internally consistent and plausible description of a possible future state of the world. It is not a forecast; rather, each scenario is one alternative image of how the future can unfold"* (Pachauri et al., 2014).

Cette approche de construction et de définition de comportements-types renvoient au concept du "type-idéal" qui est souvent employé en sociologie dans le but de représenter et de modéliser des comportements ou des processus complexes (Coenen-Huther, 2003). La construction du "type-idéal" se base généralement sur l'accentuation de certains traits de l'objet représenté (Weber and Freund, 1966). L'objectif de cette approche n'est pas de reproduire exactement la réalité empirique mais d'en présenter une version "stylisée" et réduite à ce qui est nécessaire pour comprendre le processus étudié (Coenen-Huther, 2003; Weinreich, 1939).

MobRISK comme outil de simulation des comportements d'adaptation des mobilités face à une crise hydro-météorologique

Les principaux objectifs de la construction des différents scénarios de décision dans cette étude consistent à répondre aux questions suivantes :

- *Quels sont les effets des règles de décision adoptées par les individus en fonction du danger évalué (qui représentent leurs attitudes face au risque : forte ou faible aversion au risque) sur l'exposition aux submersions des routes ?*

- *Quels sont les effets de l'évaluation du danger perçu par les individus en fonction de la dégradation des circonstances environnementales (sur-estimation ou sous-estimation du danger) sur l'exposition aux submersions des routes ?*

- *Quels sont les effets des différentes décisions d'adaptation étudiées (rentrer au domicile, s'arrêter devant la route submergée, retarder l'heure de déplacement) sur l'exposition aux submersions des routes*

2.2 Méthode

L'approche utilisée ici consiste à faire varier les paramètres du modèle (définis par les tables de probabilités conditionnelles) et à évaluer l'exposition aux submersions des routes. Deux types de scénarios sont explorés :

- **Les scénarios de règles de décision :** Ces scénarios sont construits en modifiant les paramètres qui lient les variables d'évaluation du danger et de la flexibilité avec la variable "décision". L'objectif de ces scénarios est d'attribuer différents types d'attitudes aux automobilistes et d'évaluer leurs effets sur l'exposition.
- **Les scénarios d'évaluation du danger :** Ces scénarios sont construits en modifiant les paramètres qui lient l'évaluation du danger avec les variables environnementales. Ils permettent de mesurer l'effet de l'évaluation du danger sur l'exposition.

Nous avons vu dans la description de la structure des déclinaisons de modèles que pour les événements "*Bottleneck*" et "*Activity-end*" deux types de décisions d'adaptation sont examinés. Pour l'évènement "*Bottleneck*", les individus sont amenés à choisir entre rentrer à leur domicile ("*HOME*") ou s'arrêter devant la route submergée ("*STOP*"). Pour l'évènement "*Activity-end*", les individus sont amenés à choisir entre rentrer à leur domicile ("*HOME*") ou décaler l'heure du déplacement ("*DELAY*"). Nous allons alors examiner les effets de ces décisions indépendamment en n'implémentant dans un premier temps que les décisions "*HOME*" et dans un deuxième temps que les décisions "*STOP*" et "*DELAY*". Ceci nous permettra de comparer les effets de ces types de décisions sur l'exposition des automobilistes afin d'identifier les décisions qui réduisent le plus l'exposition aux submersions des routes.

3 Effets des règles de décision sur l'exposition

3.1 Construction d'attitudes-types

La construction de différentes attitudes-types face au risque consiste à modifier les paramètres définis dans la table des probabilités conditionnelles qui relie l'évaluation du danger et de la flexibilité avec la variable "décision". Par exemple, l'augmentation des probabilités attribuées aux décisions d'adaptation ("*HOME*" et "*STOP*") permet de construire des attitudes de prudence ("*Risk averse*"). Par contre, l'augmentation des probabilités attribuées à la décision de ne pas modifier les déplacements planifiés ("*KEEP TRAVEL*" et "*KEEP PLANNED*") permet de représenter des attitudes de types "*Risk seeker*".

Nous avons défini quatre attitudes-types face au risque : "*No adaptation*", "*Risk seeker*", "*Risk neutral*" et "*Risk averse*". Les paramètres associés représentent une échelle d'attitude allant d'un comportement extrêmement risqué (caractérisant les individus qui n'adaptent jamais leurs mobilités) à un comportement très prudent (caractérisant les individus qui ont une tendance très forte à modifier leurs déplacements pour un même niveau de danger évalué).

- "***No adaptation***" : Cette attitude-type permet de représenter les individus qui n'adaptent jamais leurs comportements de mobilité en fonction des conditions environnementales. C'est à dire qu'au niveau de la table de probabilités conditionnelles, les probabilités de prendre la décision "*Keep travel*" et "*keep planned*" sont fixées à 100%. Il faut noter que la simulation de l'exposition des automobilistes correspondant à cette attitude-type est pareille à une simulation sans l'intégration du modèle de décision puisque les individus ne modifient pas leur programme d'activités.
- "***Risk seeker***" : Les règles utilisées pour cette attitude-type consistent à attribuer des probabilités très faibles aux décisions d'adaptations.
- "***Risk neutral***" : L'attitude-type "*Risk neutral*" consiste à attribuer des probabilités égales aux différentes décisions.
- "***Risk averse***" : L'attitude-type "*Risk averse*" permet de représenter les individus qui ont tendance à adapter leurs déplacements même pour un très faible niveau de danger évalué. La construction de cette attitude-type consiste à attribuer des probabilités très élevées aux décisions d'adaptation.

Les tables de probabilités conditionnelles représentant les paramètres utilisés dans la construction de ces quatre attitudes-types sont disponibles dans l'annexe D. Les figures VI.6 et VI.7 illustrent les règles de décision utilisées correspondant aux quatre attitudes-types pour un évènement "*Bottleneck*" en implémentant dans un premier temps les décisions "*KEEP TRAVEL*" et "*HOME*" et dans un deuxième temps les décisions "*KEEP TRAVEL*" et "*STOP*".

MobRISK comme outil de simulation des comportements d'adaptation des mobilités face à une crise hydro-météorologique

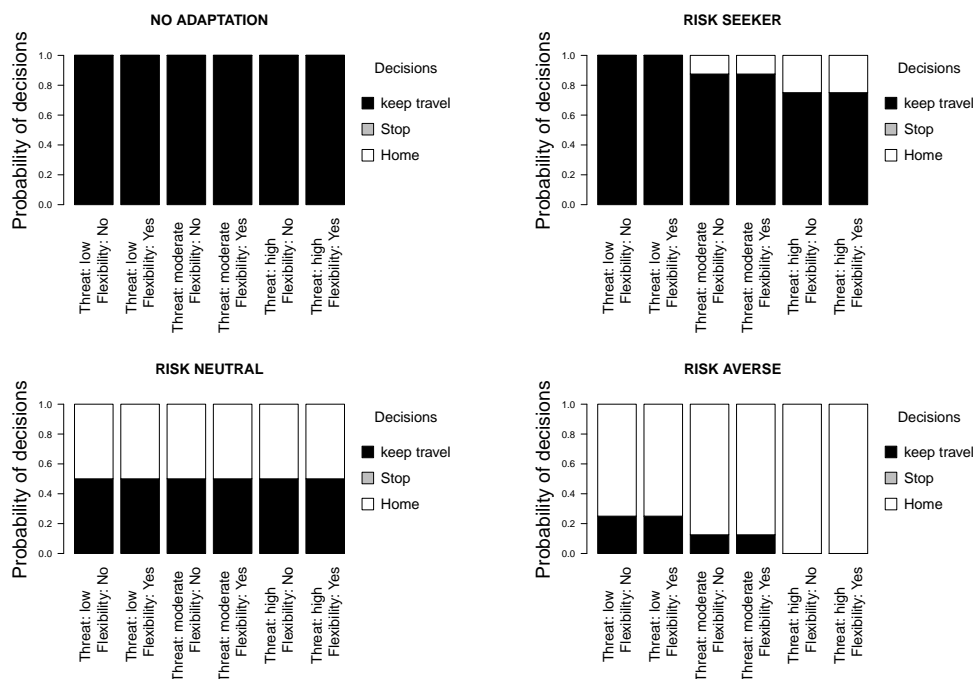


Figure VI.6 Illustration des règles de décision pour l'évènement "Bottleneck" en implémentant les décisions "KEEP TRAVEL" et "HOME" pour les quatre attitudes-types

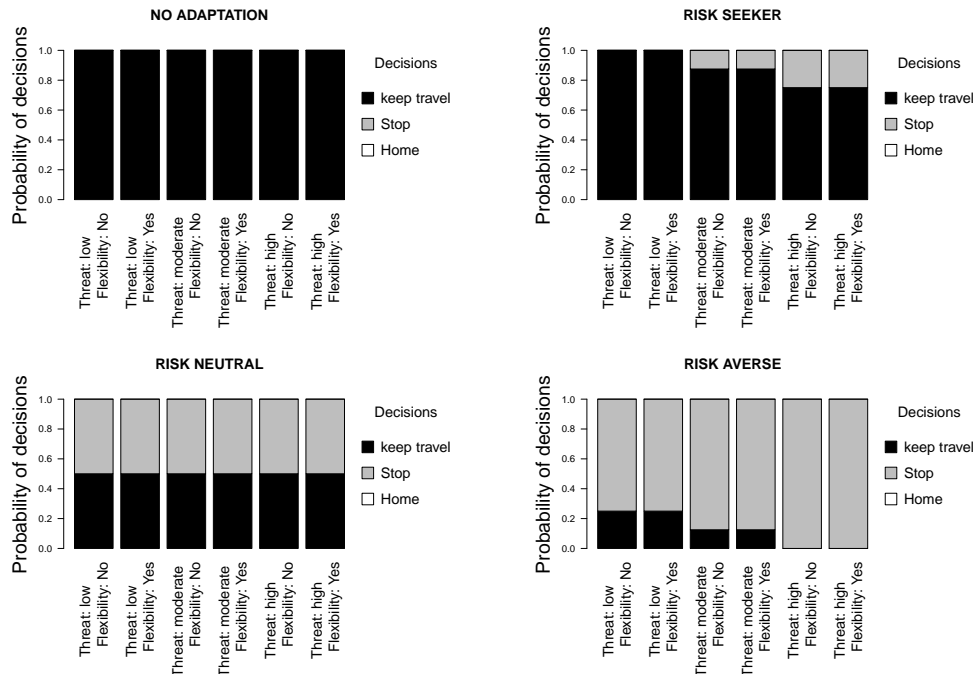


Figure VI.7 Illustration des règles de décision pour l'évènement "Bottleneck" en implémentant les décisions "KEEP TRAVEL" et "STOP" pour les quatre attitudes-types

3.2 Résultats de l'implémentation des scénarios d'attitudes-types dans le cas d'étude d'Alès

Nous avons décrit dans la section précédente l'approche adoptée et les paramètres utilisés dans la construction de différentes règles de décision correspondant aux quatre scénarios d'attitudes-types des automobilistes face au danger lié aux dégradations des circonstances environnementales. Nous présentons dans cette section les résultats de l'implémentation de ces quatre scénarios afin d'évaluer leurs effets sur l'exposition des individus aux submersions des routes dans le cas d'étude d'Alès. Trois variables d'exposition seront examinées dans chaque scénario :

- *L'exposition moyenne des automobilistes ($\overline{Exp_{Total}}$)* : en se basant la méthode de mesure de l'exposition individuelle présentée dans la section 3.1 du chapitre V.
- *Le pourcentage de personnes exposées* : en comptant le pourcentage d'automobilistes qui ont une exposition non-nulle (ce qui veut dire qu'ils ont une probabilité non-nulle de traverser une route submergée).
- *L'exposition moyenne des seules personnes exposées ($\overline{Exp_{exposed}}$)* : en calculant l'exposition moyenne qui correspond uniquement aux personnes exposées (comme définit précédemment). Puisque l'exposition moyenne intègre les individus qui ont une exposition nulle durant la période de l'évènement, cette deuxième variable nous permet de focaliser sur la population exposée.

Puisque le modèle de décision utilisé est un modèle probabiliste, nous avons effectué 30 réalisations pour chaque scénario. Les résultats présentés correspondent aux valeurs moyennes de ces 30 réalisations.

3.2.1 Implémentation de la décision : "HOME"

Dans cette partie nous présentons les résultats de l'implémentation de la décision "HOME". Les résultats indiquent que le retour à domicile permet de réduire l'exposition des automobilistes en termes d'exposition moyenne et de pourcentages de personnes exposées (Table. VI.7). L'exposition maximale correspondant à une attitude *No adaptation* est de 0.22². La comparaison des résultats pour chaque attitude-type montre qu'une attitude d'aversion au risque permet de réduire considérablement l'exposition moyenne des individus ($Exposure_{Averse} = 0.09$; $Exposure_{Seeker} = 0.16$). Elle permet de baisser de moitié le pourcentage de personnes exposées. Cependant, l'attitude-type d'aversion au risque présente un effet limité quand on ne s'intéresse qu'aux personnes exposées. En effet, même en adoptant des comportements prudents, 13.6% des automobilistes n'éviteront pas les routes submergées sur leurs itinéraires

2. La valeur de l'exposition maximale dans cette version de *MobRISK* est différente de celle retrouvée dans le chapitre précédent à cause de la non-prise en compte de la congestion dans la nouvelle version

MobRISK comme outil de simulation des comportements d'adaptation des mobilités face à une crise hydro-météorologique

du retour au domicile. Enfin, les écarts-types de l'exposition sont plus importants dans les scénarios *No adaptation* et *Risk seeker* que les scénarios *Risk neutral* et *Risk averse*. Nous remarquons aussi que l'exposition varie d'une manière importante entre les personnes exposées pour les 4 scénarios d'attitudes-types ($\sigma_{exposed} = 0.25$).

Table VI.7 Effets du type d'attitude sur : l'exposition moyenne de toute la population ($\overline{Exp_{Total}}$), l'écart type de l'exposition σ_{Total} , le pourcentage de personnes exposées ($\%_{exposed}$), leur exposition moyenne ($\overline{Exp_{exposed}}$) et son écart type $\sigma_{exposed}$ (dans l'implémentation de la décision "HOME").

Scénarios d'attitude	$\overline{Exp_{Total}}$	σ_{Total}	$\%_{exposed}$	$\overline{Exp_{exposed}}$	$\sigma_{exposed}$
<i>No adaptation</i>	0.22	0.35	32.97 %	0.67	0.27
<i>Risk seeker</i>	0.16	0.30	23.51 %	0.66	0.25
<i>Risk neutral</i>	0.11	0.16	16.74 %	0.62	0.25
<i>Risk averse</i>	0.09	0.18	13.60 %	0.61	0.25

3.2.2 Implémentation des décisions : "STOP"/"DELAY"

Dans cette partie nous présentons les résultats de l'implémentation des décisions :

- *"STOP"* : S'arrêter en face des points de coupure en raison du niveau de submersion des routes. Nous avons fixé la durée d'arrêt à 60 mn vu que la variabilité temporelle des probabilités de submersion des routes à pas de temps horaire est importante (Figure V.3 dans le chapitre V). Après les 60 mn d'arrêt devant le point de coupure, les individus ré-évaluent les conditions environnementales (niveau de submersion, précipitation...) pour prendre une nouvelle décision.
- *"DELAY"* : Retarder les déplacements en raison des conditions météorologiques. La durée est fixée à 15 mn vu que les données de précipitation utilisées sont à pas de temps de 15 mn. Après les 15 mn d'attente, les individus ré-évaluent les conditions environnementales pour prendre une nouvelle décision.

