



HAL
open science

Evaluation du risque de télescopage dans un contexte de véhicules communicants par la méthode des réseaux Bayésiens

Jean-Nicola Russo

► **To cite this version:**

Jean-Nicola Russo. Evaluation du risque de télescopage dans un contexte de véhicules communicants par la méthode des réseaux Bayésiens. Risques. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2018. Français. NNT : 2018MULH2947 . tel-03046723

HAL Id: tel-03046723

<https://theses.hal.science/tel-03046723>

Submitted on 8 Dec 2020

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

Présentée pour l'obtention du grade de

Docteur de l'UNISTRA et de l'UHA

École doctorale n° 269 : Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur

Spécialité doctorale "Automatique"

Présentée et soutenue publiquement par

Jean-Nicola RUSSO

le 11 octobre 2018

Évaluation du risque de télescopage dans un contexte de véhicules communicants par la méthode des réseaux Bayésiens

Directeur de thèse : **Michel BASSET**
Co-encadrant de thèse : **Thomas SPROESSER**
Co-encadrant de thèse : **Frédéric DROUHIN**

Jury

Pr. Xavier MOREAU,	IMS - Université de Bordeaux	Examineur
Pr. Jean-Christophe POPIEUL,	LAMIH - Université de Valenciennes	Rapporteur
Pr. Yassine RUICHEK,	Le2i - UTBM	Rapporteur

IRIMAS

Université de Haute-Alsace (UHA), Institut de Recherche en Informatique,
Mathématiques, Automatique et Signal (IRIMAS)

EA 7499, F-68093 Mulhouse, France

Remerciements

Cher lecteur, avant de laisser place à une lecture scientifique sur le domaine du risque, je tiens à remercier différentes personnes sans qui cette thèse aurait été impossible, difficile et morne.

Tout d'abord, je remercie les professeurs Jean-Christophe Popieul de l'Université Polytechnique des Hauts-de-France ainsi que Yassine Ruichek de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard d'avoir accepté de rapporter ce manuscrit. Je remercie également le professeur Xavier Moreau de l'Université de Bordeaux qui a accepté d'examiner et de présider ce travail de thèse.

Concernant l'équipe encadrante, je remercie le professeur Michel Basset qui a permis le financement de cette thèse et certaines directions de recherche.

Mes remerciements touchent également mon encadrant Thomas Sproesser qui a été présent du début à la fin, où nous sommes passés d'une totale méconnaissance du risque vers une expertise soignée et vaste du domaine. Au travers de nos échanges parfois houleux, parfois joviaux j'ai appris à connaître Thomas et à le voir comme un prof, un encadrant et un ami. Je me dois de remercier Frédéric Drouhin - mon autre encadrant, l'équipe RT ne sera pas oubliée - qui m'a permis de découvrir un domaine passionnant et qui va dans les années à venir se développer de plus en plus. Grâce à Frédéric, j'ai pu respirer l'air Colmarien et avoir une autre vision de ma thèse. Comme pour Thomas, il est à mes yeux plus qu'un programmeur ou un encadrant, il est un ami sur qui j'ai pu compter et reposer mes épaules, toujours prêt pour me soutenir. Futur doctorant, je vous recommande de travailler auprès de mes deux anciens mentors Thomas et Frédéric.

Parlons de l'équipe MIAM : Je remercie les permanents automaticiens et mécaniciens, dans le désordre Evelyne, Raphaël, Thomas W., Abderazik, Benjamin, Jean-Philippe et Rodolfo sur qui j'ai pu compter pour les différents domaines, techniques, questions scientifiques ou philosophiques qu'imposent une thèse. D'autres personnes de l'équipe MIAM méritent leur distinction comme Joël qui a contribué aux essais sur piste. Nous avons également Jonathan sans qui l'équipe MIAM serait bloquée, c'est l'homme à tout faire : il court après Michel pour des signatures, va à la compta, nous rapporte des fournitures, commande le matériel, bricole sur les véhicules, fait des schémas et des diagrammes dans le but d'aider au mieux les doctorants. Toujours présent lorsque l'on lui demande de l'aide. Le nouveau de l'équipe Thomas L. qui a réussi à me donner de bons conseils à quelques jours de la soutenance (attention il n'est pas doctorant il est permanent comme les autres, l'erreur provient dû au fait qu'il vient du Mordor, la contrée des Hauts-de-France).

Parlons de l'équipe R&T : Un brin mystique, si vous souhaitez discuter avec eux je vous conseille le protocole 802.11p et d'être en LOS afin de vous faire entendre. Une fois cela fait, vous pouvez profiter du cadre idyllique du bureau de Benoit (et Frédéric), de leur café/thé ainsi que de leur large choix de tasses. Un souci avec des maths ou des protocoles réseaux, penser Sébastien (il est également bon pour le Tikz et le TeX).

Mes camarades et amis : Merci à Hindi (eh oui, nous avons notre aventurière) également appelée professeure et responsable des étudiants qui a été voté à l'unanimité. Si vous avez la chance de la croiser, je vous conseille de discuter de nourriture, elle vous fera saliver et vous accueillera peut-être pour un repas (et vous aurez la chance de rencontrer son mari Yacine qui est gentil comme tout). Dans la même pièce qu'Hindi, il y a Faïza ou pour certains Feysal (peut-être qu'à la fin de ta thèse tu seras enfin acceptée comme femme), est une personne douce et marrante qui sera à votre écoute. Puis nous avons le chef de la pièce (il aime l'entendre de cette oreille), Mohamed ou Momo pour les intimes, toujours prêt à refaire le monde et à l'améliorer. Philosophe est une seconde nature chez lui mais il est meilleur en commande (regarder ses essais). Vous avez dans la pièce que j'ai occupée, Arnaud. Il pousse de la fonte mais il sait également vous parler de contact et de frictions. Au cas où, je parlais de pneumatique. Quelqu'un de peu présent mais avec qui l'on peut rire, Aza. A retenir, il aime les cerises et le jäger. Côté bureau mécanicien (même s'ils ne sont pas tous mécano), je vous conseille de prendre des bières avec Jules et Corentin puis d'enchaîner sur un resto (peut être une coutume qui va se mettre en place). Je remercie également le docteur Romain Barbeau, où nous avons vécu les mêmes galères de doctorants, consommation de thé et nuit blanche pour boucler la boucle à temps.

Vu que je suis expert en prédiction de risque, je prédis 100 % de risque vert et donc selon moi mes amis arriveront à terme de leur thèse. Comme je leur ai dit et comme ils ont pu le voir, c'est une expérience difficile, douloureuse, longue mais au final on arrive au bout avec une grande satisfaction. Dernier passage puis je libère le champ. Je remercie mes amis du karaté qui d'une certaine manière ont réussi à me motiver et à poursuivre ma thèse en me libérant du stress (il est important de faire une activité sportive durant la thèse afin de se défouler).

Notons les encouragements de Cécile avec sa phrase de motivation « tu vas le faire, ne t'en fais pas ». Elle a toujours su me détendre et faire en sorte que je sois toujours d'attaque.

Enfin je remercie ma famille qui a su me pousser toutes ces années d'études afin de maintenir le cap. Leur soutien fait qu'aujourd'hui il y a un docteur Russo.

Je dédie cette thèse à
ma mamie, mes parents,
mes frères
et ma moitié.

Table des matières

Table des matières	vii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Glossaire	xiii
1 Introduction Générale	1
1.1 Introduction	2
1.2 Quelques éléments historiques concernant le code de la route	3
1.3 Quelques étapes essentielles de l'évolution du code de la route depuis les années 1960	6
1.4 Causes humaines d'accidents de la route	8
1.4.1 Principales causes humaines d'accidents de la route selon les statistiques de la sécurité routière	8
1.4.2 Principales causes humaines selon une étude utilisant des données réelles de conduite	9
1.5 Comportements des conducteurs et leurs causes	11
1.5.1 Difficultés à changer le comportement des conducteurs	11
1.5.2 Extraits du rapport d'évaluation de Bondaz	11
1.5.3 Banalisation d'une situation dangereuse	12
1.6 Le risque	14
1.6.1 La définition du risque	14
1.6.2 La prise de risque	15
1.7 De l'aide à la conduite vers la voiture autonome	17
2 La modélisation du risque	19
2.1 Introduction	20
2.2 Présentation des outils mathématiques	21
2.2.1 Présentation du Réseau Bayésien	21
2.2.2 Les réseaux de véhicules communicants	25
2.3 Le réseau Bayésien développé	27
2.3.1 Introduction : les trois entités	27
2.3.2 Développement de la structure du réseau Bayésien	29
2.3.3 Modèle probabiliste	40
2.4 Conclusion	56
3 Les simulateurs	57
3.1 Introduction	58
3.2 Description des différents logiciels pour l'exploitation des réseaux Bayésiens	60

3.2.1	Exemple introductif	60
3.2.2	Netica	64
3.3	Environnement Network Simulator 3	68
3.3.1	Combinaison de NS3 et Netica	68
3.3.2	Définition et usage des Vehicular Ad-hoc NETWORK	69
3.4	Conclusion	78
4	Les essais sur piste et les simulations	79
4.1	Introduction	80
4.2	Présentation des véhicules d'essais et de la piste	81
4.2.1	Les véhicules d'essais	81
4.2.2	La piste	85
4.3	Essais sur piste	87
4.3.1	Conditions initiales du réseau Bayésien	87
4.3.2	Protocole expérimental	88
4.3.3	Vérification du réseau Bayésien pour le télescopage	88
4.3.4	Identification des freinages	95
4.4	Simulation sous NS3	97
4.4.1	Protocole des simulations	99
4.4.2	Simulation sans affichage du risque	100
4.4.3	Simulations avec affichage du risque	101
4.5	Conclusion	113
5	Conclusion et perspective	115
5.1	Conclusion générale	116
5.2	Perspectives	118
5.2.1	Aide à la conduite	118
5.2.2	Assurance et police	118
5.2.3	Benchmark	119
5.2.4	Évolution et travaux restants pour l'amélioration	119
A	Annexes	I
A.1	Tableaux de probabilités	I
A.1.1	Nœud a_{\max}	I
A.1.2	Nœud Intention de freinage	III

Liste des figures

Chapitre 1

1.1	Evolution comparée de la mortalité et de la circulation routière entre 1952 et 2016 [55]	7
1.2	Evolution comparée du nombre de personnes tuées et des vitesses moyennes entre 2000 et 2012 [53]	8

Chapitre 2

2.1	Possibilité de raisonnement des réseaux Bayésiens	22
2.2	Tableaux de probabilités a priori et conditionnelles	22
2.3	Structure graphique possible des nœuds composant le nœud a_{max}	24
2.4	Communication véhiculaire via des unités de bord de route (RSU) et des unités embarquées sur les véhicules (OBU)	25
2.5	Schéma du réseau Bayésien développé	30
2.6	Schéma du nœud Fatigue	31
2.7	Schéma du nœud Attention	32
2.8	Schéma du nœud Monotonie de la Route	33
2.9	Schéma du nœud Temps de Réaction	34
2.10	Schéma du nœud a_{max}	36
2.11	Définition de véhicules qui se suivent	37
2.12	Schéma du nœud Intention de Freinage	38
2.13	Perte de contrôle du véhicule dans une courbe	39
2.14	Télescopage de véhicules en ligne droite	39
2.15	Schéma du nœud Perte de Contrôle du véhicule	39
2.16	Schéma du nœud Risque de Télescopage	40
2.17	La représentation des trois zones du risque de télescopage	50
2.18	Distribution de probabilités pour le temps de réaction	53
2.19	Evaluation du risque : contribution de chaque temps de réaction	54
2.20	Distribution de probabilités pour a_{max}	55
2.21	Distribution de probabilités pour l'intention de freinage du véhicule Front	55

Chapitre 3

3.1	Tableaux de probabilités a priori et conditionnelle pour le cas Holmes	60
3.2	Schéma du réseau Bayésien utilisé sur NS3	67
3.3	Schéma du croisement	70
3.4	Puissance de réception en fonction de la distance pour le croisement	72
3.5	Puissance de réception pour les 20 simulations en situation de croisement	73
3.6	Temps de délivrance du paquet en situation de croisement	73
3.7	Puissance de réception en fonction de la distance pour le suivi	76
3.8	Puissance de réception pour les 20 simulations en situation de suivi	77

3.9 Temps de délivrance du paquet en situation de suivi	77
---	----

Chapitre 4

4.1 Schéma du matériel sur le véhicule ARTEMIPS	82
4.2 Photos d'ARTEMIPS	83
4.3 Photos de POCHETTE	84
4.4 Piste de la Cité de l'Automobile	85
4.5 Situation de télescopage étudiée	86
4.6 Situation de télescopage réelle	86
4.7 Photo des véhicules et de la mise en place des plots	86
4.8 Parcours des deux véhicules	89
4.9 Dynamique des véhicules : essai avec collision	90
4.10 Résultat de l'essai avec collision pour la détection de collision	91
4.11 Dynamique des véhicules : essai sans collision	93
4.12 Résultat de l'essai sans collision pour la détection de collision	94
4.13 Courbes de freinage fort et d'ajustement	95
4.14 Courbes d'ajustement pour les trois types de freinage	96
4.15 Moyenne des distances inter-véhiculaires en fonction d'une vitesse donnée [43]	98
4.16 Schéma de la disposition des véhicules	99
4.17 Inter-distances Obstacle-Front et Front-Ego	101
4.18 Évolution du risque de Front et Ego en fonction de la communication du véhicule Obstacle	103
4.19 Graphe des risques pour le scénario communication d'un risque vert avec système d'alerte	105
4.20 Accélérations et inter-distances pour le scénario communication d'un risque vert avec système d'alerte	106
4.21 Graphe des risques pour le scénario communication d'un risque vert avec système d'alerte	108
4.22 Accélérations et inter-distances pour le scénario communication d'un risque vert avec système d'alerte	109
4.23 Graphe des risques pour le scénario communication d'un risque rouge avec système d'alerte	111
4.24 Accélérations et inter-distances pour le scénario communication d'un risque rouge avec système d'alerte	112

Liste des tableaux

Chapitre 1

Chapitre 2

2.1	Nomenclature des nœuds	30
2.2	Modèle du tableau de description	41
2.3	Description du nœud Temps de Trajet	41
2.4	Description du nœud Biorythme	41
2.5	Description du nœud Facteurs Extérieurs	42
2.6	Description du nœud Fatigue	42
2.7	Tableau de probabilités du nœud Fatigue	42
2.8	Description du nœud Temps Paupières	43
2.9	Description du nœud Type de Route	43
2.10	Description du nœud Monotonie de la Route	43
2.11	Tableau de probabilités du nœud Monotonie de la Route	44
2.12	Description des nœuds Intégrale de l'Accélération et Intégrale de l'Angle au Volant	44
2.13	Description des nœuds Téléphone, Conversation et Radio	44
2.14	Description du nœud Attention	45
2.15	Tableau de probabilités du nœud Attention	46
2.16	Description du nœud Regard	47
2.17	Description du nœud Accélération	47
2.18	Description du nœud Ecart de l'Angle au Volant	47
2.19	Description du nœud Age	48
2.20	Description du nœud Temps de Réaction	48
2.21	Tableau de probabilités du nœud Temps de Réaction	48
2.22	Description du nœud Risque de Télescopage	49

Chapitre 3

3.1	Nomenclature des nœuds sous NS3	67
3.2	Paramètres utilisés pour l'étude du croisement	71
3.3	Paramètres utilisés pour l'étude du suivi	74

Chapitre 4

4.1	Etat des nœuds pour les essais sur piste	87
A.1	Description du nœud Température	I
A.2	Description du nœud Précipitation	I
A.3	Description du nœud Météo	II
A.4	Tableau de probabilités du nœud Météo	II

A.5	Description du nœud Météo _{front}	II
A.6	Description du nœud Etat de la Route	III
A.7	Tableau de probabilités du nœud Etat de la Route	IV
A.8	Description du nœud Etat du Véhicule	IV
A.9	Description du nœud a_{\max}	IV
A.10	Tableau de probabilités du nœud a_{\max}	IV
A.11	Description du nœud Risque _{front}	IV
A.12	Description du nœud a_{front}	V
A.13	Description du nœud Contexte	V
A.14	Tableau de probabilités du nœud Intention de Freinage	V

Glossaire

$\int \alpha$ Intégrale de l'Angle au Volant.

$\Delta \alpha$ Ecart de l'Angle au Volant.

E2Edelay Temps de délivrance du paquet de données (E2E), ou *End-to-End delay*.

γ Accélération.

$\int \gamma$ Intégrale de l'Accélération.

LIDAR Détection et estimation de la distance d'un objet par laser (LiDAR) ou *light detection and ranging*.

MANET Réseau mobile adhoc, ou *Mobile Adhoc Network*.

PDR Taux de réception de paquets de données (PDR), ou *Packet Delivery Ratio*.

RB Réseau Bayésien (RB), ou *Bayesian Network*.

V2I Communication entre véhicule et infrastructure (V2I), ou *Vehicle to Infrastructure*.

V2V Communication entre véhicules (V2V), ou *Vehicle to Vehicle*.

VANET Communication véhiculaire (VANET), ou *Vehicular Adhoc Network*.