Les résultats indiquent, qu'en prenant en compte seulement ces deux décisions d'adaptation, le type d'attitude a un effet important sur le niveau d'exposition total des automobilistes (Table. VI.8). Nous observons que l'exposition moyenne dans les trois scénarios d'adaptation est inférieure à 0.1, alors qu'elle atteint 0.22 quand les individus n'adaptent pas leurs déplacements. De la même manière, le pourcentage des personnes exposées est inférieur à 15% pour les trois attitude-types contre 33% quand aucune décision d'adaptation n'est adoptée. Cependant, la différence entre les trois types d'attitude en termes d'exposition n'est pas très importante. L'attitude *"Risk averse"* ne réduit que de 0.03 l'exposition moyenne par rapport à l'attitude *"Risk seeker"*. Concernant les personnes exposées, nous observons que contrairement au scénario de retour à domicile, la décision de s'arrêter réduit plus significativement le niveau d'exposition de cette catégorie.

Table VI.8 Effets du type d'attitude sur : l'exposition moyenne de toute la population ($\overline{Exp_{Total}}$), l'écart type de l'exposition σ_{Total} , le pourcentage de personnes exposées ($\%_{exposed}$), leur exposition moyenne ($\overline{Exp_{exposed}}$) et son écart type $\sigma_{exposed}$ (dans l'implémentation des décisions "STOP" et "DELAY").

Scénarios d'attitude	$\overline{Exp_{Total}}$	σ_{Total}	$\%_{exposed}$	$\overline{Exp_{exposed}}$	$\sigma_{exposed}$
<i>No adaptation</i>	0.22	0.35	32.97 %	0.67	0.27
<i>Risk seeker</i>	0.09	0.54	14.85 %	0.54	0.19
<i>Risk neutral</i>	0.09	0.53	14.90 %	0.53	0.17
<i>Risk averse</i>	0.06	0.31	9.89 %	0.31	0.11

3.2.3 Comparaison des deux types de décisions d'adaptation

Nous avons vu que l'attitude-type a un effet important sur le niveau d'exposition des automobilistes pour les deux types de décisions "HOME" et "STOP/DELAY". En effet, l'adoption d'une attitude d'aversion au risque permet de réduire de moitié l'exposition moyenne des automobilistes et le pourcentage de personnes exposées. Les figures VI.8 et VI.9 comparent les niveaux d'exposition moyenne et les pourcentage de personnes exposées dans les cas d'implémentation de la décision "HOME" et des décisions "STOP"/"DELAY". Nous remarquons que globalement les décisions de s'arrêter ou décaler les horaires de déplacements réduisent plus significativement l'exposition que la décision de rentrer à domicile pour les différentes attitudes-types. Ceci s'explique par le fait qu'en rentrant à leur lieu de domicile, les individus sont susceptibles de traverser d'autres routes inondées.

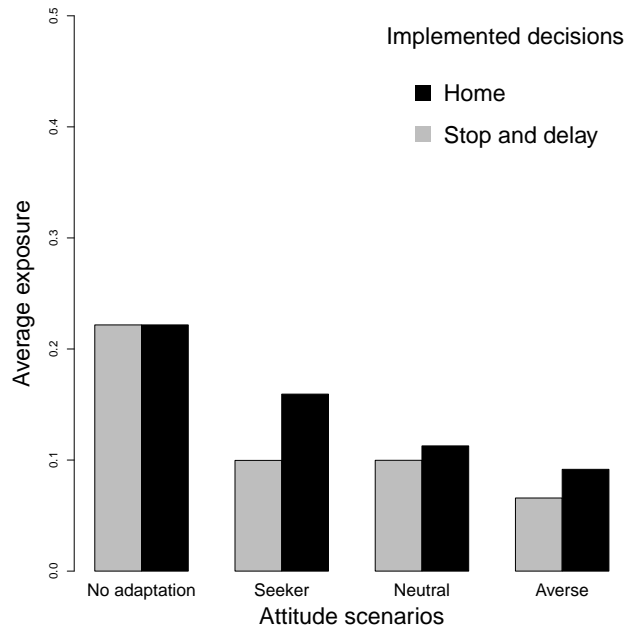


Figure VI.8 Comparaison de l'exposition moyenne en fonction des attitudes-types et des décisions

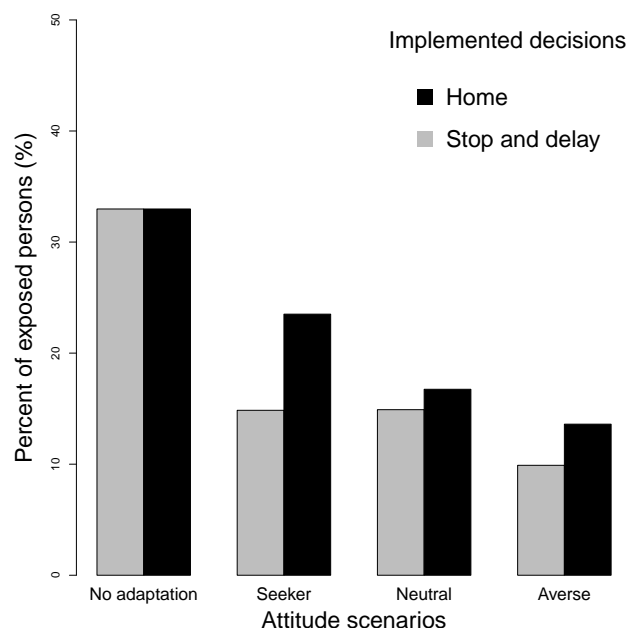


Figure VI.9 Comparaison des pourcentages de personnes exposées en fonction des attitudes-types et des décisions

4 Effets de l'évaluation du danger sur l'exposition

Dans la section précédente, nous avons évalué les effets de quatre attitudes-types sur l'exposition des individus. Pour construire ces différentes attitudes, nous avons modifié les paramètres du modèle de décision liés à l'attribution des probabilités de sélectionner chaque décision en fonction des niveaux de danger évalué et de la flexibilité de l'activité en cours ou à venir. Comme indiqué dans la structure du modèle, l'évaluation du danger dépend essentiellement des facteurs externes (niveaux de précipitation, de visibilité et de submersion des routes). Dans un premier temps, l'attribution des paramètres liés à l'évaluation du danger a été faite de manière arbitraire en considérant que plus les variables environnementales indiquent une situation de danger, plus le danger perçu est élevé (Tables : VI.3, VI.4, VI.6, VI.5). Ceci suppose que les individus évaluent le danger d'une manière objective et rationnelle. Cependant, nous avons vu dans le premier chapitre de la thèse que dans les situations d'évènements extrêmes, certaines personnes n'arrivent pas à percevoir et interpréter les signes environnementaux et ne se rendent pas compte du danger qui les menace (Ruin, 2007; Ruin et al., 2014).

4.1 Construction des scénarios d'évaluation du danger

Afin de prendre en considération cette incertitude par rapport à l'évaluation de la menace environnementale et d'évaluer son effet sur l'exposition, nous proposons de tester trois paramétrisations de l'évaluation du danger :

- *Sous-estimation du danger :*

Dans ce scénario, nous considérons que les individus ont toujours une faible évaluation du danger. Ainsi, dans la table. VI.9 les probabilités que le niveau de danger évalué soit faible est fixée à 1.

Table VI.9 Table de probabilités conditionnelles relative à l'évaluation du danger pour un scénario de sous-estimation du danger

	Visibility	Good			Bad		
	Road submersion	Low	Moderate	High	Low	Moderate	High
P(Threat)	Low	1	1	1	1	1	1
	Moderate	0	0	0	0	0	0
	High	0	0	0	0	0	0

- *Évaluation objective du danger :*

Dans ce scénario, l'évaluation du danger dépend des facteurs environnementaux (Table. VI.10). Ces paramètres correspondent à ceux qui ont été utilisés dans les précédentes simulations.

Table VI.10 Table de probabilités conditionnelles relative à l'évaluation du danger pour un scénario d'évaluation "objective" du danger

	Visibility	Good			Bad		
	Road submersion	Low	Moderate	High	Low	Moderate	High
P(Threat)	Low	1	0.8	0.6	0.8	0.2	0
	Moderate	0	0.2	0.4	0.2	0.4	0.4
	High	0	0	0	0	0.4	0.6

- *Sur-estimation du danger :*

Dans ce scénario, les individus ont toujours une forte estimation du danger. Ainsi, dans la table. VI.11 les probabilités que le niveau de danger évalué soit élevé est fixée à 1.

Table VI.11 Table de probabilités conditionnelles relative à l'évaluation du danger pour un scénario de sur-estimation du danger

	Visibility	Good			Bad		
	Road submersion	Low	Moderate	High	Low	Moderate	High
P(Threat)	Low	0	0	0	0	0	0
	Moderate	0	0	0	0	0	0
	High	1	1	1	1	1	1

4.2 Résultats de l'implémentation des scénarios d'évaluation du danger dans le cas d'étude d'Alès

Afin d'évaluer les effets croisés de l'évaluation du danger et des attitude-types, nous avons mis en place 12 scénarios qui croisent les 3 scénarios d'évaluation du danger avec les 4 scénarios

MobRISK comme outil de simulation des comportements d'adaptation des mobilités face à une crise hydro-météorologique

d'attitudes-types (qui correspondent aux paramétrisations des règles de décision présentées dans la section précédente). Les résultats au niveau de l'exposition des automobilistes pour les différentes combinaisons seront présentés sous la forme d'une matrice avec 4 lignes (les 4 attitudes-types) et 3 colonnes (les 3 scénarios d'évaluation du danger) comme schématisé par la figure VI.10).

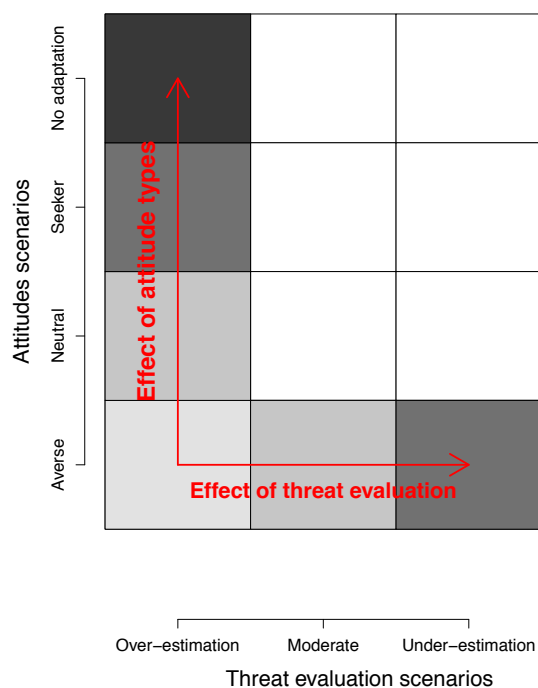


Figure VI.10 Schéma de la matrice du croisement des 4 scénarios d'attitudes-types avec les 3 scénarios d'évaluation du danger

La lecture horizontale de la matrice permet d'évaluer les effets des scénarios d'évaluation du danger pour chaque attitude-type. La lecture verticale permet d'observer les effets des scénarios d'attitudes-types sur chaque scénario d'évaluation du danger. Enfin, la lecture en diagonale permet de voir les effets de la combinaison de ces deux types de scénarios. De la même manière, les effets des décisions "*HOME*" et "*STOP*" / "*DELAY*" seront étudiés séparément pour pouvoir les comparer.

4.2.1 Implémentation de la décision : "*HOME*"

La figure VI.11 représente l'exposition moyenne des automobilistes pour les 12 combinaisons de scénarios. La lecture verticale de la matrice des résultats montre que l'on retrouve le même effet des attitudes-types sur l'exposition des automobilistes pour les différents scénarios d'évaluation du danger : moins les individus ont tendance à adapter leurs déplacements, plus ils sont exposés. Les résultats indiquent aussi que l'effet de l'attitude-type est plus

important pour un scénario de sous-estimation du danger où l'écart d'exposition moyenne entre les attitudes "*Averse*" et "*Seeker*" est de 0.188, alors que cet écart pour un scénario de sur-estimation du danger est de 0.099. La lecture horizontale de la matrice des résultats montre un effet des scénarios d'évaluation du danger sur l'exposition pour les deux attitudes-types "*Averse*" et "*Seeker*" : la sur-estimation du danger permet de réduire l'exposition moyenne des automobilistes. Par contre, ceci n'est pas le cas pour l'attitude-type "*Neutral*" où l'exposition ne varie pas de la même façon en fonction de l'évaluation du danger. En effet, dans cette attitude-type les décisions sont considérées prises de manière aléatoire avec des équivalences entre les alternatives (voir section 3.1) ce qui élimine l'effet de l'évaluation du danger.

Enfin, le croisement des attitudes-types et de l'évaluation du danger montre qu'une attitude-type "*Averse*" croisée avec une sur-estimation du danger réduisent considérablement l'exposition moyenne des automobilistes qui atteint 0.000 (seulement cinq personnes avaient une exposition non nulle dans cette combinaison de scénarios).

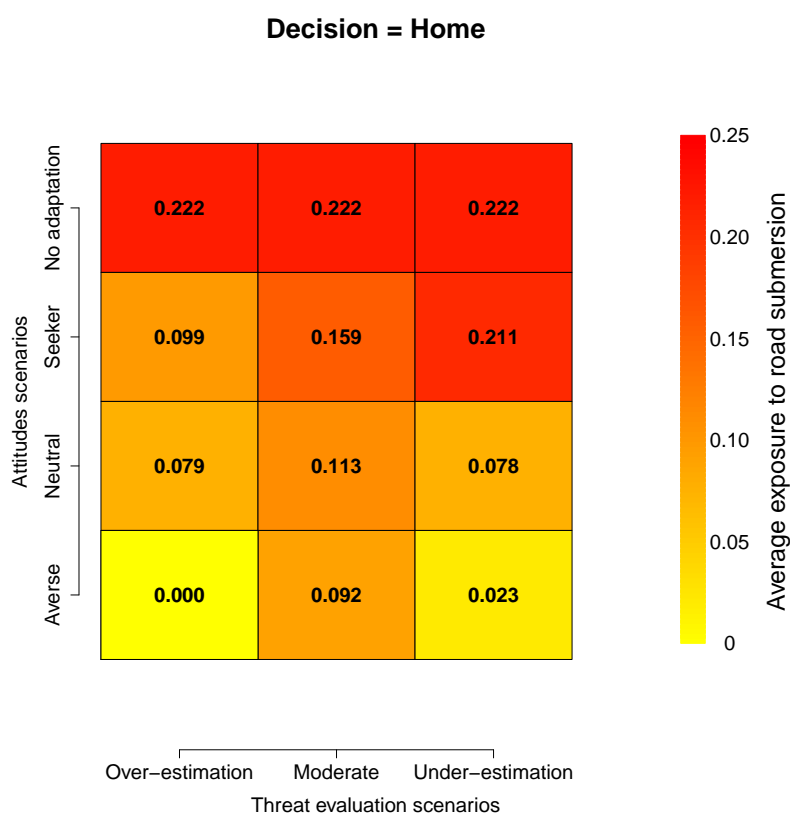


Figure VI.11 Exposition moyenne selon les effets croisés des scénarios d'attitudes-types et d'évaluation du danger dans le cas d'une décision de retour au domicile

La table VI.12 indique les pourcentages des personnes exposées dans les 12 combinaisons de scénarios. On observe que le scénario correspondant à une attitude "*Seeker*" avec une sous-estimation du danger génère le plus de personnes exposées (31.48%), sachant que dans

MobRISK comme outil de simulation des comportements d'adaptation des mobilités face à une crise hydro-météorologique

le cas où aucune action d'adaptation n'est entreprise, on enregistre 32.97% de personnes exposées. Nous remarquons aussi un effet important de l'attitude-type sur le pourcentage des personnes exposées, plus élevé dans le cas de l'attitude "*Seeker*" (14.97%, 23.40% et 31.48%) que dans les scénarios de l'attitude "*Averse*" (0.00%, 13.60% et 3.48%) surtout dans le cas de sur-estimation du danger.