Chapitre 1

Introduction Générale

Sommaire

1.1	Introduction	2
1.2	Quelques éléments historiques concernant le code de la route	3
1.3	Quelques étapes essentielles de l'évolution du code de la route depuis les années 1960	6
1.4	Causes humaines d'accidents de la route	8
1.4.1	Principales causes humaines d'accidents de la route selon les statistiques de la sécurité routière	8
1.4.2	Principales causes humaines selon une étude utilisant des données réelles de conduite	9
1.5	Comportements des conducteurs et leurs causes	11
1.5.1	Difficultés à changer le comportement des conducteurs	11
1.5.2	Extraits du rapport d'évaluation de Bondaz	11
1.5.3	Banalisation d'une situation dangereuse	12
1.6	Le risque	14
1.6.1	La définition du risque	14
1.6.2	La prise de risque	15
1.7	De l'aide à la conduite vers la voiture autonome	17

1.1 Introduction

Le sujet de cette thèse se situe dans le contexte de la sécurité routière, commençons par un rapide tour historique en passant du développement des routes, de son utilisation, des moyens de locomotions et des coûts engendrés que cela soit économique ou humain. Puis l'évolution du risque allant des défauts infrastructurels vers l'erreur humaine.

Dans le Chapitre 2, nous décrivons l'outil mathématique utilisé, les [réseaux Bayésiens \(RB\)](#), ou *Bayesian Network*. Puis nous donnons une méthode pour construire un RB. Cette méthode est ensuite appliquée pour notre cas d'étude, l'évaluation du risque. Afin de construire le RB, nous définissons tout d'abord les différentes variables et liens qui composent le risque. Ces liens sont ensuite traduits pour être conformes à la représentation Bayésienne.

Dans le Chapitre 3, une étude sur la [communication véhiculaire \(VANET\)](#), ou *Vehicular Adhoc Network* est faite. Cela concerne plus particulièrement la portée, le temps de réception, la puissance d'émission pour les situations de communication en ligne droite (suivi de véhicule) et dans un carrefour. Dans ce chapitre y sont également décrits les deux simulateurs créés sur Matlab et sur NS3, ainsi que la toolbox BNT et la librairie Netica utilisées. A la suite de ces descriptions nous donnons des éléments de programmation pour manipuler ces toolbox/librairies.

Dans le Chapitre 4, nous présentons des résultats expérimentaux et de simulation de notre modèle de risque pour le télescopage. Tout d'abord, nous décrivons nos véhicules d'essais et la piste utilisée. Puis nous montrons deux situations de risque, avec et sans collision. Par la suite, nous faisons des simulations avec trois véhicules sur nos simulateurs afin de montrer la répercussion de l'information grâce aux [VANET](#), l'évolution du risque, l'apport pour l'évaluation du risque et le gain en sécurité.

Dans le Chapitre 5, nous concluons sur nos travaux de recherche et apportons des éléments de réponse pour une utilisation futur du risque. De plus, nous proposons des pistes d'améliorations.

1.2 Quelques éléments historiques concernant le code de la route

Le premier accident mortel documenté, impliquant une automobile, s'est probablement produit à Glasgow en 1834 [66]. Il s'agissait d'un véhicule à vapeur qui, suite à la casse d'une roue, s'est renversé, ce qui a provoqué l'éclatement de la chaudière. Cinq personnes dont l'histoire n'a pas retenu les noms, en sont mortes [66].

Si la cause de cet accident est une défaillance matérielle, l'accident lors duquel Bridget Driscoll a été tuée le 17 août 1896 à Londres [45], résultait d'une erreur humaine. En effet, elle voulait traverser une rue fréquentée lorsqu'elle a été renversée par une voiture à moteur thermique. Il ne s'agissait pas du premier accident mortel pour cette nouvelle catégorie d'automobiles, mais du premier qui a été documenté.

Une erreur humaine est également à l'origine du premier accident mortel documenté, provoqué par une voiture électrique. Il s'est produit le 13 septembre 1899 à New York, quand Henry H. Bliss, en descendant d'un wagon de tramway, a été renversé par un taxi électrique [45].

Il est évident que des accidents mortels de circulation se sont produits de tous les temps. Déjà dans la Grèce antique [13] et dans Rome du premier siècle avant J.-C., des accidents ont été rapportés [2]. Au 19^{ème} siècle, le fatalisme quant aux accidents était étonnamment répandu et l'attitude parfois négative à l'égard des premières automobiles s'expliquait plus par une situation de circulation catastrophique dans son ensemble que par le nombre d'accidents dont les automobiles étaient responsables [60]. Le même auteur fait valoir qu'à Londres, à la fin du 19^{ème} siècle, des accrochages entre les charrettes, les carrosses, les fiacres, etc. ont provoqué, par moment, jusqu'à 12 morts et une centaine de blessés par semaine. On comprend alors que des tentatives de gérer la circulation ont également commencé très tôt.

Déjà Jules César, dans la « Lex Iulia municipalis ¹ », cherche à répondre, au moins dans une certaine mesure, aux problèmes de sécurité en interdisant la circulation des attelages de transport dans Rome entre le lever du soleil et la 10^{ème} heure [7]; cette interdiction n'était pas absolue, mais prévoyait des exceptions, comme par exemple le transport de matériaux/gravats pour la construction de temples et de bâtiments publics. D'autres éléments de sécurisation, comme des rues en sens unique ou des zones à circulation limitée existaient également déjà à cette époque [2].

En France, parmi les premiers textes connus, on peut noter l'ordonnance signée par Henri IV, qui le 16 décembre 1607 « ordonne que tous routiers, charretiers, voituriers et autres seront tenus de céder le pavé et de faire place à tous courriers et voyageurs allant en poste » [21]. En revanche, l'usage de tenir sa gauche lors d'un croisement de véhicules, était une coutume qui s'est développée sans qu'il n'y ait une ordonnance à son origine [12]. A partir de la révolution française et surtout sous Napoléon, il s'est établi l'usage du croisement à droite. Mais ce n'est que le règlement du 10 août 1852, relatif à la loi du 10 mai 1851 (loi sur la police du roulage et des messageries publiques) qui en a fait une obligation [42] ². Le préfet de Paris, Louis Lépine, par l'ordonnance du 14 août 1893 (Ordonnance concernant le fonctionnement et la circulation, sur la voie publique, dans Paris et dans le ressort de la Préfecture de Police, des véhicules à moteur mécanique, autres que ceux qui servent à l'exploitation des voies ferrées concédées) impose dans le ressort de la

1. le texte en latin est téléchargeable à l'adresse <http://ancientrome.ru/ius/library/leges/municip.html>; il s'agit des paragraphes 11, 12 et 13

2. Titre I, Art. 9

Préfecture de Police, la circulation à droite « quand bien même le milieu de la rue serait libre » [42]³.

Ces ordonnances ne se limitaient pas à la conduite, mais concernaient également l'infrastructure et les véhicules. Parmi tous les textes, ne signalons que celui sous Louis XIII qui fixe la largeur des essieux afin de faciliter le croisement des chariots et charrettes sur les routes sans détériorer les accotements [12] et l'arrêt du Conseil du 3 mai 1720 qui impose une largeur des chemins royaux de 60 pieds entre fossés et de 20 pieds pour la chaussée (pavée) [12]. Toujours dans le but de limiter les dégradations des routes, sous Napoléon, le poids des charrettes a été limité à 4 tonnes et celui des chariots à 6 tonnes sous condition de disposer de véhicules à jantes larges (minimum de 18 cm) [25]. Afin de pouvoir contrôler le poids, la loi du 19 mai 1802 a ordonné la construction de 145 ponts-à-bascule permettant la pesée des véhicules [25]. En 1807, l'emploi exclusif des jantes larges est devenu obligatoire, sauf pour les charrettes paysannes à usage agricole dont les jantes étroites continuent à dégrader fortement les routes [25].

La loi du 30 mai 1851 et le règlement du 10 août 1852 sur la police du roulage et des messageries publiques [25], peut être vue comme l'ancêtre du code de la route [23]. Il s'agit d'un texte qui fixe en 5 titres (comportant de nombreux articles et paragraphes) les conditions de la circulation des voitures (véhicules, conduite, stationnement, etc.) : le titre 1 fixe le champ d'application des règlements d'administration publique; le titre 2 les amendes en cas de contravention aux divers règlements; tandis que le titre 3 détaille la procédure à respecter pour le constat des contraventions; le titre 4 fixe l'abrogation de textes antérieurs; le titre 5 règle l'application d'une amnistie pour des contraventions de surcharge et de jantes non réglementaires qui accompagne la promulgation du texte. Comme ce texte autorise expressément la circulation à tout véhicule, il autorise de ce fait implicitement les automobiles, sachant que les véhicules à vapeur existaient déjà en Angleterre à cette époque. D'ailleurs, notons pour l'anecdote, que ce texte prévoit même déjà la procédure à suivre lorsqu'un contrevenant n'est pas domicilié en France.

Si avant la loi du 30 mai 1851, le législateur était essentiellement préoccupé par la préservation des voies publiques, avec cette loi on assiste à l'émergence de l'identification de certains comportements dangereux et de leur poursuite par un cadre réglementaire. D'autres textes ont suivi incluant de plus en plus de mesures cherchant à renforcer la sécurité, comme par exemple, par le Préfet de Police de Paris dans l'ordonnance du 14 août 1893 qui impose « une autorisation de circulation et un certificat de capacité dans le département de Paris » [42]⁴. L'article 21 stipule que « Les véhicules à moteur mécanique devront être desservis par un nombre d'agents suffisant pour la manœuvre des divers appareils et notamment des freins. » [42]. Les deux articles suivants (Art. 22 et 23) instaurent des limitations de vitesse. Par exemple, l'article 22 : « Il ne doit excéder, en aucun cas, les maxima de vitesse prévue par l'autorisation. Il doit, en outre, réduire la vitesse au-dessous de ces maxima autant que les circonstances l'exigent, en tenant compte des facultés d'arrêt dont il dispose, de l'état des appareils et de la voie, des glissements possibles lors de l'arrêt et des circonstances atmosphériques. » [42].

De même, le conducteur doit avoir à sa portée un moyen (corne, trompe, etc.) de pouvoir signaler l'approche du véhicule [42]⁵. Il ne peut circuler « pendant la nuit ou en temps de brouillards sans être pourvu de falots ou de lanternes allumés » [42]⁶. Il est interdit de circuler ou de stationner sur les trottoirs et plus généralement sur toutes les parties de

3. Titre III, Art. 25

4. Titre III, Art. 18

5. Art.24

6. Art. 30

l'espace public réservées aux piétons ou aux cavaliers, de couper les convois funèbres, les groupes scolaires et les détachements de troupes ou convois militaires, de traverser les Halles centrales avant dix heures du matin, de stationner sur la voie publique, etc. [42]⁷

Pour l'ensemble de la France, il faut attendre le décret du 10 mars 1899, portant règlement relatif à la circulation des automobiles, pour avoir le premier code de la route [33]. Il y a ensuite, toute une série de compléments avant que le décret du 27 mai 1921 « réglemente de façon générale la circulation automobile en compilant l'ensemble de la législation passée en vigueur. » [33].

Aujourd'hui, le code de la route est un texte complexe et très complet, regroupant l'ensemble des textes législatifs et réglementaires en 4 livres⁸ :

- livre I, les dispositions générales : définitions, responsabilités (responsabilité pénale, indemnisation des victimes), recherche et constatation des infractions, etc. ;
- livre II, le conducteur : enseignement de la conduite et de la sécurité routière, permis de conduire (délivrance et catégories, reconnaissance et équivalences, permis à points, interdiction de délivrance, rétention, suspension, annulation, invalidation), comportement du conducteur (en cas d'accident, en cas de contrôle routier, conduite sous l'influence de l'alcool, après usage de substances classées comme stupéfiants), etc. ;
- livre III, le véhicule : le poids et la dimensions des véhicules et des remorques, la charge des essieux, l'éclairage, les feux de signalisation et d'avertissement, les pneumatiques, les freins, les organes de manœuvre de direction et de visibilité, l'énergie, les émissions polluantes et nuisances, la réception et l'homologation, l'immatriculation, le contrôle technique, l'assurance, etc. ;
- livre IV, l'usage des voies : la matérialisation des voies de circulation, le sens de circulation, les feux de signalisation, la circulation des piétons et des animaux, les troubles à la circulation, les vitesses, le croisement et le dépassement, l'éclairage et la signalisation de nuit ou de jour par visibilité insuffisante, l'arrêt ou le stationnement, les dispositions complémentaires applicables à la circulation de certains véhicules, les transports exceptionnels et l'ensemble des véhicules comportant plus d'une remorque, etc.

7. Art. 26 à 28

8. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do;?cidTexte=LEGITEXT000006074228>

1.3 Quelques étapes essentielles de l'évolution du code de la route depuis les années 1960

L'évolution du code de la route, avant d'arriver à ce stade aussi élaboré, n'était pas un processus linéaire et une des conséquences était une mortalité routière importante. Ainsi, la Délégation à la Sécurité Routière (DSR) du Ministère de l'Intérieur donne une estimation d'environ 690 000 personnes tuées dans la période de l'après-guerre jusqu'en 2016 [55].

L'année 1972 est une année charnière dans l'histoire de la sécurité routière, car depuis l'apparition des premières automobiles jusqu'à cette année, la mortalité routière avait connu une augmentation accélérée [70]. Après cette date, elle a fortement diminué, même si depuis, deux ans, la tendance s'est inversée [55].

La période menant jusqu'aux années 70 est caractérisée par des réseaux routiers inadaptés, des conducteurs insuffisamment formés, par l'expansion importante du parc automobile après la seconde guerre mondiale et une absence de la sécurité routière du débat politique [55]. Ce dernier point montre que, dans la période d'après-guerre, la population n'avait pas pris pleinement conscience de cette problématique. Le changement était alors plutôt lent à se mettre en place. On peut noter l'année 1953 avec la centralisation des données statistiques par un service central, ce qui a grandement facilité l'analyse des données de la sécurité routière [70]. En revanche, le traitement des principaux points noirs de la sécurité routière n'a commencé qu'en 1960 [55].

L'augmentation de la mortalité routière pendant cette période ne doit pas cacher que différentes mesures de sécurisation, comme l'organisation du trafic routier, l'évolution des automobiles et des réseaux routiers, mais également l'amélioration des services de secours et de soins, etc., ont été mis en œuvre mais n'ont pas donné les résultats attendus. Simplement, leurs effets étaient trop faibles par rapport à l'augmentation importante du trafic routier pendant cette même période. En effet, l'ensemble des actions avait pour conséquence une diminution constante du nombre de tués rapporté au nombre total de kilomètres parcourus. Ainsi, entre 1953 et 1972, le nombre total de morts passe de 7239 à 18034 par an, mais pour la même distance parcourue, le risque d'être tué est divisé par deux [70]. Le graphique de la Fig. 1.1⁹ donne les chiffres de la mortalité (imputable aux suites d'un accident jusqu'à 30 jours), du volume du trafic (en milliard de km), ainsi que du rapport « nombre de tués/volume du trafic » entre 1953 et 2016. Mais l'effort n'a pas été suffisant et à la fin des années 60, en fonction du mode de classement des causes adoptées, le nombre de victimes se situe encore au 4^{ème} ou 5^{ème} rang dans l'ensemble des décès [70].

Suite à une prise de conscience à la fin des années 60, a débuté une longue série de mesures dont nous ne citons que les suivantes : fin 1969, la limitation de vitesse à 90, 100 ou 110 km/h sur 1650 km du réseau routier; en 1970, 12 000 km limités à 110 km/h et l'équipement en ceintures de sécurité obligatoires des véhicules neufs (avril 1970); la limitation du taux d'alcoolémie à 0,80 g/l (juillet 1970); le 1er juillet 1973, la limitation de la vitesse à 100 km/h sur les routes et du port obligatoire de la ceinture de sécurité; en décembre de la même année, une nouvelle limitation de vitesse (120 km/h sur autoroutes et 90 sur route); le 1er janvier 1992, le contrôle technique de tous les véhicules de moins de 3,5 t; le 1er juillet de la même année, le permis à point; en 2003, l'arrivée des radars automatiques, l'interdiction de téléphoner en roulant sans kit main-libre et l'instauration du délit de la conduite sous stupéfiants; le 1er mars 2004, le permis probatoire. Le taux

9. provenant de l'ONISR [55]

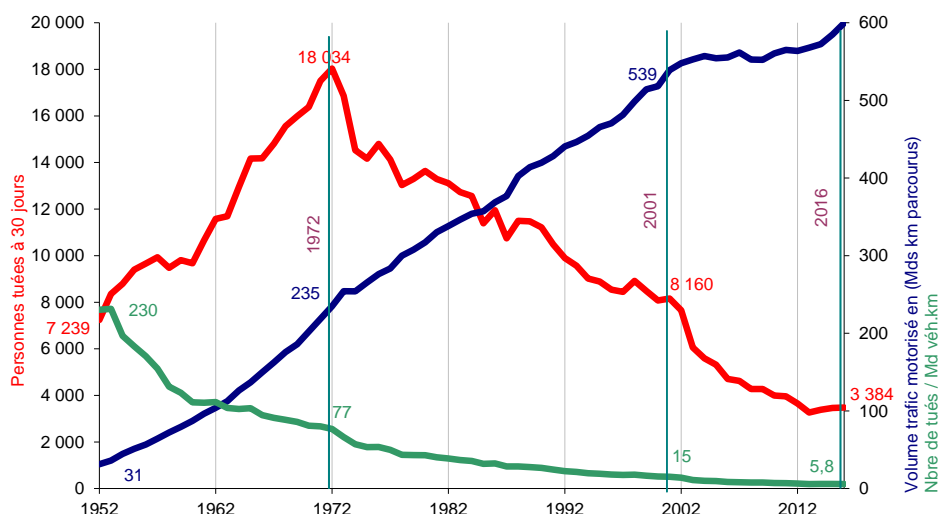


FIGURE 1.1 – Evolution comparée de la mortalité et de la circulation routière entre 1952 et 2016 [55]

d'alcoolémie maximal autorisé a été réduit à plusieurs reprises pour s'établir aujourd'hui à 0,5 g d'alcool par litre de sang (0,2 g/l pour les permis probatoires).