Table VI.12 Effets du type d'attitude sur le pourcentage de personnes exposées en croisant les scénarios d'attitudes-types avec les scénarios d'évaluation du danger (dans l'implémentation de la décision "*HOME*").

	Over-estimation	Moderate estimation	Under-estimation
<i>No adaptation</i>	32.97%	32.97%	32.97%
<i>Risk seeker</i>	14.97%	23.50%	31.48%
<i>Risk neutral</i>	11.73%	16.74%	11.67%
<i>Risk averse</i>	0.00%	13.60%	3.48%

La table VI.13 présente les résultats de l'exposition moyenne des personnes exposées qui ne varie pas significativement en fonction des scénarios. Seulement le scénario d'attitude-type "*Averse*" combiné avec une sur-estimation du danger réduit significativement l'exposition moyenne $\overline{Exp_{exposed}} = 0.05$.

Table VI.13 Effets du type d'attitude sur l'exposition moyenne des personnes exposées en croisant les scénarios d'attitudes-types avec les scénarios d'évaluation du danger (dans l'implémentation de la décision "*HOME*").

	Over-estimation	Moderate estimation	Under-estimation
<i>No adaptation</i>	0.67	0.67	0.67
<i>Risk seeker</i>	0.58	0.66	0.66
<i>Risk neutral</i>	0.48	0.62	0.55
<i>Risk averse</i>	0.05	0.61	0.23

La figure VI.12 synthétise les différences entre les 12 combinaisons de scénarios en termes de pourcentages de personnes exposées et de leur exposition moyenne. Nous remarquons logiquement que ce sont globalement les scénarios de sur-estimation du danger et d'attitude-type d'aversion au risque qui présentent le moins d'exposition des automobilistes aux submersions des routes.

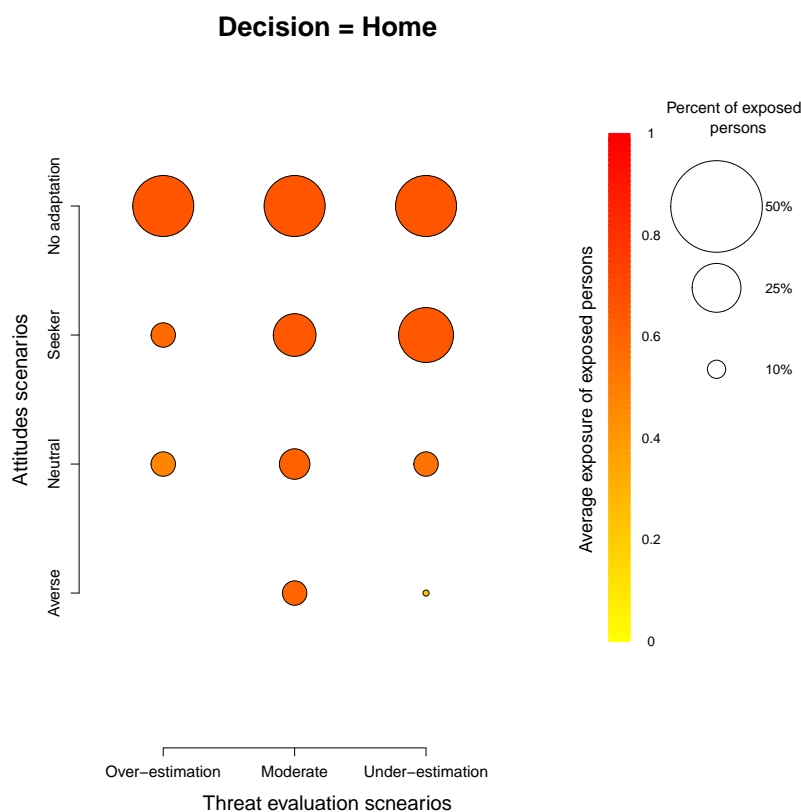


Figure VI.12 Pourcentages de personnes exposées selon l'effet de l'attitude-type et de l'évaluation du danger dans le cas d'une décision d'arrêt ou de retard du déplacement. La taille des points représente le pourcentage de personnes exposées alors que la couleur représente l'exposition moyenne des personnes exposées.

Cette section a permis d'évaluer les effets du croisement des scénarios d'attitudes-types avec les scénarios d'évaluation du danger sur l'exposition des automobilistes dans le cas d'étude d'Alès en implémentant la décision de retour au domicile. Nous examinons dans la partie suivante les résultats de ces combinaisons de scénarios en implémentant les décisions d'arrêt devant les routes submergées et de décalage des horaires de déplacement.

4.2.2 Implémentation des décisions : "STOP" / "DELAY"

La figure VI.13 représente l'exposition moyenne des automobilistes pour les 12 combinaisons de scénarios en prenant en compte les décisions "STOP" et "DELAY". Tout d'abord, nous observons que dans la plupart des scénarios l'exposition moyenne est moins élevée que dans le cas de la décision "HOME". Ensuite, la comparaison des niveaux d'exposition moyenne par combinaison de scénarios montre des tendances similaires à celles retrouvées pour la décision "HOME". Ainsi, l'exposition moyenne la plus élevée correspond au scénario combinant une attitude de type "Seeker" et une sous-estimation du danger ($\overline{Exp}_{Total} = 0.22$) alors que l'exposition moyenne est nulle pour un scénario d'attitude "Seeker" et une sur-estimation du danger.



Figure VI.13 Exposition moyenne selon l'effet de l'attitude-type et de l'évaluation du danger dans le cas d'une décision d'arrêt ou de retard du déplacement

En terme de pourcentages de personnes exposées, nous remarquons que seul le scénario combinant une attitude de type "*Seeker*" et une sous-estimation du danger génère un nombre important de personnes exposées (32.97%) alors que dans les autres scénarios le pourcentage de personnes exposées ne dépasse pas 15% (Table. VI.14). La combinaison d'une attitude-type d'aversion au risque avec une sur-estimation du danger permet d'avoir un nombre négligeable d'automobilistes exposés.

Table VI.14 Effets du type d'attitude sur le pourcentage de personnes exposées en croisant les scénarios d'attitudes-types avec les scénarios d'évaluation du danger (dans l'implémentation des décisions "*STOP/DELAY*").

	Over-estimation	Moderate estimation	Under-estimation
<i>No adaptation</i>	32.97%	32.97%	32.97%
<i>Risk seeker</i>	5.08%	14.85%	32.97%
<i>Risk neutral</i>	8.62%	14.90%	13.38%
<i>Risk averse</i>	0.00%	9.89%	5.13%

En examinant l'exposition moyenne des personnes exposées, nous remarquons que même si les décisions de s'arrêter devant les routes submergées et de retarder les horaires de déplacements permettent de réduire le nombre d'automobilistes exposés, elles ne réduisent

pas significativement leur exposition moyenne. Ceci indique que malgré l'adoption des comportements d'adaptation étudiés, la dangerosité des itinéraires empruntés par certaines personnes ne leur permet pas d'éviter les submersions des routes.

Table VI.15 Effets du type d'attitude sur l'exposition moyenne des personnes exposées en croisant les scénarios d'attitudes-types avec les scénarios d'évaluation du danger (dans l'implémentation des décisions "STOP/DELAY").

	Over-estimation	Moderate estimation	Under-estimation
<i>No adaptation</i>	0.67	0.67	0.67
<i>Risk seeker</i>	0.60	0.54	0.67
<i>Risk neutral</i>	0.59	0.53	0.52
<i>Risk averse</i>	0.02	0.31	0.32

La figure VI.14 synthétise les différences entre les 12 combinaisons de scénarios en termes de pourcentages de personnes exposées et de leur exposition moyenne en implémentant les décisions "STOP" et "DELAY". Nous remarquons que ce sont globalement les scénarios d'attitude-type d'aversion au risque qui présentent le moins d'exposition des automobilistes aux submersions des routes.

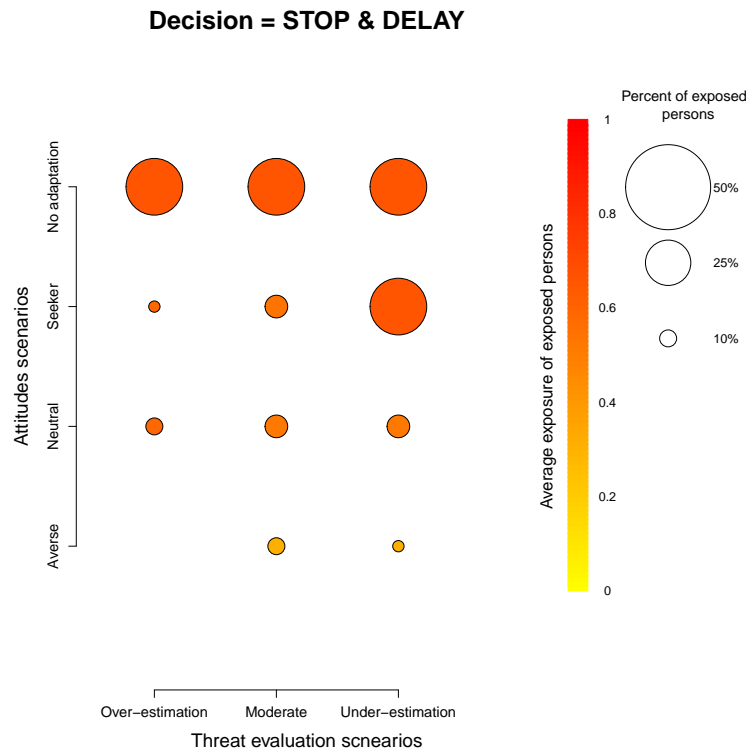


Figure VI.14 Pourcentages de personnes exposées selon l'effet de l'attitude-type et d'évaluation du danger dans le cas d'une décision d'arrêt ou de retard du déplacement. La taille des points représente le pourcentage de personnes exposées alors que la couleur représente l'exposition moyenne des personnes exposées.

4.3 Apports de l'intégration de scénarios d'évaluation du danger

L'intégration des scénarios d'évaluation du danger montre qu'en plus des règles de décisions adoptées par les individus (qui renvoient à des attitudes-types face au risque) les règles d'évaluation du danger ont un effet important sur leur exposition aux submersions des routes. En effet, les résultats présentés dans la section 3 correspondent à une évaluation "objective" du danger en fonction des signes environnementaux perçus (qui correspond au scénario d'évaluation modérée du danger). Les figures VI.15 et VI.16 montrent à quel point la sur-estimation du danger réduit l'exposition des automobilistes pour les deux types de décisions examinées (les traits rouges).

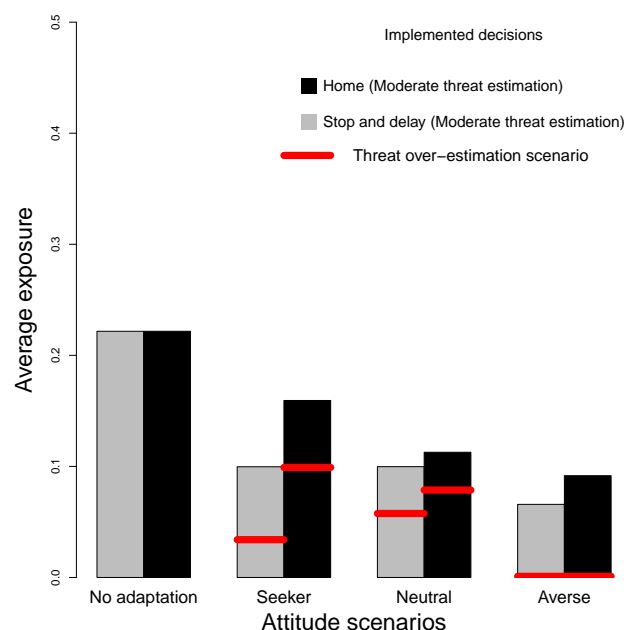


Figure VI.15 Effets de la sur-estimation du danger sur l'exposition moyenne des automobilistes (illustrés en traits rouges) par rapport au scénario d'évaluation objective

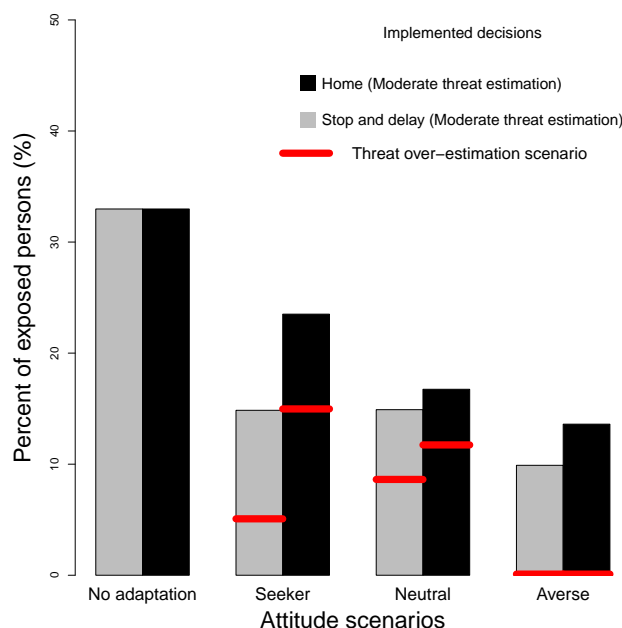


Figure VI.16 Effets de la sur-estimation du danger sur le pourcentage d’automobilistes exposées (illustrés en traits rouges) par rapport au scénario d’évaluation objective

5 Synthèse

L’objectif de l’intégration d’un modèle de décision consiste à évaluer les effets des différents comportements d’adaptation hypothétiques sur l’exposition des automobilistes avec une application expérimentale au cas d’étude d’Alès. Notre objectif était de savoir si les comportements d’adaptation permettent réellement de réduire l’exposition des individus, et si oui, à quel point et quels sont les effets des différentes règles de décisions (exprimant des attitudes face au risque) et de l’évaluation du danger sur l’exposition des automobilistes aux submersions des routes.