L'ensemble de ces mesures a contribué à une baisse significative de la mortalité routière entre 1973 jusqu'en 2013 (une baisse de 18034 à 3268 morts par an sur les routes de France). Depuis, la tendance est à la hausse : 3384 morts en 2014, 3461 en 2015 et 3469 morts en 2016. Rapporté au nombre d'habitants, la France, avec 54 morts/millions d'habitants (chiffres 2016), présente un taux plus élevé que la moyenne de l'Union Européenne (51 morts/millions d'habitants) [55]. La France se place ainsi derrière les pays Scandinaves, les Pays Bas, l'Espagne et les autres grands pays comme Allemagne, le Royaume-Uni et l'Italie [55]. Rapporté au trafic (exprimé en milliard de véhicules/km), la France se place un peu mieux que la moyenne européenne, mais toujours derrière les pays précités à l'exception de l'Italie [55].

Il est intéressant de noter que dans d'autres pays, l'évolution de la diminution de la mortalité routière est similaire. Par exemple, en Allemagne, le rapport annuel du Ministère du Transport et de l'Infrastructure Numérique¹⁰, montre que le nombre de morts est passé, entre 1991 et 2013, de 11 300 à 3339. Depuis, les chiffres remontent : 3377 morts en 2014, 3459 en 2015 et 3214 morts en 2016. Pour 2017, la tendance est à nouveau à la hausse. De même, au Royaume Uni, le rapport annuel du Ministère du Transport¹¹ fait part, entre 2000 et 2013, d'une diminution de 3409 morts à 1713. Depuis, la mortalité augmente également : 1775 morts en 2014, 1730 en 2015 et 1792 morts en 2016.

10. Bundesministerium für Verkehr und digitaler Infrastruktur, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/verkehr-in-zahlen.html>

11. Department for Transport, <https://www.gov.uk/government/statistics/reported-road-casualties-great-britain-annual-report-2016>

1.4 Causes humaines d'accidents de la route

1.4.1 Principales causes humaines d'accidents de la route selon les statistiques de la sécurité routière

Il se pose alors la question des causes des accidents. Même si on peut constater une évolution des mentalités, notamment en ce qui concerne la lutte contre les addictions au volant [5] ou des comportements tel le respect des limitations de vitesse comme le montre la Fig. 1.2¹², il faut constater que le facteur humain reste le paramètre le moins bien maîtrisé. En effet, en 2016, dans 1 % des cas le facteur véhicule était à l'origine d'un accident mortel, dans 9 % des cas la cause était restée indéterminée, tandis que les facteurs humains apparaissaient dans 90 % des accidents mortels [55]. Même si la vitesse moyenne observée diminue depuis quelques années, elle reste l'un des principaux facteurs d'accidents. Elle n'est pas seulement liée à la fréquence des accidents mais également à leur gravité. La Fig. 1.2 met en parallèle, entre 2000 et 2012, la vitesse moyenne observée en France (sur l'ensemble du réseau routier) et la mortalité routière. La diminution de la vitesse moyenne s'explique, du moins partiellement, par des mesures répressives. Ainsi, l'introduction des radars automatiques en 2003 est clairement visible sur le graphique.

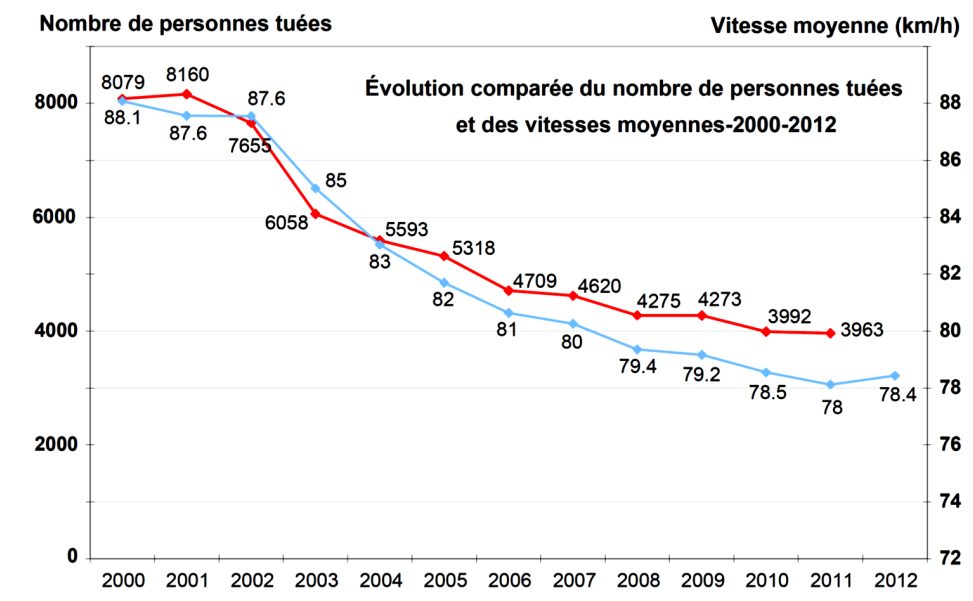


FIGURE 1.2 – Evolution comparée du nombre de personnes tuées et des vitesses moyennes entre 2000 et 2012 [53]

Les principaux facteurs d'accidents mortels sont les suivants [55] :

- l'excès de vitesses ou vitesse inadaptée : 31 % ;
- le refus de priorité : 13 % ;
- le dépassement dangereux : 6 % ;
- la consommation d'alcool et/ou de drogues : pour les auteurs présumés d'accidents mortels (APAM), 19 % ont été testés positifs à l'alcool et 9 % aux stupéfiants. En

12. provenant de [53]

revanche, pour l'ensemble des tués sur la route (donc auteurs ou non), 29 % présentent une alcoolémie positive et 23 % sont sous influence de stupéfiants (parmi les personnes testées positivement à l'alcool, 37 % le sont également à au moins un stupéfiant) ;

- la somnolence : responsable de 9 % des décès sur l'ensemble du réseau. La somnolence concerne 10 à 15 % des conducteurs professionnels et elle est responsable du tiers des accidents mortels sur l'autoroute selon le Conseil National de la Sécurité Routière [39] ;
- l'inattention : 8 % ;
- le téléphone au volant : 1 %.

D'autres comportements, même s'ils ne sont pas directement responsables pour le déclenchement d'un accident, peuvent aggraver les conséquences, comme par exemple le défaut de ceinture de sécurité ou de casque. Ainsi, 21 % des tués dans les véhicules ne portaient pas leur ceinture et 12 % des tués à cyclo et 3 % à moto ne portaient pas de casque [39]. On peut également noter que les différentes statistiques citées, détaillent les chiffres en fonction de nombreux critères comme la catégorie de véhicule, le milieu (agglomération, autoroute, etc.), la catégorie d'usagers (automobiliste, piéton, etc.), l'âge, le genre, l'heure, le jour de la semaine, la saisonnalité ou encore les conditions météorologiques.

1.4.2 Principales causes humaines selon une étude utilisant des données réelles de conduite

La faiblesse des statistiques ci-dessus est qu'il s'agit de résultats phénoménologiques analysant des rapports de police établis après l'accident. Déterminer la cause ou les causes a posteriori n'est pas toujours évident, surtout en ce qui concerne les causes comme l'inattention ou une distance de sécurité trop faible. A ce titre, un laboratoire de recherche, l'IFSTTAR de Salon de Provence, a étudié les causes probables d'accidents [27] [6].

Une autre étude intéressante a été faite par une équipe du Virginia Tech Transportation Institute aux Etats Unis [15]. Les chercheurs de cet institut ont équipé des véhicules de caméras enregistrant (i) la route devant le véhicule, (ii) le visage du conducteur et la vue du rétroviseur (côté conducteur), (iii) la vue du rétroviseur à droite et (iv) l'interaction du conducteur avec le volant et la console centrale. De même, les signaux d'une centrale inertielle, les positions GPS, les signaux d'un radar pour détecter des obstacles devant le véhicule, l'état de l'éclairage et des clignotants, les signaux de capteurs mesurant la présence d'alcool dans l'habitacle, etc. ont été enregistrés. Plus de 3500 conducteurs âgés de 16 à 98 ans ont parcouru pendant 3 ans, plus de 56 millions de km générant plus de 2 pétaoctets de données. Pendant cette période, 1500 accidents dont 905 accidents avec dommages ont été enregistrés et analysés.