5.1 Principaux résultats

Le choix d’un modèle à base de réseau Bayésien nous a permis de tester plusieurs scénarios de comportements en se basant sur des hypothèses établies à partir des résultats des travaux antérieurs sur le sujet. Les résultats de la revue de littérature ont permis d’identifier trois principaux processus qui peuvent jouer un rôle significatif dans la prise de décision d’adaptation de la mobilité en fonction des conditions hydro-météorologiques : l’évaluation du danger associé aux déplacements, l’évaluation de la flexibilité des motifs des déplacements et l’attitude des personnes face au risque. Dans ce chapitre nous avons choisi d’évaluer les effets des attitudes face au risque et du niveau d’évaluation du danger. Pour cela, nous avons

MobRISK comme outil de simulation des comportements d'adaptation des mobilités face à une crise hydro-météorologique

construit quatre scénarios d'attitudes-types qui renvoient aux probabilités que les individus adoptent des comportements d'adaptation en fonction du niveau de danger évalué et de la flexibilité des activités planifiées : "*No Adaptation*", "*Risk Seeker*", "*Risk neutral*" et "*Risk averse*". Ensuite, nous avons introduit des scénarios d'évaluation du danger afin de voir à quel point la sur-estimation ou la sous-estimation du danger peuvent affecter l'exposition des automobilistes.

Pour les différents scénarios d'attitudes et d'évaluation du danger, nous avons choisis de traiter les décisions "*HOME*" et "*STOP / DELAY*" indépendamment et de regarder pour chaque combinaison de scénarios l'exposition moyenne des automobilistes, le pourcentage des personnes exposées et leur exposition moyenne. Nous pouvons résumer les résultats principaux par les points suivants :

- ***Effet de l'attitude-type face au risque :***

⇒ L'adoption de règles de décisions correspondant à une attitude prudente face au risque ("*Risk averse attitude*") réduit de moitié l'exposition moyenne des automobilistes et divise par trois le pourcentage de personnes exposées.

- ***Effet de l'évaluation du danger :***

⇒ La surestimation du danger permet de réduire de moitié l'exposition des automobilistes par rapport à une estimation modérée.

⇒ L'adoption d'une attitude d'aversion au risque avec une sur-estimation du danger permet d'annuler complètement l'exposition des automobilistes.

- ***Effet du type de décision :***

⇒ Les décisions de s'arrêter devant une route submergée ou bien de décaler les déplacements en re-planifiant les activités quotidiennes réduisent plus significativement l'exposition moyenne des automobilistes que de rentrer au lieu de domicile.

⇒ Alors que les décisions implémentées permettent de réduire l'exposition moyenne des automobilistes et le pourcentage de personnes exposées, en focalisant seulement sur l'échantillon de la population exposée on remarque que certaines personnes ne parviennent pas à éviter les submersions des routes vu la dangerosité de leurs itinéraires.

5.2 Limites

- *L'attribution de valeurs arbitraires aux probabilités*

L'utilisation des réseaux Bayésiens pour modéliser les décisions d'adaptation a nécessité la définition de plusieurs paramètres par l'attribution de valeurs de probabilités conditionnelles

qui quantifient les relations entre les variables. Les scénarios construits nous ont permis de tester les effets des valeurs extrêmes. Cependant, il est nécessaire d'effectuer plusieurs tests de sensibilité afin de mieux comprendre les comportements des modèles. Ces tests de sensibilité permettraient de mieux comprendre et de quantifier les interactions entre les variables du modèle de décision et de quantifier la sensibilité du modèle aux différents paramètres utilisés.

- *La calibration du modèle à l'aide de données d'observation :*

Nous avons choisi dans cette première application du modèle de décision de construire différents scénarios en attribuant des valeurs extrêmes dans les tables de probabilités conditionnelles. Même si cette méthode nous a permis de tester des attitudes-types extrêmes, il est nécessaire d'ajuster ces valeurs en se basant sur l'analyse des données d'observation issues des enquêtes de retour d'expérience.

5.3 Perspectives

Nous avons choisi dans cette première application du modèle de décision de partir d'une architecture simple. Cette étape est nécessaire pour mieux maîtriser le fonctionnement du modèle, son intégration dans *MobRISK* et la construction des différents scénarios. Néanmoins, des pistes d'amélioration du modèle sont à explorer au niveau des variables d'entrée à considérer, des décisions à implémenter et des processus de décision à représenter.

- *Variables utilisées :*

Les travaux futurs doivent inclure d'autres variables qui peuvent influencer les décisions de mobilité. Au niveau de l'évaluation du danger, les variables décrivant la hauteur et la vitesse de ruissellement d'eau pourraient être intégrées. Il serait aussi intéressant de prendre en considération les interactions entre les automobilistes qui permettent de représenter les comportements sociaux en situation de crise. Au niveau de l'évaluation de la flexibilité des activités, d'autres variables peuvent être prises en compte telles que le type de profession, la distance à parcourir pour atteindre les lieux d'activités ainsi que le statut familial qui peut rendre les activités d'accompagnement très peu flexible.

Nous avons vu dans la description de l'interface entre le modèle de décision et les autres modules qui constituent *MobRISK*, qu'en plus des variables décrivant l'environnement perçu par les individus, nous avons mis en place des variables d'état qui jouent le rôle d'une mémoire individuelle. Ces variables d'état permettent d'enregistrer les différents signes environnementaux perçus tout au long de la période de l'évènement, le nombre de points de coupure traversés par les automobilistes et les différentes décisions choisies. Ces variables pourraient être exploitées dans les travaux futurs pour représenter, par exemple, l'évolution de l'état

***MobRISK* comme outil de simulation des comportements d'adaptation des mobilités face à une crise hydro-météorologique**

d'anxiété des individus durant la simulation qui peut influencer les décisions.

- Décisions possibles :

Seules les décisions de retour à domicile, de s'arrêter devant les routes submergées et de retarder les activités ont été implémentées et testées dans cette étude. D'autres comportements souvent observés dans les situations d'inondation doivent être intégrés tels que la modification de l'itinéraire ou les parents qui vont chercher leurs enfants pour les protéger. L'implémentation de ces comportements nécessite l'intégration d'autres critères (par exemple le niveau de submersion des routes) dans le choix de routes que la seule minimisation de la durée du trajet, utilisée maintenant dans le modèle.

- Processus d'évaluation :

De la même manière que l'évaluation du danger, l'évaluation de la flexibilité des activités et des motifs de déplacement peut affecter l'exposition des automobilistes. Les travaux futurs doivent tester les effets de cette variable ce qui permettra par exemple de savoir à quel point la réduction des contraintes et des obligations professionnelles permettrait de réduire l'exposition des automobilistes.

Chapitre VII

Conclusion générale et perspectives

1 Conclusion générale

1.1 Rappel des objectifs

Alors que la plupart des données d'impacts humains des évènements hydro-météorologiques extrêmes indiquent qu'une part importante des victimes est liée aux submersions des routes, aucun outil n'est disponible pour évaluer l'exposition des individus aux crues durant leurs mobilités quotidiennes. En effet, la problématique de l'exposition des automobilistes aux crues rapides représente plusieurs défis méthodologiques qui nécessitent le croisement de diverses connaissances issues de différentes disciplines scientifiques. D'une part, une connaissance des dynamiques spatio-temporelles de l'aléa naturel et de la vulnérabilité du réseau routier à cet aléa est nécessaire afin d'identifier les routes sensibles à la submersion lors de ces évènements. D'autre part, il est nécessaire de quantifier le nombre de personnes qui sont susceptibles d'emprunter ces routes durant leurs trajets quotidiens et de prendre en considération les différents comportements d'adaptation qu'ils peuvent adopter lorsqu'ils sont confrontés à des conditions météorologiques défavorables. On retrouve plusieurs travaux scientifiques qui ont traité ces dimensions séparément, notamment en hydro-météorologie, en géographie du transport et en psychologie. Par conséquent, le croisement de ces diverses connaissances permet de proposer une solution pour traiter cette problématique en exploitant les travaux antérieurs effectués par les spécialistes de ces domaines.

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du projet *MobiCLIMEX* qui propose d'adopter une démarche interdisciplinaire pour aborder cette problématique. Le département du Gard est choisi comme terrain d'étude vu la fréquence des évènements de crues rapides dans cette région et la richesse des travaux effectués précédemment dans cette zone pour caractériser l'aléa et la sensibilité du réseau routier aux submersions. L'un des objectifs de ce projet est le développement d'un outil, appelé *MobRISK*, permettant de simuler l'exposition des

Conclusion générale et perspectives

automobilistes aux submersions des routes durant leur mobilité quotidienne. Cette thèse présente les principaux développements théoriques et méthodologiques qui ont accompagné le développement de cet outil, les résultats qu'il permet d'obtenir ainsi que les limites de cet outil. Pour cela, nous avons implémenté une première application dans une zone d'étude du Gard afin d'évaluer l'exposition des automobilistes aux submersions des routes lors des crues rapides survenues les 8 et 9 Septembre 2002.

Les objectifs de ce travail sont d'ordres méthodologiques et applicatifs. Les objectifs méthodologiques concernent la démarche de modélisation adoptée pour aborder cette problématique et l'exploitation des connaissances antérieures sur ce sujet. Nous avons essayé de répondre à la question suivante :

Comment peut-on simuler et évaluer l'exposition des automobilistes aux submersions des routes lors d'événements de crues rapides ?

Notre proposition pour répondre à cette question est décrite dans le **chapitre 2**, qui reprend les travaux antérieurs exploités dans cette étude, et le **chapitre 3** qui décrit en détail le modèle *MobRISK* proposé comme un outil informatique développé spécialement pour simuler l'exposition des automobilistes en cas de crue.

Les objectifs applicatifs de cette thèse concernent l'utilisation de *MobRISK* pour le cas d'étude sélectionné afin de répondre à ces deux questions :

- Comment peut-on quantifier et caractériser l'exposition des automobilistes aux submersions des routes lors de l'événement de crue rapide des 8 et 9 Septembre 2002 ?

- Quels sont les effets des décisions d'adaptation des comportements de mobilité face aux conditions hydro-météorologiques extrêmes sur cette exposition ?

Nos réponses à la première question ont été présentées dans les **chapitres 4 et 5** alors que la deuxième question fait l'objet du **chapitre 6**.

Nous allons rappeler dans la section suivante les principaux résultats obtenus dans les différents chapitres de la thèse.

1.2 Principaux résultats

Base théorique et méthodologique pour la construction du modèle MobRISK

Le chapitre 2 aborde l'exposition des automobilistes aux événements de crues rapides dans le département du Gard. Il souligne la nécessité de mettre en place un outil qui permette d'estimer l'exposition dynamique associée aux mobilités quotidiennes qui, malgré les enjeux qu'elle représente, est souvent négligée au profit de l'évaluation de l'exposition statique liée aux zones bâties. Nous avons vu que le développement d'un tel outil nécessite le croisement de trois principales dimensions : l'estimation de la submersions des routes, la simulation de la mobilité routière quotidienne et la modélisation des processus de prise de décision face au risque. La revue de littérature concernant ces trois dimensions nous a permis d'identifier les approches et les méthodes qui sont les plus adaptées à notre problématique. Ainsi, nous avons choisi :

- de nous baser sur les travaux et les résultats de Versini (2007) et Naulin (2012) dans l'estimation des probabilités de submersion du réseau routier du Gard.
- d'adopter une approche "*activity-based*" dans la modélisation de la mobilité quotidienne pour simuler les déplacements routiers à l'échelle individuelle et prendre en considération les motifs et motivations des déplacements selon les catégories socio-démographiques.
- d'utiliser la technique des réseaux Bayésiens dans la modélisation des processus de prise de décision à travers la construction de scénarios de comportements.

Ces choix ont constitué une base théorique et méthodologique pour la construction du modèle *MobRISK*.

Description de l'architecture et du fonctionnement de MobRISK

Le chapitre 3 est consacré à la description de l'architecture du modèle *MobRISK* et du fonctionnement des différents modules qui le composent. Nous avons vu que *MobRISK* est composé de trois modules principaux qui renvoient aux trois dimensions de modélisation identifiées précédemment. Il s'appuie sur un simulateur à événements discrets qui permet de représenter les changements d'états des éléments de l'environnement étudié. Six événements ont été définis : submersion des routes ("*Submersion events*"), déplacement des individus ("*Agent-move events*"), traversé de points de coupure ("*Bottleneck events*"), fin d'activité ("*Activity-end events*"), perception de signes environnementaux ("*Environmental cue events*") et réception d'information de vigilance ("*Broadcast events*"). Chacun de ces événements renvoie à une modification des caractéristiques de l'environnement des individus et les quatre derniers impliquent l'évaluation de la nouvelle situation et une prise de décision d'adaptation

Conclusion générale et perspectives

des comportements de mobilité. Ce chapitre contient aussi une description des données d'entrée nécessaires pour le fonctionnement du modèle. Ces données sont structurées dans une base de données relationnelle combinant les données sociales (décrivant les caractéristiques socio-démographiques des individus, la composition de leur ménage et leurs programmes d'activités) avec les données spatiales (localisation des zones d'activités, localisation des points de coupure, niveaux des précipitations...). Ce chapitre se termine par une description du cas d'étude choisi dans le cadre de cette thèse en décrivant la zone d'étude sélectionnée (regroupant 61 communes situées dans le nord-ouest du département du Gard) et l'évènement de crue rapide des 8-9 Septembre 2002.

MobRISK comme outil de simulation de la mobilité routière en cas de crue

Le chapitre 4 présente les résultats de l'application de *MobRISK* pour simuler les mobilités routières de la population de la zone d'étude durant la période de l'évènement de 2002. Nous avons utilisé les techniques d'analyse des dissimilarités entre les séquences afin d'attribuer des programmes d'activités aux individus en fonction de leurs caractéristiques socio-démographiques. Les résultats obtenus montrent que les variables socio-démographiques sélectionnées (âge, genre, statut professionnel, profession, niveau d'éducation et nombre d'enfants dans le ménage) ont des effets significatifs sur les dissimilarités entre les séquences d'activités et que ces effets sont moins importants pour les jours de weekend. L'analyse par arbre de régression nous a permis d'identifier huit profils d'emplois du temps pour les jours de semaine et six profils pour les jours de weekend. Ces profils ont été utilisés pour attribuer des emplois du temps aux individus en fonction de leurs caractéristiques socio-démographiques. Nous avons proposé une méthode d'évaluation des règles d'attribution. Cette dernière a montré que ces règles sont plus performantes pour les jours de semaine que pour les jours de weekend. Enfin, *MobRISK* a été utilisé afin de simuler la mobilité de la population de la zone d'étude sur la période de l'évènement à l'échelle des nœuds routiers. La cartographie du trafic simulé montre une concentration des déplacements aux alentours de la ville d'Alès. Nous avons évalué la mobilité simulée en comparant le trafic simulé avec les données de comptage routier et les durées de trajets simulés avec celles des données ENT-D. Les résultats de l'évaluation affichent globalement une sous-estimation du trafic et des durées de trajets parcourus qui semble résulter principalement des règles utilisées dans la localisation des zones d'activités secondaires.

MobRISK comme outil de simulation de l'exposition des automobilistes aux submersions de routes

Le chapitre 5 est consacré à l'utilisation de *MobRISK* pour simuler l'exposition des automobilistes aux submersions des routes lors de l'évènement de 2002 sans l'intégration des

décisions d'adaptation. Nous avons identifié un décalage entre les dynamiques temporelles du trafic simulé au niveau des points de coupures et des niveaux de submersion de ces points. Ce décalage a minimisé considérablement le nombre de personnes exposées aux routes submergées, ce qui a probablement constitué un facteur de réduction du nombre de victimes sur la route. Nous avons alors proposé un indice qui permet de mesurer le nombre de personnes en danger en combinant le nombre de personnes qui traversent les points de coupure et les probabilités de submersions de ces points. La distribution spatiale de cet indice montre une concentration en terme de danger au niveau des axes routiers principaux : la D6110, la N106 et la D981. Lors de l'évènement de 2002, une seule victime a été enregistrée dans notre zone d'étude. La géo-localisation de cet accident fatal indique la cohérence de cet indice puisque la section de route concernée affiche un indice de danger très élevé.