Ensuite pour quatre catégories de causes potentielles d'accident (voir la liste ci-dessous), le risque a été déterminé à l'aide d'une analyse combinant une étude de cas et une étude de cohorte (case-cohort study) [44]. Pour cela, les enregistrements vidéo ont été découverts en séquences de 6 secondes pour l'étude de l'influence de distractions (voir la liste ci-dessous) et de 20 secondes pour les autres causes [15]. Dans la liste suivante, les chiffres entre parenthèse, par exemple (1,5 / 2 %), signifient que le risque pour la cause étudiée augmente d'un facteur 1,5 par rapport à une conduite modèle (sans facteurs de risque) et que le facteur de risque était présent durant 2 % du temps de conduite normale (c'est-à-

dire qu'éventuellement il y a conduite avec des facteurs de risque mais sans qu'un accident a lieu) :

- l'altération visible (par vidéo) de l'aptitude à la conduite (5,2 / 1,9 %) : l'alcool et les drogues (35,9 / 0,08 %), la fatigue et la somnolence (3,4 / 1,6 %) et les émotions visibles comme colère ou tristesse, etc. (9,8 / 0,2 %) ;
- l'erreur de conduite (18,2 / 4,8 %) : l'inexpérience apparente (204,5 / 0,07 %), le refus de priorité (936 / 0,01 %), tourner sans clignotant, le non-respect d'un feu tricolore (28,3 / 0,19 %), le non-respect d'un stop (7,4 / 1,05 %), etc. ;
- l'erreur momentanée de jugement (11 / 4,2%) : la conduite agressive (34,8 / 0,1 %), la vitesse trop élevée ou inadaptée (12,8 / 2,8 %), dépassement dangereux ou interdit (14,4 / 0,18 %), le non-respect de la distance de sécurité (13,5 / 0,07 %), le non-respect intentionnel d'un feu tricolore (15,3 / 0,19 %), le non-respect intentionnel d'un stop ou d'un cédez-le-passage (5,3 / 1 %), etc. ;
- la distraction observable (2,0 / 52%) : la manipulation de la radio, de la climatisation, etc. (2,5 / 3,5 %), la manipulation du téléphone portable (3,6 / 6,4 %) dont l'écriture de SMS (6,1 / 1,9 %), la discussion avec passagers (1,4 / 14,6 %), la lecture/écriture y compris sur tablette (9,9 / 0,09 %), manger/boire (1,8 / 3,1 %), l'hygiène personnelle (1,4 / 1,7 %), danser sur le siège au rythme de la musique (1,0 / 1,1 %), la fixation visuelle prolongée d'un objet à l'extérieur (7,1 / 0,93 %), le siège enfant sur la banquette arrière (0,5 / 0,8 %), etc.

Lors de cette étude, près de 88 % des accidents résultent d'une erreur humaine. Regardons un peu plus précisément la cause « distraction ». Peu surprenant, on peut remarquer que les activités qui impliquent que le regard quitte la route sont celles dont le risque est le plus élevé. Mais même le fait de discuter avec un passager augmente le risque d'un facteur 1,4. Il est alors important de retenir que le risque de distraction était présent dans plus de 68 % des accidents avec dommages, que la distraction engendre un risque deux fois plus élevé par rapport à une conduite modèle et surtout elle est présente dans plus de la moitié (52 %) du temps de conduite.

Un autre résultat remarquable de cette étude est que l'influence des émotions (engendre une augmentation du risque d'un facteur 9,8) apparaît comme un facteur négligé dans les études de la sécurité routière. Il est également intéressant de mettre en parallèle le refus de priorité avec l'utilisation d'un téléphone portable. Il est possible de dire que le premier est unanimement considéré comme dangereux et l'étude présentée démontre cette dangerosité puisque le facteur de risque est de 936. Mais il ne se présente que durant 0,01 % du temps de conduite. L'utilisation du téléphone portable n'augmente le risque « que » d'un facteur 3,6 (par rapport au facteur 936) mais comme ce risque est présent durant 6,4 % du temps de conduite, son impact n'est pas moindre par rapport au refus de priorité.

Par conséquent, afin de réduire la mortalité routière, il apparaît important de se concentrer davantage sur le conducteur et sur certains comportements sous-estimés. Même si l'étude présentée a été réalisée aux États-Unis, et même s'il y a sûrement des différences par rapport à la situation en France, dans les grandes lignes, les résultats devraient être également valables ici.

1.5 Comportements des conducteurs et leurs causes

1.5.1 Difficultés à changer le comportement des conducteurs

Nous l'avons vu, certains comportements comme la consommation d'alcool, l'inattention (par exemple par l'utilisation de téléphones portables, etc.) et l'inadaptation des vitesses par rapport aux distances inter-véhiculaires pratiquées, sont à l'origine de l'écrasante majorité des accidents. Le changement de ces comportements se heurte à plusieurs problèmes.

Le rapport rédigé à l'occasion d'une mission d'évaluation de la politique publique de la sécurité routière lancée par le ministre de l'intérieur en date du 2 janvier 2014 et confiée à l'inspection générale de l'administration, avec le concours du conseil général de l'environnement et du développement durable, de l'inspection générale de la police nationale et de l'inspection générale de la gendarmerie nationale [5], donne des éléments d'explication. Dans la section ci-dessous, nous citons quelques passages de ce rapport.

Un autre effet à prendre en compte est la banalisation d'une situation dangereuse par absence de conséquences et que nous présentons en quelques lignes dans la Section 1.5.2. Un dernier aspect que nous allons présenter dans la Section 1.6 est la perception d'une situation de risque par une personne et son attitude par rapport à ce risque.

1.5.2 Extraits du rapport d'évaluation de Bondaz

Comme le montre la discussion actuelle contre la baisse à 80 km/h de la vitesse maximale sur les routes nationales, une bonne partie des usagers n'est réceptive ni à la pédagogie, ni aux résultats des études scientifiques. Ainsi, le rapport établi par Bondaz [5] constate que malgré une baisse importante de la mortalité routière ces dernières années, « le message perçu se concentre essentiellement sur le volet répressif (alcool, vitesse, stupéfiants, téléphone au volant, etc.) ». Le message éducatif sur la vigilance nécessaire à l'activité de conduite, activité dangereuse qui requiert du « professionnalisme » et de la rigueur, passe moins bien. Il est, en effet, plus simple de faire comprendre le nombre de points perdus en cas d'usage du téléphone au volant que le processus cognitif qui explique comment la tâche secondaire « téléphoner » va interférer avec la tâche principale « conduire » [5].

Une autre difficulté est que le débat est souvent faussé par des arguments faisant consensus même s'ils ne sont pas confortés par des études : « Enfin, une meilleure acceptabilité sociale des mesures mises en œuvre en matière de comportement serait possible à condition de ne pas laisser accréditer la légende selon laquelle le volet "sanction" de la politique de sécurité routière aurait une vocation d'imposition déguisée » [5].

Ce qui n'aide pas non plus est la tendance à chercher la faute chez les autres car il existe « une contestation réductrice des tenants de la conduite individualiste : les accidents seraient d'abord liés aux alcooliques multirécidivistes et aux mauvais conducteurs (les autres), plus qu'aux écarts à la règle maîtrisés des bons conducteurs (soi-même). Or, ces présupposés sont démentis par les faits : la plupart des accidents ont lieu lors de parcours usuels à proximité du domicile, sans présence d'alcool dans 70 % des cas ; les femmes et les personnes âgées, souvent accusées de mal conduire, sont beaucoup moins cause d'accident corporel que les hommes jeunes, selon les statistiques de l'ONISR comme celles des assurances. La perte de contrôle, qu'elle soit liée à la fatigue, à l'inattention, à une vitesse inappropriée, à la consommation d'alcool ou de drogue, reste la première cause d'accident. Elle peut concerner tout le monde n'importe quand. La gravité

de ses conséquences est toujours liée à la vitesse, pour des raisons évidentes de physique élémentaire » [5].

Cette même tendance s'exprime également par le constat suivant : « Le message "épidémiologique" qui légitime la priorité d'action sur des risques concernant un grand nombre de personnes plutôt que sur des risques concernant un très petit nombre de personnes est quant à lui totalement inaudible. Les termes du débat sur la limitation à 80 km/heure sur les routes bidirectionnelles en attestent » [5].

Un problème préoccupant est l'acceptation de mauvais comportements et donc implicitement d'une certaine mortalité. Un exemple est l'utilisation des téléphones portables par les conducteurs. En effet, « de nombreux interlocuteurs s'inquiètent de l'usage de plus en plus répandu du téléphone au volant, voire en deux-roues, mais la plupart considèrent qu'il n'est plus possible de réglementer efficacement le téléphone mains libres. En la matière, comme le révèlent plusieurs enquêtes d'opinion, la conviction du danger de cet usage n'empêche pas des conducteurs de plus en plus nombreux d'y avoir recours » [5].

La section suivante approfondit ce dernier point.

1.5.3 Banalisation d'une situation dangereuse

La conduite automobile peut se décomposer en quatre tâches : le prélèvement de l'information, le traitement de l'information, la décision et l'action. D'une part, ces tâches s'effectuent dans un environnement qui évolue constamment et dont la vitesse de changement peut être rapide. D'autre part, elles doivent s'adapter en permanence à ces changements. Cela explique pourquoi la conduite automobile est un processus complexe.

Néanmoins, le permis de conduire est, en général, obtenu au bout de quelques heures de formation seulement. Une des caractéristiques de la conduite automobile est alors qu'il s'agit d'une « activité qui, en dépit des risques qu'elle comporte, s'apprend essentiellement par une pratique individuelle et sans que ne s'exerce de contrôle continu quant à la validité de cet apprentissage. C'est ce savoir-faire empirique (susceptible d'être erroné) et propre à chacun qui servira de « norme de référence » lors de la réalisation de sa tâche » [3].