Enfin, nous avons examiné les effets des variables socio-démographiques sur les niveaux d'exposition individuels. L'exposition est définie ici comme la probabilité de traverser une route submergée lors des trajets parcourus durant toute la période de l'évènement. Les résultats obtenus ont montré une sur-exposition des actifs dans la catégorie d'âge de 30 à 45 ans aux submersions des routes. Ceci s'explique principalement par la longueur des itinéraires de cette catégorie d'individus. Ces résultats sont en cohérence avec ceux issus des travaux antérieurs sur l'exposition sociale aux inondations cités dans le chapitre II. De plus, ceci indique que la sur-exposition de cette catégorie de population peut être expliquée seulement par ses comportements de mobilité quotidienne, sans même prendre en considération ses comportements face au risque.

MobRISK comme outil de simulation des décisions d'adaptation des comportements de mobilité

Le chapitre 6 présente les résultats issus de l'intégration du module de prise de décisions en situation de crise dans l'estimation de l'exposition des automobilistes. Dans le chapitre 2, la revue des méthodes existantes pour modéliser les décisions nous a orienté vers l'utilisation des réseaux Bayésiens qui semblent la plus adaptée à notre problématique. La structure du modèle de décision a été définie à partir de la revue de littérature et des connaissances acquises par l'équipe de recherche LTHE-PACTE depuis 2004. Le modèle a été décliné en quatre versions prenant en compte les différents types de décisions possibles selon le type d'évènement déclencheur : "*Bottleneck*", "*Activity-end*", "*Environmental cue*" ou "*Broadcast*". Les décisions d'adaptation sont considérées dépendantes de deux variables principales : l'évaluation du danger (qui dépend des signes environnementaux perçus) et le niveau de flexibilité des activités (qui dépend du type d'activité). L'approche adoptée dans l'utilisation des modèles de décision consiste à construire différents scénarios de décision et à évaluer les effets de ces scénarios sur l'exposition des automobilistes. Nous avons mis en

Conclusion générale et perspectives

place des scénarios d'attitudes-types (en différenciant quatre niveaux d'attitude vis à vis de la prise de risque) et des scénarios d'évaluation du danger (en fonction de la sur-estimation ou la sous-estimation du danger associé aux signes environnementaux perçus par les individus). Pour chaque scénario, nous avons implémenté séparément les décisions "*HOME*" et "*STOP*"/"*DELAY*". Les résultats obtenus montrent que l'adoption d'une attitude prudente face au danger perçu réduit considérablement l'exposition moyenne des automobilistes et le pourcentage de personnes exposées. De la même manière, la sur-estimation du danger permet de réduire l'exposition. Le croisement de ces deux paramètres montre que l'adoption d'une attitude-type d'aversion au risque combinée avec une sur-estimation du danger permet d'annuler complètement l'exposition des automobilistes. Enfin, la comparaison des effets des différentes décisions implémentées indique que les décisions de s'arrêter face à une route submergée et de décaler les horaires des déplacements ("*STOP*"/"*DELAY*") réduisent plus significativement l'exposition des automobilistes que la décision de rentrer au lieu de domicile ("*HOME*").

L'application de *MobRISK* dans le cas d'étude présenté dans cette thèse a permis d'obtenir des résultats encourageants en termes de caractérisation des dynamiques spatio-temporelles de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes et de l'évaluation des effets des décisions d'adaptation des comportements de mobilité sur l'exposition de la population. Vu qu'une grande partie de ce travail de thèse était consacrée à la contribution au développement de l'outil, plusieurs perspectives d'amélioration et d'exploitation de ses potentialités restent à explorer.

2 Perspectives

Les perspectives de ce travail de thèse concernent deux aspects : i) l'amélioration de *MobRISK* en se basant sur les limites identifiées dans cette première application ; ii) l'exploitation des potentialités de *MobRISK* qui n'ont pas pu être explorées dans le cas d'étude présenté.

2.1 Améliorations du modèle *MobRISK*

Les améliorations à apporter à *MobRISK* concernent trois points principaux : la simulation de la mobilité quotidienne, la métrique proposée pour mesurer l'exposition des automobilistes et les paramètres utilisés dans le modèle de décision.

Au niveau de la simulation de la mobilité

- *Méthode d'attribution des programmes d'activités :*

Le choix de suivre une approche "*activity-based*" dans la modélisation de la mobilité nous a conduit à utiliser une méthode d'attribution de programmes d'activités aux individus en fonction de leurs caractéristiques socio-démographiques. Afin de prendre en considération le caractère séquentiel des emplois du temps, nous avons exploité les techniques d'analyse de séquences et plus particulièrement la méthode d'analyse de dissimilarités entre les séquences. Même si cette méthode nous a permis d'extraire des classes de séquences d'activités en fonction des profils socio-démographiques, l'évaluation des règles d'attribution a montré certaines limites qui concernent surtout les programmes d'activités des jours de weekend. Cela souligne la nécessité de prendre en considération d'autres variables, tels que le type de la commune de résidence des individus (rural ou urbain), qui peuvent mieux expliquer les différences entre les emplois du temps quotidiens.

De plus, même si le choix d'une approche par attribution de programmes d'activités permet de conserver la complexité des emplois du temps, cette méthode présente certaines contraintes et une certaine rigidité par rapport aux méthodes de simulation de programmes d'activités utilisées le plus souvent dans les modèles "*activity-based*". Ces dernières permettent, par exemple, de construire différents scénarios de mobilité.

- *Localisation des zones d'activités :*

Dans cette première application de *MobRISK*, la localisation des zones d'activités est basée sur des règles simples passant par la définition de différents "*buffer*" autour des chefs lieux des communes de résidence. Nous avons vu à travers l'évaluation des durées de trajets simulés que les tailles de buffers utilisés ont eu pour effet de réduire considérablement les distances parcourues. Ceci implique probablement une réduction du niveau d'exposition des automobilistes qui semble être corrélée aux longueurs des itinéraires parcourus (Debionne et al., 2016). Nous pensons ainsi que l'amélioration de la localisation des zones d'activités est une priorité pour l'amélioration de *MobRISK*. Deux pistes sont à explorer pour aborder cette question. La première consiste à effectuer des analyses statistiques à partir des données ENTND ou EMD afin d'identifier les distributions des distances parcourues par types d'activités en fonction de différentes variables individuelles (caractéristiques socio-démographiques, types de communes...). Ceci permettra d'extraire des règles plus fines dans la définition des espaces d'activités. La deuxième piste consiste à exploiter la base de données Sirene qui contient les localisations de différentes entreprises selon leurs secteurs d'activités à l'échelle de la commune.

- *Critères de choix de routes :*

La modélisation des choix de route dans *MobRISK* est basée uniquement sur le critère du chemin le plus court en temps. Ceci peut expliquer la sous-estimation des durées des trajets simulés par rapport aux durées de trajets observés à partir des enquêtes *ENTND*. Afin de donner plus de réalisme au processus de choix de routes, la théorie de l'utilité

Conclusion générale et perspectives

aléatoire proposée par McFadden (1980) peut être exploitée en introduisant une part d'aléatoire dans le choix de route qui peut rendre compte de la rationalité limitée des automobilistes.

- *Co-voiturage :*

Le co-voiturage n'a pas été pris en compte dans cette première utilisation de *MobRISK*. Ainsi, chaque automobiliste est considéré tout seul dans son véhicule. Étant une pratique de plus en plus adoptée par les individus qui appartiennent au même ménage ou qui partagent des itinéraires similaires, le co-voiturage pourrait être introduit dans la simulation des mobilités routières. De plus, ceci permettrait la prise en considération des interactions entre les individus dans la prise de décision d'adaptation en intégrant les contraintes liées au partage du moyen de transport.

- *La congestion et l'interaction entre les automobilistes :*

Nous avons vu que les paramètres de congestion et d'ajustement des vitesses des véhicules en fonction du nombre de véhicules sur la route n'ont pas été intégrés dans la dernière version de *MobRISK* (version 2.1). Ce choix a été adopté afin de faciliter l'interprétation des effets des règles de décision sur l'exposition des automobilistes. Les prochaines applications de *MobRISK* devraient alors intégrer ces paramètres qui représentent une forme d'interaction entre les automobilistes. En effet, seuls les signes environnementaux ont été considérés comme facteurs externes agissant sur les décisions des automobilistes. Il serait intéressant d'intégrer les signes sociaux à travers la perception des comportements des autres automobilistes sur la route.

Au niveau de la mesure de l'exposition

Les travaux de Versini (2007) et Naulin (2012) nous ont permis d'attribuer des probabilités de submersion aux points de coupure identifiés en fonction des débits simulés à l'endroit du point de coupure. Ceci nous a contraint à définir l'exposition des automobilistes comme la probabilité de traverser une route submergée. Cependant, cette mesure ne prend pas en considération ni la hauteur ni la vitesse de ruissellement sur les routes. Or ces informations permettraient d'avoir une estimation plus fine du niveau de danger auquel les automobilistes s'exposent. De plus, l'intégration de ces variables permettrait d'éviter la transformation arbitraire des probabilités de submersion en un niveau de danger utilisée dans le modèle de décision.

Au niveau du développement du modèle de décision

- *Évaluation des paramètres :*

L'utilisation de la technique des réseaux Bayésiens dans la construction du modèle de décision

a nécessité l'identification des variables qui interviennent dans l'adaptation des comportements de mobilité ainsi que la mise en place de différents paramètres qui quantifient les rapports de causalité entre ces variables. Cette approche nous a permis d'exploiter des connaissances et des postulats issus de travaux antérieurs et de les structurer sous forme de règles de décisions. Cependant, les choix arbitraires des valeurs de probabilités conditionnelles constituent une limite dans l'adoption de cette technique. Il serait nécessaire alors de valider ces paramètres et de les évaluer à l'aide des données issues d'enquêtes de retour d'expérience collectées spécifiquement dans un objectif de calibration du modèle.

- *Implémentation d'autres décisions :*

Seules trois décisions d'adaptation ont été explorées dans cette étude : rentrer chez soi, s'arrêter devant une route submergée et décaler ses horaires de déplacement. D'autres décisions identifiées dans le chapitre 2 devraient être ajoutées telles que le changement d'itinéraire et le fait d'aller rejoindre des membres de la famille. Ceci permettrait d'évaluer les effets de ces dernières décisions sur l'exposition des automobilistes.

2.2 Exploitation des potentialités du modèle *MobRISK*

Application sur tout le département du Gard

Le cas d'étude présenté dans cette thèse a permis de stabiliser la deuxième version de *MobRISK* qui intègre les dynamiques des processus hydro-météorologique, des mobilités quotidiennes et des décisions d'adaptation des déplacements aux conditions de crise. Les résultats obtenus ont montré les potentialités de l'outil dans l'évaluation de l'exposition des automobilistes aux submersions des routes et d'identifier les pistes permettant de surmonter les limites du modèle. Une troisième version de l'outil est en cours de développement. Elle tient compte des différentes limites identifiées dans le but d'appliquer *MobRISK* à l'échelle du département du Gard. Ceci permettra d'étendre l'analyse à l'ensemble du département dont la presque totalité a été affectée par l'épisode de Septembre 2002. Ce changement d'échelle permettra également d'évaluer la pertinence des résultats au regard de la localisation et la temporalité des autres accidents fatals liés aux déplacements routiers lors de cette catastrophe.

Exploration d'autres scénarios de comportements

Deux types de scénarios de comportements ont été explorés : les scénarios d'attitudes-types (qui renvoient aux règles de décision adoptées par les individus face à un danger perçu) et les scénarios d'évaluation du danger en fonction des signes environnementaux perçus. Ces scénarios ont permis de montrer un effet significatif de ces deux paramètres sur l'exposition des automobilistes. Cependant, la structure du modèle permet d'explorer d'autres scénarios, en regardant par exemple les effets de l'évaluation de la flexibilité des motifs de déplacement. Une autre piste consisterait à attribuer des attitudes-types aux individus en fonction de leurs

Conclusion générale et perspectives

caractéristiques socio-démographiques. Nous avons vu dans le chapitre II que la majorité des études effectuées sur les comportements des individus face aux risques naturels, et plus particulièrement la conduite des véhicules en situation d'inondation, montrent que les hommes et les jeunes ont souvent des attitudes d'aversion au risque moins marquées que les autres profils. Ce postulat pourrait être testé dans *MobRISK* en attribuant plus de probabilités aux hommes et aux personnes jeunes d'avoir une attitude "*Risk seeker*" et évaluer les effets de cette distinction sur l'exposition.

Exploration d'autres scénarios de crues

Pour cette première application de *MobRISK*, nous avons choisi d'étudier l'évènement des 8-9 Septembre 2002 vu l'intensité des dégâts qu'il a causé et l'étendue spatiale des zones impactées, faisant de lui un évènement de référence. Nous avons vu que les pics de dangers par submersion des routes correspondaient à des horaires où le trafic était réduit. Ainsi la dynamique temporelle de l'aléa a participé à réduire le nombre d'automobilistes exposées aux submersions des routes. Cependant, du point de vue spatial, l'évènement étudié a touché une large partie du réseau routier de la zone d'étude incluant les principaux axes routiers reliant Alès avec les autres villes du département du Gard. Il serait intéressant d'étudier plus en détail le croisement entre les dynamiques spatio-temporelles de l'aléa et des déplacements routiers individuels. Ceci pourrait être abordé soit en considérant d'autres évènements de crues rapides présentant des dynamiques spatio-temporelles différentes, soit en modifiant certaines caractéristiques de l'évènement de référence de 2002, par exemple la temporalité des submersions, pour évaluer les effets de ces modifications sur l'exposition des automobilistes.

Exploration de différents scénarios d'alerte

Les questions de la temporalité de l'alerte, de la vigilance et du type d'information à communiquer à la population sont de plus en plus soulevées dans les études sur la protection des populations contre les inondations. *MobRISK* offre la possibilité de construire différents scénarios d'alerte en modifiant les horaires des alertes ainsi que l'échelle spatiale à laquelle celle-ci est donnée. Cela permettrait d'évaluer les effets de ces modifications sur l'exposition des automobilistes.

Connexion avec la mobilité résidentielle

Outre l'étude des dynamiques sociales à travers la mobilité quotidienne, une autre échelle temporelle de mobilité est explorée dans le cadre du projet *MobiCLIMEX* qui concerne la mobilité résidentielle. Il s'agit ici d'étudier les choix résidentiels dans des zones inondables à travers l'analyse de l'occupation des sols et de l'évolution de la législation et son application locale en matière d'aménagement des zones inondables. Un modèle de mobilité résidentielle a été développé dans le cadre de cette tâche du projet afin de comprendre les dynamiques spatiales de la population du Gard. La connexion de ce modèle de mobilité résidentielle avec

MobRISK est à envisager pour les travaux futurs afin d’explorer les interactions entre ces deux échelles de dynamiques sociales et les évènements de crues rapides.

Intégrer l’exposition immobile

Comme mentionné dans le Chapitre 2, les méthodes classiques utilisées dans l’évaluation de l’exposition sociale aux inondations ne prennent généralement pas en compte l’exposition des individus pendant leurs trajets. La spécificité de notre travail de thèse consiste à mettre en lumière cette partie de l’exposition qui, malgré les enjeux qu’elle présente, n’a pas encore été abordée principalement à cause des défis méthodologiques qu’elle soulève. Puisque *MobRISK* permet de fournir une localisation de la population mobile, il serait possible de compléter l’évaluation de l’exposition de la population en intégrant la partie statique manquante. Pour cela, il faudrait prendre en compte le niveau de submersion des différents lieux d’activités. De récents travaux en hydrologie conduits à l’IFSTTAR s’intéressent à cette problématique dans le but de proposer des indices d’exposition aux crues rapides en fournissant des simulations de la hauteur d’eau et du niveau de ruissellement pour des évènements passés dans le Gard (Le Bihan et al., 2015). Des collaborations avec les auteurs de ces travaux sont envisagées.

Vers une démarche opérationnelle...

Même si le projet *MobiCLIMEX* ne s’inscrit pas dans le cadre d’une démarche opérationnelle, la problématique abordée présente des enjeux importants pour les autorités locales. Plusieurs choix dans le développement de *MobRISK* ont été guidés par la possibilité d’en faire un outil permettant de fournir aux gestionnaires des routes et aux responsables des opérations de secours des informations qui peuvent être utiles en cas d’évènements de crues rapides. En effet, *MobRISK* permet d’identifier les routes qui présentent le plus de danger en termes de risque de submersion et d’estimer la quantité et le profil des personnes concernées par ce danger. À l’automne 2015, nous avons eu l’occasion de présenter l’outil et ses potentialités à certains responsables de services de la Direction départementale des territoires et de la mer du Gard (*DDTM30*) et du Centre d’études et d’expertise sur les risques, l’environnement, la mobilité et l’aménagement (*CEREMA*). Ceux-ci ont exprimé tout l’intérêt qu’ils voyaient à ce modèle qui leur permettrait de compléter leur connaissance de l’exposition statique par celle de l’exposition des personnes en situation de mobilité.

Assurer la pérennité de l’outil

Afin d’assurer la pérennité de l’outil, le code source de *MobRISK* a été intégré dans la plateforme *SourceSup*¹, plateforme web de gestion de projets à destination de l’enseignement supérieur et des laboratoires de recherche français. Cette plateforme est opérée par *RENA-TER* : le Réseau National de Télécommunications pour la Technologie, l’Enseignement et

1. <https://sourcesup.renater.fr/mobrisk/>

Conclusion générale et perspectives

la Recherche. Ceci a nécessité un travail de collaboration et d'interaction continue avec les ingénieurs chargés du développement informatique de l'outil. Pour cela, une documentation détaillée de l'outil sous la forme d'un tutoriel adressé aux futurs utilisateurs potentiels a été mise en place. Ce tutoriel reprend toutes les étapes nécessaires pour reproduire les simulations et les analyse présentées dans cette thèse allant de l'acquisition et le pré-traitement des données jusqu'au post-traitement. Ceci s'inscrit dans le cadre d'une démarche de recherche transparente et reproductible.

Bibliographie

- Abbott, A. and Forrest, J. (1986). Optimal matching methods for historical sequences. *The Journal of Interdisciplinary History*, 16(3) :471–494.
- Abdel-Aty, M. A., Kitamura, R., and Jovanis, P. P. (1997). Using stated preference data for studying the effect of advanced traffic information on drivers' route choice. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 5(1) :39–50.
- Abramovich, Y. A., Aliprantis, C. D., and Burkinshaw, O. (1995). Another characterization of the invariant subspace problem. *Operator Theory in Function Spaces and Banach Lattices. The A.C.Zaanen Anniversary Volume, Operator Theory : Advances and Applications*, 75 :15–31. Birkhäuser Verlag.
- Akar, G. and Clifton, K. (2009). Influence of individual perceptions and bicycle infrastructure on decision to bike. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2140) :165–172.
- Al Hassan, Y. and Barker, D. J. (1999). The impact of unseasonable or extreme weather on traffic activity within lothian region, scotland. *Journal of Transport Geography*, 7(3) :209–213.
- An, L. (2012). Modeling human decisions in coupled human and natural systems : review of agent-based models. *Ecological Modelling*, 229 :25–36.
- Anderson, M. J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral ecology*, 26(1) :32–46.
- André-Poyaud, I., Chardonnel, S., Charleux, L., and Tabaka, K. (2016). Mobility & activity patterns of individuals and parenting couples in the metropolitan area of grenoble (france).
- Andrey, J., Hambly, D., Mills, B., and Afrin, S. (2013). Insights into driver adaptation to inclement weather in canada. *Journal of Transport Geography*, 28 :192–203.
- Anquetin, S., Braud, I., Vannier, O., Viallet, P., Boudevillain, B., Creutin, J.-D., and Manus, C. (2010). Sensitivity of the hydrological response to the variability of rainfall fields and soils for the gard 2002 flash-flood event. *Journal of hydrology*, 394(1) :134–147.
- Antoine, J.-M., Desailly, B., and Gazelle, F. (2001). Les crues meurtrières, du roussillon aux cévennes/casualty-causing flood : from the roussillon region to the cevennes country. In *Annales de géographie*, pages 597–623. JSTOR.
- Arentze, T. A. and Timmermans, H. J. (2004). A learning-based transportation oriented simulation system. *Transportation Research Part B : Methodological*, 38(7) :613–633.
- Ashley, S. T. and Ashley, W. S. (2008). Flood fatalities in the united states. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(3) :805–818.

Bibliographie

- Barrett, C., Berkgigler, K., Smith, L., Loose, V., Beckman, R., Davis, J., Roberts, D., and Williams, M. (1995). An operational description of transims. Technical report, Los Alamos National Lab., NM (United States).
- Beckx, C., Panis, L. I., Arentze, T., Janssens, D., Torfs, R., Broekx, S., and Wets, G. (2009). A dynamic activity-based population modelling approach to evaluate exposure to air pollution : methods and application to a dutch urban area. *Environmental Impact Assessment Review*, 29(3) :179–185.
- Bekhor, S., Ben-Akiva, M. E., and Ramming, M. S. (2006). Evaluation of choice set generation algorithms for route choice models. *Annals of Operations Research*, 144(1) :235–247.
- Ben-Akiva, M. and Bierlaire, M. (1999). Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions. In *Handbook of transportation science*, pages 5–33. Springer.
- Berdica, K. (2002). An introduction to road vulnerability : what has been done, is done and should be done. *Transport policy*, 9(2) :117–127.
- Bhat, C. R. and Misra, R. (1999). Discretionary activity time allocation of individuals between in-home and out-of-home and between weekdays and weekends. *Transportation*, 26(2) :193–229.
- Böcker, L., Dijst, M., and Prillwitz, J. (2013). Impact of everyday weather on individual daily travel behaviours in perspective : a literature review. *Transport reviews*, 33(1) :71–91.
- Bohle, H.-G. (2001). Vulnerability and critacility : Perspectives from social geography. *Newsteller of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change*, IHDP Update(2/2001) :1–7.
- Botzen, W., Aerts, J., and Van Den Bergh, J. (2009). Dependence of flood risk perceptions on socioeconomic and objective risk factors. *Water Resources Research*, 45(10).
- Branger, F., Braud, I., Debionne, S., Viallet, P., Dehotin, J., Henine, H., Nedelec, Y., and Anquetin, S. (2010). Towards multi-scale integrated hydrological models using the liquid® framework. overview of the concepts and first application examples. *Environmental Modelling & Software*, 25(12) :1672–1681.
- Braud, I., Roux, H., Anquetin, S., Maubourguet, M.-M., Manus, C., Viallet, P., and Dartus, D. (2010). The use of distributed hydrological models for the gard 2002 flash flood event : Analysis of associated hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 394(1) :162–181.
- Cardona, O. D. (1999). Environmental management and disaster prevention : Two related topics : A holistic risk assessment and management approach. *Natural disaster management*, pages 151–153.
- Chapin, F. S. (1974). *Human activity patterns in the city : things people do in time and in space*, volume 13. Wiley-Interscience.
- Chung, E., Ohtani, O., Warita, H., Kuwahara, M., and Morita, H. (2005). Effect of rain on travel demand and traffic accidents. In *Proceedings. 2005 IEEE Intelligent Transportation Systems, 2005.*, pages 1080–1083. IEEE.
- Coates, L. (1999). Flood fatalities in australia, 1788-1996. *Australian Geographer*, 30(3) :391–408.

- Coenen-Huther, J. (2003). Le type idéal comme instrument de la recherche sociologique. *Revue française de sociologie*, 44(3) :531–547.
- Cools, M. and Creemers, L. (2013). The dual role of weather forecasts on changes in activity-travel behavior. *Journal of Transport Geography*, 28 :167–175.
- Créton-Cazanave, L., Lutoff, C., et al. (2013). Stakeholders' issues for action during the warning process and the interpretation of forecasts' uncertainties. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(6) :1469–1479.
- Creutin, J.-D. and Borga, M. (2003). Radar hydrology modifies the monitoring of flash-flood hazard. *Hydrological processes*, 17(7) :1453–1456.
- Creutin, J. D., Borga, M., Grunfest, E., Lutoff, C., Zoccatelli, D., and Ruin, I. (2013). A space and time framework for analyzing human anticipation of flash floods. *Journal of Hydrology*, 482 :14–24.
- Creutin, J. D., Borga, M., Lutoff, C., Scolobig, A., Ruin, I., and Créton-Cazanave, L. (2009). Catchment dynamics and social response during flash floods : the potential of radar rainfall monitoring for warning procedures. *Meteorological Applications*, 16(1) :115–125.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., and Shirley, W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social science quarterly*, 84(2) :242–261.
- Damm, D. and Lerman, S. R. (1981). A theory of activity scheduling behavior. *Environment and Planning A*, 13(6) :703–718.
- Dawson, R. J., Peppe, R., and Wang, M. (2011). An agent-based model for risk-based flood incident management. *Natural Hazards*, 59(1) :167–189.
- Debionne, S., Ruin, I., Shabou, S., Lutoff, C., and Creutin, J.-D. (2016). Assessment of commuters' daily exposure to flash flooding over the roads of the gard region, france. *Journal of Hydrology*.
- Delrieu, G., Nicol, J., Yates, E., Kirstetter, P.-E., Creutin, J.-D., Anquetin, S., Obled, C., Saulnier, G.-M., Ducrocq, V., Gaume, E., et al. (2005). The catastrophic flash-flood event of 8-9 september 2002 in the gard region, france : A first case study for the cevennes-vivarais mediterranean hydrometeorological observatory. *Journal of Hydrometeorology*, 6(1) :34–52.
- Demeritt, D., Nobert, S., Cloke, H., and Pappenberger, F. (2010). Challenges in communicating and using ensembles in operational flood forecasting. *Meteorological applications*, 17(2) :209–222.
- Diakakis, M. and Deligiannakis, G. (2013). Vehicle-related flood fatalities in greece. *Environmental Hazards*, 12(3-4) :278–290.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1) :269–271.
- Dijst, M., Böcker, L., Kwan, M.-P., et al. (2013). Exposure to weather and implications for travel behaviour : introducing empirical evidence from europe and canada. *Journal of transport geography*, 28 :164–166.
- Drabek, T. E. (1999). Understanding disaster warning responses. *The Social Science Journal*, 36(3) :515–523.

Bibliographie

- Duclos, P., Vidonne, O., Beuf, P., Perray, P., and Stoebner, A. (1991). Flash flood disaster-nîmes, france, 1988. *European journal of epidemiology*, 7(4) :365–371.
- D’Este, G. and Taylor, M. (2003). Network vulnerability : an approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks. *The network reliability of transport*, pages 23–44.
- Elias, W., Newmark, G., and Shiftan, Y. (2008). Gender and travel behavior in two arab communities in israel. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2067(2067) :75–83.
- Ettema, D. and van der Lippe, T. (2009). Weekly rhythms in task and time allocation of households. *Transportation*, 36(2) :113–129.
- Fekete, A. (2009). Validation of a social vulnerability index in context to river-floods in germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2) :393–403.
- Fosgerau, M. (2002). Petra—an activity-based approach to travel demand analysis. In *National Transport Models*, pages 134–145. Springer.
- Fosset, P., Banos, A., Beck, E., Chardonnel, S., Lang, C., Marilleau, N., Piombini, A., Leysens, T., Conesa, A., Andre-Poyaud, I., et al. (2016). Exploring intra-urban accessibility and impacts of pollution policies with an agent-based simulation platform : Gamirod. *Systems*, 4(1) :5.
- French, J., Ing, R., Von Allmen, S., and Wood, R. (1983). Mortality from flash floods : a review of national weather service reports, 1969-81. *Public Health Reports*, 98(6) :584.
- Fujimoto, R. M. (2000). *Parallel and distributed simulation systems*, volume 300. Wiley New York.
- Gabardinho, A., Ritschard, G., Mueller, N. S., and Studer, M. (2011). Analyzing and visualizing state sequences in r with traminer. *Journal of Statistical Software*, 40(4) :1–37.
- Gärling, T., Kwan, M.-p., and Golledge, R. G. (1994). Computational-process modelling of household activity scheduling. *Transportation Research Part B : Methodological*, 28(5) :355–364.
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., et al. (2009). A compilation of data on european flash floods. *Journal of Hydrology*, 367(1) :70–78.
- Gaume, E. and Bouvier, C. (2004). Analyse hydro-pluviométrique des crues du gard et du vidourle des 8 et 9 septembre 2002. *La Houille Blanche*, (6) :99–106.
- Gaume, E., Payrastre, O., and Rosa da Silva, B. (2003). Analyse hydrologique des crues des 8 et 9 septembre 2002 dans le gard. *Ministère de l’écologie et du développement durable*, page 95.
- Gauthier, J.-A., Widmer, E. D., Bucher, P., and Notredame, C. (2009). How much does it cost ? optimization of costs in sequence analysis of social science data. *Sociological Methods & Research*, 38(1) :197–231.
- Hägerstrand, T. (1970). What about people in regional science ? *Papers in regional science*, 24(1) :7–24.