Un autre aspect est que, selon Hoc [26], le conducteur prend dans un environnement dynamique, une décision en fonction de son objectif, partiellement par anticipation, mais sans examiner toutes les alternatives. Par conséquent, le conducteur, lors de son processus (permanent) d'apprentissage peut apprendre des comportements non adaptés à des situations, lorsque ces comportements ne sont pas corrigés par un formateur ou sanctionnés, ni par les forces de l'ordre (police, gendarmerie) ni par un accident.

Par exemple, considérons le non-respect des distances de sécurité ou l'utilisation d'un téléphone portable au volant. Comme il a été montré dans une section précédente, ces deux comportements augmentent considérablement le risque d'accident. Par contre, pour le processus d'apprentissage, il faut distinguer la situation individuelle (du conducteur seul face au danger) de la situation globale (l'ensemble des conducteurs). Cela signifie que le conducteur seul peut agir différemment par rapport à ses convictions, par exemple il est pour le respect de la distance de sécurité mais lors de sa conduite il ne va pas respecter cette distance. En plus de cela, il faut mettre en relation le nombre d'accidents provoqués par ces comportements par rapport au nombre d'infractions de ce type. Ainsi les conducteurs remarquent que leur négligence n'aboutit pas forcément à un accident.

Même s'il nous manque des statistiques permettant de calculer ce ratio, les chiffres suivants suffisent pour expliquer le principe de « banalisation d'une situation dangereuse

» ce qui est l'objectif de ce paragraphe. Pour cela, nous faisons remarquer que, même si le nombre d'accidents et le nombre de tués sur la route sont importants (en chiffre absolu), le risque individuel reste faible. En effet, selon les chiffres de la sécurité routière en 2011, on comptait 115 accidents corporels par milliard de km parcourus¹³ et en 2013, 5,8 personnes tuées également par milliard de km parcourus¹⁴ comme le montre la Fig. 1.1. Notons que ces chiffres concernent l'ensemble des accidents et non seulement ceux provoqués par le non-respect des distances de sécurité et de l'utilisation du téléphone portable au volant.

Regardons plus précisément le non-respect des distances de sécurité. Les raisons de ce non-respect sont multiples : par exemple l'impression/l'espoir d'aller plus vite, dans le cas d'un conducteur pressé, ou la peur qu'un autre automobiliste pourrait profiter de l'espace jugé et s'intercaler. Ce non-respect n'entraîne pas forcément un accident. Si la voiture suivie ne freine pas, le risque d'un télescopage est faible. Or, dans une situation standard, le risque que le freinage de la voiture suivie surprend le conducteur de la voiture Ego (la voiture qui suit) au point de provoquer un accident, est plutôt faible. Comme ce comportement (c'est-à-dire suivre un véhicule de trop près) n'est pas sanctionné, un conducteur peut très bien prendre l'habitude de ce non-respect et ne plus le considérer comme une situation à risque. En science de l'apprentissage, cet effet est connu sous le nom de renforcement qui est un procédé qui augmente la probabilité de répétition d'un comportement [47].

La situation est similaire avec l'utilisation du téléphone portable. Comme le bénéfice immédiat est supérieur au risque, l'effet de renforcement se trouve amplifié. Ainsi les conducteurs prennent la mauvaise habitude de téléphoner au volant.

13. http://www.securite-routiere.gouv.fr/content/download/21973/191418/version/1/file/partie4+interpretation+de+l'evolution+de+l'accidentalite_web-3.pdf

14. <http://www.securite-routiere.org/Connaitre/2facteursconstants.html>

1.6 Le risque

1.6.1 La définition du risque

Il n'existe pas une seule définition pour la notion du risque. Néanmoins, toutes ont en commun de considérer que le risque exprime le potentiel dommageable d'un événement (ou d'une situation ou d'un objet, etc.), ainsi que le caractère incertain de celui-ci. En fonction du champ d'application, il peut être avantageux de distinguer le risque objectif du risque subjectif [24].

Le risque objectif également appelé le risque réel, n'a pas non plus une définition unique. Pour Castagnino [32], il s'agit du risque « réellement encouru par le sujet au regard des ressources dont il dispose pour y faire face » sans préciser davantage la notion de risque réellement encouru. La définition du risque objectif qui nous préoccupe, renvoi à tous les dangers (y compris menaces) mesurables par des valeurs ou des statistiques. Notons déjà à ce stade que le risque objectif n'est pas un risque absolu dans le sens qu'il est déterminé par des mesures et donc à la base de signaux/données disponibles. Lorsqu'un processus est mal modélisé ou pas complètement connu ou compris, il se peut que le risque calculé soit très différent du risque qui existe réellement. Ce risque fera objet d'un paragraphe dans le Chapitre 2.

Pour le risque subjectif (ou risque ressenti ou risque perçu) on peut également trouver différentes définitions mais le plus souvent pour ces définitions le risque subjectif est établi au travers des représentations de la personne estimant le risque. Cette personne « ne dispose pas de toutes les informations nécessaires et [il] se construit lui-même des hypothèses concernant son environnement. L'individu fait face à ses limites cognitives qui réduisent ses anticipations et ses limites d'assignation de probabilités aux conséquences négatives. Il doit donc faire preuve de subjectivité pour pallier à ce problème » [24]. Comme l'écrit Banet [3], « le conducteur doit tout d'abord se rendre compte que la situation de conduite dans laquelle il évolue, présente un danger pour lui, puis, il doit ensuite évaluer ce risque à partir des quelques informations dont il dispose, avec ses propres compétences et ses capacités cognitives du moment, le tout dans le temps imparti qu'il lui reste pour pouvoir engager une manœuvre d'urgence ». Le problème de la disponibilité des informations pertinentes et le temps de traitement dont dispose le sujet pour réagir, est d'ailleurs transposable dans le cas où un conducteur humain est remplacé par un système d'aide à la conduite ou d'un véhicule autonome.

Même s'il y a des recouvrements possibles entre le risque objectif et le risque subjectif, le problème est que leur corrélation dépend de nombreux facteurs. D'une part, le risque ressenti dépend de l'individu : deux personnes différentes ressentent le risque différemment [68]. Il se peut qu'en fonction de la personne, un risque peut être perçu comme négatif mais parfois également comme positif et même comme source de plaisir [3]. D'autre part, le risque ressenti n'est pas entièrement individuel puisqu'il est « également façonné par le collectif, dans la mesure où la compréhension du risque et les ressentis face au risque sont pour une large part apprises par l'éducation ou lors de pratiques collectives avec ses pairs. L'évaluation du risque est par conséquent socialement et culturellement structurée voire déterminée » [3].

Au plan individuel, comme le souligne Castagnino [32] « le risque est d'autant plus subjectif que le sujet est débutant dans l'activité, qu'il entretient avec cette activité une relation empreinte d'émotion ». Lié à cela est le facteur de l'habitude qui influence également la perception du risque [3].

Un autre facteur supplémentaire à prendre en compte est que « cette appréhension

du risque peut engendrer des comportements irrationnels » [32]. Par conséquent, même si initialement le risque objectif est quasiment nul, si le sujet est persuadé d'être en présence d'un risque important, il peut par sa réaction, éventuellement non appropriée (par exemple une réaction de panique) créer une situation (maintenant réellement) dangereuse.

La perception du risque peut également dépendre de la distance par rapport au risque « réel ». C'est-à-dire, le risque peut être perçu différemment lorsque le risque paraît abstrait ou éloigné ou si la personne se trouve « in situ » directement confrontée à la situation du risque [3].

Une différence importante entre le risque objectif et le risque subjectif est que pour le dernier, la responsabilité du sujet est pleinement engagée « puisque c'est à lui d'évaluer le risque et de décider du comportement à tenir face au danger qui le menace » [3]. Dans le cas du risque objectif issu d'une mesure ou d'une estimation d'un expert (donc différent du risque subjectif), « la responsabilité de l'individu n'est pas directement ou systématiquement engagée » [3].

1.6.2 La prise de risque

Le risque est une caractéristique d'un événement ou d'une situation. Il s'agit d'une caractérisation statique, c'est-à-dire la qualification de la situation à un instant donné. Une question intéressante porte sur le choix et les décisions qui ont mené à une situation risquée. Pour cela, il est utile d'introduire deux notions, la prise de risque et le risque préférentiel.

En suivant Irwin [31], la prise de risque est un comportement volontaire, dont l'issue est incertaine et peut avoir des conséquences négatives. Si cette définition peut directement s'appliquer à un conducteur humain pour caractériser sa conduite, d'une certaine façon, elle s'applique également dans le cas d'un ADAS ou d'un véhicule autonome, où la prise de risque est déterminée par un appareil/algorithmes et, in fine, par le concepteur/-programmeur.