- Hamming, R. W. (1950). Error detecting and error correcting codes. *Bell System technical journal*, 29(2) :147–160.
- Hanson, S. and Hanson, P. (1981). The travel-activity patterns of urban residents : dimensions and relationships to sociodemographic characteristics. *Economic geography*, 57(4) :332–347.
- Hillson, D. and Murray-Webster, R. (2007). *Understanding and managing risk attitude*. Gower Publishing, Ltd.
- Huet, P., Martin, X., Prime, J.-L., Foin, P., Laurain, C., and Cannard, P. (2003). Retour d'expérience des crues de septembre 2002 dans les départements du gard, de l'hérault, du vaucluse, des bouches-du-rhône, de l'ardèche et de la drôme. *Rapport de l'Inspection Générale de l'Environnement, Ministère de l'écologie et du développement durable*.
- Husdal, J. (2004). Reliability and vulnerability versus cost and benefits. In *Proc. 2nd Int. Symp. Transportation Network Reliability (INSTR)*. Christchurch, New Zealand, pages 180–186.
- Jenelius, E., Petersen, T., and Mattsson, L.-G. (2006). Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 40(7) :537–560.
- Joh, C.-H., Arentze, T. A., and Timmermans, H. J. (2001). Multidimensional sequence alignment methods for activity-travel pattern analysis : A comparison of dynamic programming and genetic algorithms. *Geographical Analysis*, 33(3) :247–270.
- Joh, C.-H. and Timmermans, H. (2011). Applying sequence alignment methods to large activity-travel data sets : Heuristic approach. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2231) :10–17.
- Johnson, J. G. and Busemeyer, J. R. (2010). Decision making under risk and uncertainty. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Cognitive Science*, 1(5) :736–749.
- Jonkman, S. N. (2005). Global perspectives on loss of human life caused by floods. *Natural hazards*, 34(2) :151–175.
- Jonkman, S. N. and Kelman, I. (2005). An analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths. *Disasters*, 29(1) :75–97.
- Kahneman, D. and Tversky, A. (1979). Prospect theory : An analysis of decision under risk. *Econometrica : Journal of the econometric society*, pages 263–291.
- Kilpeläinen, M. and Summala, H. (2007). Effects of weather and weather forecasts on driver behaviour. *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour*, 10(4) :288–299.
- Kim, J., Mahmassani, H., and Dong, J. (2010). Likelihood and duration of flow breakdown : modeling the effect of weather. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2188) :19–28.
- Koetse, M. J. and Rietveld, P. (2009). The impact of climate change and weather on transport : An overview of empirical findings. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 14(3) :205–221.
- Koks, E. E., Jongman, B., Husby, T. G., and Botzen, W. J. (2015). Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management. *Environmental Science & Policy*, 47 :42–52.

Bibliographie

- Kruskal, J. B. (1983). An overview of sequence comparison : Time warps, string edits, and macromolecules. *SIAM review*, 25(2) :201–237.
- Lam, W. H., Shao, H., and Sumalee, A. (2008). Modeling impacts of adverse weather conditions on a road network with uncertainties in demand and supply. *Transportation research part B : methodological*, 42(10) :890–910.
- Le Bihan, G., Payrastre, O., Gaume, E., and Moncoulon, D. (2015). Regional hydrological models for distributed flash floods forecasting : towards an estimation of potential impacts. *9th Hymex workshop*.
- Leone, F. and Vinet, F. (2006). La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels. *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques–Géorisques*, (1) :9–25.
- Lesnard, L. (2006). Optimal matching and social sciences.
- Lesnard, L. and Kan, M. Y. (2009). Two-stage optimal matching analysis of workdays and workweeks.
- Levenshtein, V. I. (1966). Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals. In *Soviet physics doklady*, volume 10, pages 707–710.
- Lindell, M. K. and Hwang, S. N. (2008). Households' perceived personal risk and responses in a multihazard environment. *Risk Analysis*, 28(2) :539–556.
- Lindell, M. K. and Perry, R. W. (1992). *Behavioral foundations of community emergency planning*. Hemisphere Publishing Corp.
- Llasat, M., Llasat-Botija, M., Petrucci, O., Pasqua, A., Rosselló, J., Vinet, F., and Boissier, L. (2013). Towards a database on societal impact of mediterranean floods within the framework of the hymex project. *Natural Hazards and Earth System Science*, 13(5) :1337–1350.
- Lu, X. and Pas, E. I. (1999). Socio-demographics, activity participation and travel behavior. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 33(1) :1–18.
- Macal, C. M. and North, M. J. (2005). Tutorial on agent-based modeling and simulation. In *Proceedings of the 37th conference on Winter simulation*, pages 2–15. Winter Simulation Conference.
- Manly, B. F. (2006). *Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods in biology*, volume 70. CRC Press.
- Manus, C., Anquetin, S., Braud, I., Vandervaere, J., Creutin, J., Viallet, P., and Gaume, E. (2008). A modelling approach to assess the hydrological response of small mediterranean catchments to the variability of soil characteristics in a context of extreme events. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 5(4) :2687–2725.
- Maze, T., Agarwai, M., and Burchett, G. (2006). Whether weather matters to traffic demand, traffic safety, and traffic operations and flow. *Transportation research record : Journal of the transportation research board*, (1948) :170–176.
- McFadden, D. (1980). Econometric models for probabilistic choice among products. *Journal of Business*, pages S13–S29.
- McNally, M. G. and Rindt, C. (2000). The activity-based approach. *December*, 1 :2000.

- Montz, B. E. and Grunfest, E. (2002). Flash flood mitigation : recommendations for research and applications. *Global Environmental Change Part B : Environmental Hazards*, 4(1) :15–22.
- Morss, R. E., Demuth, J. L., and Lazo, J. K. (2008). Communicating uncertainty in weather forecasts : A survey of the us public. *Weather and Forecasting*, 23(5) :974–991.
- Naulin, J.-P. (2012). *Modélisation hydrologique distribuée pour la prévision des coupures de routes par inondation : application au département du Gard*. PhD thesis.
- Naulin, J.-P., Payraastre, O., and Gaume, E. (2013). Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas : Application to road network supervision in southern france. *Journal of hydrology*, 486 :88–99.
- Pachauri, R. K., Allen, M., Barros, V., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., et al. (2014). Climate change 2014 : Synthesis report. contribution of working groups i, ii and iii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- Pagneux, E., Gísladóttir, G., and Jónsdóttir, S. (2011). Public perception of flood hazard and flood risk in iceland : a case study in a watershed prone to ice-jam floods. *Natural hazards*, 58(1) :269–287.
- Pan, X., Han, C. S., Dauber, K., and Law, K. H. (2007). A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations. *Ai & Society*, 22(2) :113–132.
- Papinski, D., Scott, D. M., and Doherty, S. T. (2009). Exploring the route choice decision-making process : A comparison of planned and observed routes obtained using person-based gps. *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour*, 12(4) :347–358.
- Pas, E. I. (1984). The effect of selected sociodemographic characteristics on daily travel-activity behavior. *Environment and Planning A*, 16(5) :571–581.
- Pas, E. I. (1985). State of the art and research opportunities in travel demand : another perspective. *Transportation Research Part A : General*, 19(5-6) :460–464.
- Pearl, J. (1985). Bayesian networks : A model of ‘self-activated memory for evidential reasoning.
- Pearl, J. (2014). *Probabilistic reasoning in intelligent systems : networks of plausible inference*. Morgan Kaufmann.
- Ramming, M. S. (2001). *Network knowledge and route choice*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Recker, W. W., McNally, M. G., and Root, G. (1986). A model of complex travel behavior : Part i—theoretical development. *Transportation Research Part A : General*, 20(4) :307–318.
- Robinson, S. (2014). *Simulation : the practice of model development and use*. Palgrave Macmillan.
- Ruin, I. (2007). *Conduite à contre-courant. Les pratiques de mobilité dans le Gard : facteur de vulnérabilité aux crues rapides*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- Ruin, I. (2010). Conduite à contre-courant et crues rapides, le conflit du quotidien et de l’exceptionnel. In *Annales de géographie*, number 4, pages 419–432. Armand Colin.

Bibliographie

- Ruin, I., Creutin, J.-D., Anquetin, S., Grunfest, E., and Lutoff, C. (2009). Human vulnerability to flash floods : Addressing physical exposure and behavioural questions. In *Flood risk management : research and practice proceedings of the European Conference on Flood Risk Management Research into Practice (FLOODrisk 2008), Oxford, UK, 30 September-2 October 2008*, pages 1005–1012.
- Ruin, I., Creutin, J.-D., Anquetin, S., and Lutoff, C. (2008). Human exposure to flash floods—relation between flood parameters and human vulnerability during a storm of september 2002 in southern france. *Journal of Hydrology*, 361(1) :199–213.
- Ruin, I., Gaillard, J.-C., and Lutoff, C. (2007). How to get there? assessing motorists' flash flood risk perception on daily itineraries. *Environmental hazards*, 7(3) :235–244.
- Ruin, I., Lutoff, C., Boudevillain, B., Creutin, J.-D., Anquetin, S., Rojo, M. B., Boissier, L., Bonnifait, L., Borga, M., Colbeau-Justin, L., et al. (2014). Social and hydrological responses to extreme precipitations : an interdisciplinary strategy for postflood investigation. *Weather, climate, and society*, 6(1) :135–153.
- Savage, L. (1972). J.(1954) the foundations of statistics. *Wiley Publications in Statistics (New)*.
- Shabou, S., Debionne, S., Ruin, I., Lutoff, C., and Creutin, J.-D. (2014). Assessing daily commuters' exposure to flash flooding in the gard area. *8th Hymex workshop*.
- Shabou, S., Ruin, I., Lutoff, C., Debionne, S., Anquetin, S., and Creutin, J.-D. (2015). Assessment of motorists' exposure to flash flood in the gard region : integrating travel-activity adaptation behaviours and decision making processes. *9th Hymex workshop*.
- Shabou, S., Ruin, I., Lutoff, C., Debionne, S., Anquetin, S., and Creutin, J.-D. (2016). Assessment of motorists' exposure to flash flood in the gard region : integrating travel-activity adaptation behaviours and decision making processes. *AAG Annual Meeting*.
- Sharif, H. O., Hossain, M. M., Jackson, T., and Bin-Shafique, S. (2012). Person-place-time analysis of vehicle fatalities caused by flash floods in texas. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 3(4) :311–323.
- Simon, H. A. (1955). A behavioral model of rational choice. *The quarterly journal of economics*, pages 99–118.
- Smith, L., Beckman, R., and Baggerly, K. (1995). Transims : Transportation analysis and simulation system. Technical report, Los Alamos National Lab., NM (United States).
- Špitalar, M., Gourley, J. J., Lutoff, C., Kirstetter, P.-E., Brilly, M., and Carr, N. (2014). Analysis of flash flood parameters and human impacts in the us from 2006 to 2012. *Journal of Hydrology*, 519 :863–870.
- Stopher, P. R., Hartgen, D. T., and Li, Y. (1996). Smart : simulation model for activities, resources and travel. *Transportation*, 23(3) :293–312.
- Studer, M., Ritschard, G., Gabadinho, A., and Müller, N. S. (2011). Discrepancy analysis of state sequences. *Sociological Methods & Research*, 40(3) :471–510.
- Sumalee, A., Uchida, K., and Lam, W. H. (2011). Stochastic multi-modal transport network under demand uncertainties and adverse weather condition. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 19(2) :338–350.

- Terti, G., Ruin, I., Anquetin, S., and Gourley, J. J. (2015). Dynamic vulnerability factors for impact-based flash flood prediction. *Natural Hazards*, 79(3) :1481–1497.
- Terti, G., Ruin, I., Anquetin, S., and Gourley, J. J. (2016). A situation-based analysis of flash flood fatalities in the united states. *Bulletin of the American Meteorological Society*, (2016).
- Tsapakis, I., Cheng, T., and Bolbol, A. (2013). Impact of weather conditions on macroscopic urban travel times. *Journal of Transport Geography*, 28 :204–211.
- Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L., et al. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the national academy of sciences*, 100(14) :8074–8079.
- Vannier, O. (2013). *Apport de la modélisation hydrologique régionale à la compréhension des processus de crue en zone méditerranéenne*. PhD thesis, Grenoble.
- Vaughn, K. M., Speckman, P., and Sun, D. (1999). Identifying relevant socio-demographics for distinguishing household activity-travel patterns : A multivariate regression tree approach. *National Institute of Statistical Science*.
- Versini, P. A. (2007). *Surveillance du risque hydrologique diffus le long des itinéraires routiers : Eléments pour la construction d’un outil d’annonce de coupure*. PhD thesis, Ecole des Ponts ParisTech.
- Versini, P.-A., Gaume, E., and Andrieu, H. (2010). Assessment of the susceptibility of roads to flooding based on geographical information–test in a flash flood prone area (the gard region, france). *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(4) :793–803.
- Von Neumann, J. and Morgenstern, O. (1947). Theory of games and economic behavior (2d rev.
- Weber, M. and Freund, J. (1966). Essais sur la théorie de la science.
- Weinreich, M. (1939). Max weber. l’homme et le savant.
- Wilson, W. C. (1998). Activity pattern analysis by means of sequence-alignment methods. *Environment and Planning A*, 30(6) :1017–1038.

Annexe A

Théorie des graphes et théorie des probabilités

1 Théorie des graphes

Graphes Orientés Acycliques : Dans la théorie des graphes, un graphe fini $G = V, E$ est composé d'un ensemble fini de noeuds ou sommets (en anglais "*Vertices*") $V = v_1, v_2, \dots, v_n$ et d'un ensemble fini $E = e_1, e_2, \dots, e_n$ dont les éléments sont des arcs ou arrêtes (en anglais "*Edges*"). Un arc e est défini donc par une paire de sommets. En donnant un sens aux arcs, on obtient un graphe orienté, appelé aussi "digraph" (en anglais "*Directed Graph*"). Un graphe acyclique est un graphe qui ne contient aucun cycle. On appelle un cycle une suite d'arcs consécutifs dont les deux sommets extrémités sont identiques. La figure A.1 illustre les caractéristiques des graphes orientés acycliques.

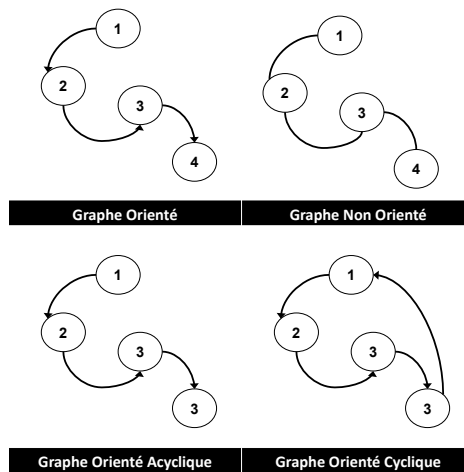


Figure A.1 Structure d'un Graphe Orienté Acyclique

2 Notions de probabilités

Un univers Ω : Il représente tous les résultats possibles d'une expérience donnée. Si on prend l'expérience de lancer un dé à six faces, l'univers est composé des faces possibles réalisées $\Omega = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

Un évènement : On appelle un évènement un sous ensemble de l'univers Ω et un évènement élémentaire la réalisation d'un élément de Ω . Par exemple, avoir la face 6 d'un dès à six face est un évènement élémentaire. \bar{A} désigne l'évènement contraire ou complémentaire de A (la non réalisation de A).

Propriétés des probabilités :

Une probabilité peut être définie comme une fonction notée P qui attribue à tout évènement A une valeur $P(A)$ désignant la probabilité que A se réalise. Une probabilité possède les caractéristiques suivantes :

- $0 \leq P(A) \leq 1$ pour tout évènement A
- $P(\Omega) = 1$ et $P(\emptyset) = 0$
- $P(\bar{A}) = 1 - P(A)$

Opérations sur les évènements :

- $P(A \cup B)$ désigne la probabilité de la réunion des évènements A et B (réalisation de A ou de B).
- $P(A \cap B)$ désigne la probabilité de l'intersection des évènements A et B (réalisation de A et de B). On dit que les évènements A et B sont incompatibles ou disjoints si $P(A \cap B) = 0$.
- $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$. Si A et B sont disjoints $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$.

On dit que les deux évènements A et B sont indépendants si : $P(A \cap B) = P(A)P(B)$

Probabilités conditionnelles :

La probabilité conditionnelle d'un évènement A par rapport à B est la probabilité que l'évènement A se réalise sachant que l'évènement B a eu lieu. Elle est définie par :

- $P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$

Il ne faut pas confondre $P(A|B)$ qui définit la probabilité de la réalisation de A sachant qu'on a observé B avec $P(A \cap B)$ qui définit la probabilité que les évènements A et B se

réalisent simultanément.

Indépendances des évènements :

On dit que les évènements A et B sont indépendants lorsque la réalisation de l'évènement B ne modifie pas la probabilité de A . Ainsi :

- $P(A|B) = P(A)$
- $P(A \cap B) = P(A) \times P(B)$

Théorème de Bayes :

Le théorème de Bayes se base sur les probabilités conditionnelles : étant donné deux évènements A et B , le théorème de Bayes permet de déterminer la probabilité de A sachant la réalisation de B à partir de la connaissance de la probabilité de A , la probabilité de B et la probabilité de B sachant A (Équation A.1).

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad (\text{A.1})$$

où

$P(A|B)$ est la probabilité de la réalisation de l'évènement A sachant l'observation de l'évènement B ;

$P(B|A)$ est la probabilité de l'observation de B étant donné la réalisation de l'évènement A ;

$P(A)$ est la probabilité a priori de l'évènement A , appelée aussi la probabilité marginale de A

$P(B)$ est la probabilité a priori de l'évènement B , appelée aussi la probabilité marginale de B .

Arbre de probabilités :

L'arbre de probabilités est un procédé qui permet de schématiser les probabilités conditionnelles représentant un nombre d'évènements d'une expérience aléatoire se réalisant l'un après l'autre. Ceci est représenté sous la forme d'un graphe orienté et pondéré (Figure A.2) respectant les règles suivantes :

- La somme des probabilités au niveau des branches issues d'un même noeud est égale à 1.
- La probabilité d'un chemin dans le graphe est égale au produit des probabilités des branches qui le composent : $P(B \cap A) = P(B|A) \times P(A)$.
- La pondération de la branche reliant le noeud A au noeud B est la probabilité conditionnelle de B sachant que A est réalisé ($P(B|A)$).
- La probabilité d'un évènement situé à l'extrémité de l'arbre (par exemple l'évènement B dans la figure A.2) est égale à la somme des probabilités de tous les chemins conduisant à cet évènement : $P(B) = P(B|A) * P(A) + P(B|\bar{A}) * P(\bar{A})$

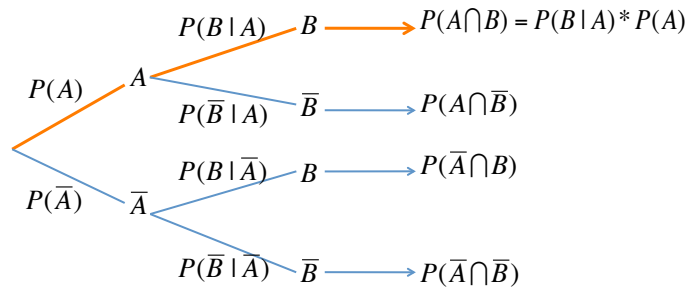


Figure A.2 Illustration d'un arbre de probabilités

Variable aléatoire discrète :

Une variable aléatoire X est le procédé qui relie l'expérience aléatoire à un nombre. L'ensemble des valeurs prises par X après la réalisation de l'expérience est noté D_x . A chaque fois que l'expérience est reproduite, on obtient une réalisation de X qui est noté x (X est la fonction et x est le nombre). Une variable aléatoire discrète est une variable qui prend un nombre fini de valeurs tel que les variables binaires ("vrai" ou "faux").

Distribution de probabilité :

Une loi de probabilité, appelée aussi distribution de probabilité, d'une variable aléatoire X (désignées par $f_X(x)$) permet de décrire les valeurs possibles prises par X et les probabilités d'observation de ses valeurs ($p_i = P(X = x_i)$ pour chacune des valeurs possibles x_i de X). La figure A.3 illustre la distribution des probabilités d'un variable X discrétisée en trois valeurs possibles : faible, moyen et élevé.

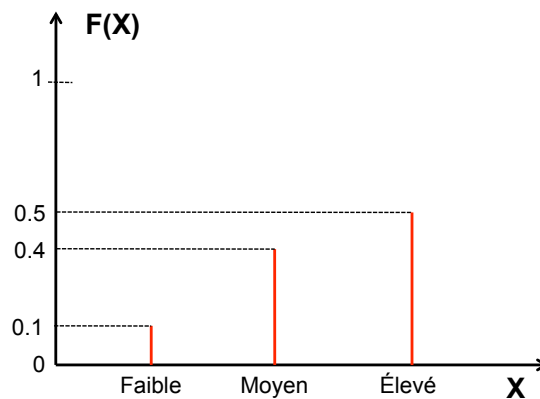


Figure A.3 Exemple de distribution des probabilités d'une variable discrète X

Annexe B

Mode de collecte des données ENTD

La collecte des données a été réalisée à l'aide d'un ordinateur (*CAPI : Computer Assisted Personal Interview*) sur 12 mois afin de prendre en compte la saisonnalité des mobilités. De plus, une équi-répartition des jours de semaines enquêtés a été respectée dans le but de représenter la variabilité hebdomadaire de la mobilité. L'unité enquêtée est le "tronc commun des ménages" (TCM), défini comme *"l'ensemble de personnes ayant une résidence habituelle commune et partageant un même budget pour lesquelles le logement enquêté est la résidence principale"*. Le questionnaire est constitué sur deux visites. La première visite concerne la collecte des données socio-démographiques décrivant les individus et leurs ménages (profession, âge, sexe, nombre de personnes...), comptage et description des véhicules et du logement ainsi que la description des déplacements domicile-travail et domicile-étude. Ensuite la deuxième visite vise particulièrement la description de la mobilité appelée "locale" d'un individu tiré au sort du ménage enquêté (appelé *"Individu Kish"*). Ceci en recensant les différents déplacements effectués, dans un rayon de 80 km autour du lieu de domicile, lors d'un jour de semaine et un jour de weekend pendant la semaine qui précède le jour de l'enquête.

Annexe C

Méthode d'Appariement Optimal

1 Description de la méthode

Cette section est consacrée à expliquer en détail le fonctionnement de la méthode d'appariement optimal en se basant sur les travaux de Lesnard (2006).

La méthode d'appariement optimal permet de comparer des séquences de longueurs différentes en se basant sur les opérations de substitutions et d'insertions/suppressions d'éléments des séquences. L'approche utilisée consiste à identifier tous les chemins possibles pour passer d'une séquence à l'autre en utilisant ces trois opérations et d'identifier le chemin le moins coûteux en nombre d'opérations.

Prenons l'exemple de ces deux séquences X et Y :

X : C - A - B - D - D

Y : A - B - C - D

Pour aligner les deux séquences X et Y, il nous pouvons supprimer le C en première position dans X et transformer le D en 3^{ème} position en C. Le cout associé à ces transformations est alors égal à une suppression et une substitution.

Il existe d'autres manières pour transformer X en Y. Par exemple, on peut supprimer le C en première position et le D en dernière position de X et ensuite insérer un C entre le B et le D. Le cout associé à ces transformations sera alors égal à la somme de deux suppressions et une insertion. Donc, la méthode d'appariement optimal permet de regarder toutes les combinaisons d'opérations possibles et de choisir après celle qui propose un chemin moins coûteux.

Cette procédure peut être généralisée sous la forme d'une matrice de taille m,n afin de comparer les séquences $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ et $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ (Figure. C.1). Ainsi, transformer X en Y revient à passer de la cellule en haut à gauche à celle qui en bas à droite. Descendre verticalement correspond à supprimer un élément de X. Passer à la cellule de droite correspond à insérer un élément de Y dans X. Descendre en diagonale correspond à substituer

Méthode d'Appariement Optimal

un élément de X par un élément de Y . L'exemple illustré dans la figure C.1 correspond à l'insertion de Y_1 , la transformation de X_1 en Y_2 et la suppression de X_2 . Une fois on connaît les coûts associés aux différentes opérations, on peut mesurer le coût de chemin identifié. L'OM permet alors de retrouver le chemin le moins coûteux qui caractérise dans la distance entre les deux séquences considérées.

		Y_1	Y_2	Y_3	...					Y_n
	0	→	↘							
X_1			↓							
X_2										
X_3										
...										
X_m										Fin

Figure C.1 Représentation matricielle de la comparaison de deux séquences en se basant sur la méthode d'appariement optimal (source : (Lesnard, 2006))

2 Le problème des coûts

Les opérations d'insertion/suppression consistent à décaler les séquences afin d'identifier des suites d'états similaires au détriment de leurs localisations dans les séquences à comparer. Ces opérations déforment alors les structures temporelles des séquences pour mettre en accent les suites d'éléments communs. Cependant, les opérations de substitutions conservent les structures temporelles des séquences en comparant les éléments situés aux mêmes points des séquences considérées.

La méthode d'appariement optimal consiste alors à déformer l'aspect temporel des séquences à travers les opérations d'insertion/suppression ou l'aspect "événementiel" en déformant les événements (changements d'états) à travers les opérations de substitutions (Table C.1).

Table C.1 Signification des opérations d'insertions/suppressions et de substitutions dans mes méthodes d'appariement optimal. Source : Lesnard (2006)

	Insertion/suppression	Substitution
<i>Ce qui est préservé</i>	Évènement	Temps
<i>Ce qui est simplifié</i>	Temps	Évènement

Ainsi, choisir des couts d'insertion/suppression inférieurs aux couts de substitution, ou de ne pas utiliser les opérations de substitution, renvoie à identifier les éléments communs entre les séquences (en donnant moins d'importance à leur temporalité). Au contraire, le

choix d'attribuer des coûts d'insertion/suppression supérieurs aux coûts de substitutions, ou de n'utiliser que les opérations de substitutions, revient à chercher la plus longue suite d'états commune entre les séquences comparées. Ainsi, l'attribution des coûts renvoie à positionner le curseur entre les deux cas limites des distances de Hamming et de Levenstein 2. Plus le coût de substitution est faible par rapport au coût d'insertion/suppression, plus la contemporanéité des événements est privilégiée. Dans le cas contraire, l'accent est mis sur l'identification des plus longues sous-séquences communes.

Annexe D

Paramètres du modèle de décision

Table D.1 Table de probabilités conditionnelles relative à l'attitude-type "No adaptation"

Évènements	Threat level Activity flexibility	Low		Moderate		High	
		Yes	No	Yes	No	Yes	No
Bottleneck	$P(\text{Decision}) = \text{Keep planned}$	1	1	1	1	1	1
	$P(\text{Decision}) = \text{Stop}$	0	0	0	0	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0	0	0	0	0	0
Activity-end	$P(\text{Decision}) = \text{Keep planned}$	1	1	1	1	1	1
	$P(\text{Decision}) = \text{Delay}$	0	0	0	0	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0	0	0	0	0	0
Broadcast	$P(\text{Decision}) = \text{Keep current}$	1	1	1	1	1	1
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0	0	0	0	0	0
Environmental cue	$P(\text{Decision}) = \text{Keep current}$	1	1	1	1	1	1
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0	0	0	0	0	0

Table D.2 Table de probabilités conditionnelles relative à l'attitude-type "Risk seeker" en implémentant les décisions "STOP" / "DELAY"

Évènements	Threat level Activity flexibility	Low		Moderate		High	
		Yes	No	Yes	No	Yes	No
Bottleneck	$P(\text{Decision}) = \text{Keep planned}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1
	$P(\text{Decision}) = \text{Stop}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0	0	0	0	0	0
Activity-end	$P(\text{Decision}) = \text{Keep planned}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1
	$P(\text{Decision}) = \text{Delay}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0	0	0	0	0	0
Broadcast	$P(\text{Decision}) = \text{Keep current}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0
Environmental cue	$P(\text{Decision}) = \text{Keep current}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0

Table D.3 Table de probabilités conditionnelles relative à l'attitude-type "Risk seeker" en implémentant la décision "HOME"

Évènements	Threat level Activity flexibility	Low		Moderate		High	
		Yes	No	Yes	No	Yes	No
Bottleneck	$P(\text{Decision}) = \text{Keep planned}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1
	$P(\text{Decision}) = \text{Stop}$	0	0	0	0	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0
Activity-end	$P(\text{Decision}) = \text{Keep planned}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1
	$P(\text{Decision}) = \text{Delay}$	0	0	0	0	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0
Broadcast	$P(\text{Decision}) = \text{Keep current}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0
Environmental cue	$P(\text{Decision}) = \text{Keep current}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0

Paramètres du modèle de décision

Table D.4 Table de probabilités conditionnelles relative à l'attitude-type "Risk neutral" en implémentant les décisions "STOP" / "DELAY"

Évènements	Threat level Activity flexibility	Low		Moderate		High	
		Yes	No	Yes	No	Yes	No
Bottleneck	$P(\text{Decision}) = \text{Keep planned}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	$P(\text{Decision}) = \text{Stop}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0	0	0	0	0	0
Activity-end	$P(\text{Decision}) = \text{Keep planned}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	$P(\text{Decision}) = \text{Delay}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0	0	0	0	0	0
Broadcast	$P(\text{Decision}) = \text{Keep current}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Environmental cue	$P(\text{Decision}) = \text{Keep current}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Table D.5 Table de probabilités conditionnelles relative à l'attitude-type "Risk neutral" en implémentant la décision "HOME"

Évènements	Threat level Activity flexibility	Low		Moderate		High	
		Yes	No	Yes	No	Yes	No
Bottleneck	$P(\text{Decision}) = \text{Keep planned}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	$P(\text{Decision}) = \text{Stop}$	0	0	0	0	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Activity-end	$P(\text{Decision}) = \text{Keep planned}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	$P(\text{Decision}) = \text{Delay}$	0	0	0	0	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Broadcast	$P(\text{Decision}) = \text{Keep current}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Environmental cue	$P(\text{Decision}) = \text{Keep current}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Table D.6 Table de probabilités conditionnelles relative à l'attitude-type "Risk averse" en implémentant les décisions "STOP" / "DELAY"

Évènements	Threat level Activity flexibility	Low		Moderate		High	
		Yes	No	Yes	No	Yes	No
Bottleneck	$P(\text{Decision}) = \text{Keep planned}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Stop}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0	0	0	0	0	0
Activity-end	$P(\text{Decision}) = \text{Keep planned}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Delay}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0	0	0	0	0	0
Broadcast	$P(\text{Decision}) = \text{Keep current}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1
Environmental cue	$P(\text{Decision}) = \text{Keep current}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1

Table D.7 Table de probabilités conditionnelles relative à l'attitude-type "Risk averse" en implémentant la décision "HOME"

Évènements	Threat level Activity flexibility	Low		Moderate		High	
		Yes	No	Yes	No	Yes	No
Bottleneck	$P(\text{Decision}) = \text{Keep planned}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Stop}$	0	0	0	0	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1
Activity-end	$P(\text{Decision}) = \text{Keep planned}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Delay}$	0	0	0	0	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1
Broadcast	$P(\text{Decision}) = \text{Keep current}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1
Environmental cue	$P(\text{Decision}) = \text{Keep current}$	0.25	0.25	0.125	0.125	0	0
	$P(\text{Decision}) = \text{Home}$	0.75	0.75	0.875	0.875	1	1