Le risque préférentiel (ou risque attendu) est défini [14] comme le niveau subjectif de risque où le sujet estime que le rapport entre les bénéfices escomptés (dans notre cas un gain de temps de trajet, un plaisir, etc.) et les coûts prévisibles liés au comportement adopté (à quel danger le conducteur s'expose, les dégâts matériels et physiques qu'il peut subir). Son niveau est déterminé par quatre types d'utilités subjectives : (1) les bénéfices escomptés liés à l'adoption de comportements risqués, (2) les coûts prévisibles de l'adoption de ces comportements, (3) les bénéfices escomptés liés à l'adoption de comportements sûrs, (4) les coûts prévisibles de l'adoption de ces comportements [14]. On peut donc voir le risque préférentiel comme une anticipation des bénéfices et des coûts de comportements futurs.

Concernant ce risque préférentiel, selon Wilde [14], « les utilités subjectives sont probablement tellement intériorisées que la plupart du temps les individus n'en ont pas conscience. En outre, le risque préférentiel est un construct élaboré de manière intuitive, et non le résultat de calculs explicites des probabilités de résultats particuliers et de leurs valences positives et négatives ». Selon la théorie de Wilde [14], le sujet compare à tout moment, les niveaux du risque préférentiel et du risque attendu et il tente d'en réduire les écarts. Delignières [14] donne l'exemple d'un conducteur sur l'autoroute qui module sa vitesse en fonction des enjeux de son déplacement avec comme paramètres par exemple : un rendez-vous important, un éventuel retard, le mauvais état des freins du véhicule et la présence éventuelle d'un radar fixe.

Même la mise en place de certains ADAS et du renforcement de la sécurité passive, pour diminuer les conséquences de ces comportements connaît des limites. En effet, selon Delignières [14], diverses expériences ont montré que l'amélioration de la sécurité passive pouvait entraîner une diminution momentanée de la mortalité, mais que cet effet ne tenait pas sur le long terme. La raison est que ce type de systèmes ne modifie pas le risque préférentiel mais seulement le risque perçu [14]. Par un effet de conservation du risque, « les sujets ont tendance à adopter des comportements plus risqués » [14].

A ce stade, il semble utile de rappeler l'effet de banalisation d'une situation dangereuse qui résulte d'une absence de sanction (policière ou par accident), par exemple dans le cas d'un non-respect de la distance de sécurité. Le risque (subjectif) intervenant dans le risque préférentiel étant particulièrement sous-estimé par rapport au risque objectif, ce dernier sera d'autant plus élevé et ignoré (car les conducteurs n'ont pas une bonne capacité d'évaluation du danger).

Le dernier point abordé ici est le cas particulier de la « recherche de sensations ». Ce terme a été introduit par Zuckerman [71] dans les années soixante qualifiant un individu caractérisé par « un besoin élevé d'intenses formes de stimulations et d'expériences nouvelles, complexes et variées ». Banet [3] cite des études montrant que des personnes à la recherche de sensations sont plus enclins à adopter des comportements de risque au volant.

Dès lors, on comprend la nécessité, sous le point de vue de la sécurité routière, d'une évolution des véhicules actuels vers le véhicule autonome.

1.7 De l'aide à la conduite vers la voiture autonome

Cette prise de conscience du risque par les constructeurs automobiles, les a également amené à renforcer dans un premier temps la sécurité passive des véhicules. Par exemple, en améliorant l'absorption de l'énergie d'impact par la déformation prévue de la structure ou par une meilleure prise en compte de la dynamique véhicule lors de la phase de conception ou encore la mise en place du pré-tensionnage de la ceinture de sécurité combinée à l'airbag. A partir du milieu des années 80, les premiers éléments de sécurité active ont fait leur apparition avec les premières versions de l'anti-blocage de roues (ABS¹⁵). Ces systèmes d'aide à la conduite (ou ADAS¹⁶) sont développés dans le but d'assister et de suppléer le conducteur lors d'action de conduite jugées inopportunes

Certains ADAS sont aujourd'hui de série tels que l'ABS et l'ESP¹⁷ dans le but d'augmenter la sécurité routière. Mais cela ne suffit plus pour réduire l'accidentalité routière. En conséquence, de nouvelles technologies voient le jour (ADAS) telles que par exemple le détecteur de franchissement de ligne blanche (par infrarouge), la détection de somnolence (en analysant les mouvements du volant ou la scène¹⁸). En outre, certaines aides à la conduite comme le détecteur de franchissement de ligne sont également le support d'autres ADAS, ici le maintien dans la voie¹⁹ qui combiné à la direction assistée permet de maintenir le véhicule dans sa voie de roulage.

Ce développement des ADAS a pour but de surveiller le conducteur, de lui retirer certaines tâches fatigantes (par exemple, l'assistance au stationnement du véhicule) ou encore de le suppléer dans le cas de manœuvres d'urgence (comme avec le freinage d'urgence en présence d'obstacle). Grâce aux développements de ces ADAS donc à l'automatisation croissante des organes et tâches du véhicule, nous arrivons vers une automatisation complète du véhicule. Nous pouvons citer les véhicules de Tesla²⁰, Volvo²¹ ou Google.

15. de l'allemand Antiblockiersystem car le premier système a été commercialisé par Bosch

16. de l'anglais Advanced Driver-Assistance Systems

17. de l'anglais Electronic Stability Program ou l'électrostabilisateur programmé

18. Chez Skoda, http://www.skoda.fr/experience/assistance-a-la-conduite?camp=b_fabia_automoto_0616

19. en anglais le Lane-keeping Assist. <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-rewards-explained/lane-support/>

20. https://www.tesla.com/fr_FR/models

21. <https://www.volvocars.com/fr/univers-volvo/notre-vision/voiture-autonome/conduite-autonome/lacher-prise>

Chapitre 2

La modélisation du risque

Sommaire

2.1	Introduction	20
2.2	Présentation des outils mathématiques	21
2.2.1	Présentation du Réseau Bayésien	21
2.2.1.1	Possibilité de raisonnement offerte par les réseaux Bayésiens	22
2.2.1.2	Étapes du développement d'un réseau Bayésien	23
2.2.1.2.1	Choix de la granularité des nœuds	23
2.2.1.2.2	Détermination de la structure du réseau Bayésien	23
2.2.1.2.3	Détermination des modèles probabilistes ou paramétrage des tableaux de probabilités	24
2.2.2	Les réseaux de véhicules communicants	25
2.3	Le réseau Bayésien développé	27
2.3.1	Introduction : les trois entités	27
2.3.1.1	Le conducteur	27
2.3.1.2	Le véhicule	28
2.3.1.3	L'environnement	28
2.3.2	Développement de la structure du réseau Bayésien	29
2.3.2.1	Discussion des nœuds principaux	31
2.3.2.1.1	Le temps de réaction du conducteur	31
2.3.2.1.2	La décélération maximale	35
2.3.2.1.3	L'intention de freinage du véhicule Front	36
2.3.2.1.4	Les risques	38
2.3.3	Modèle probabiliste	40
2.3.3.1	Nœud Fatigue	40
2.3.3.2	Nœud Monotonie de la Route	43
2.3.3.3	Nœud Attention	44
2.3.3.4	Nœud Temps de Réaction	47
2.3.3.5	Nœud Risque de Télescopage	49
2.3.3.5.1	Calcul du risque de télescopage	50
2.4	Conclusion	56

2.1 Introduction

Du fait du trop grand taux de mortalité et de blessés, les législateurs ainsi que les constructeurs automobiles ont lancé des mesures afin de réduire ces chiffres. Dans le cas de l'automobile, cela se concrétise par le développement de systèmes d'aide à la conduite ainsi que l'émergence d'une nouvelle thématique qui est la voiture autonome. Dans ce contexte, nous allons modéliser le risque de collision dans le cas particulier du télescopage qui correspond à 7% des accidents mortels [55]. Pour cela, nous allons tout d'abord définir le risque puis nous utiliserons une version réduite pour notre étude de cas. Avant de nous concentrer sur le télescopage, nous aborderons les différentes situations de risque de collisions. Pour notre modélisation du risque nous utiliserons les RB. De ce fait, nous ferons un rappel de la méthode des RB. Par la suite, nous développerons notre modélisation à travers le formalisme des RB : les relations entre parents et enfants ainsi que les liens quantitatifs qui les lient.

Dans la Section 2.2, nous présentons les outils mathématiques utilisés qui sont les RB et les VANET. Dans la Section 2.3, nous détaillons la démarche utilisée afin d'obtenir les variables qui interviennent dans le risque et la traduction de ces liens en RB. Puis, nous discutons des probabilités et de leurs obtentions.

2.2 Présentation des outils mathématiques

Notre but est de déterminer le risque routier en utilisant deux outils qui sont les **réseaux Bayésiens (RB)**, ou *Bayesian Network* et la **communication véhiculaire (VANET)**, ou *Vehicular Adhoc NETWORK*. Ces outils vont nous permettre de détecter et d'évaluer les situations de risques : le risque de collision dans un croisement en « T » ou en « X », le risque de télescopage entre l'arrière du véhicule suivi (que nous nommerons par la suite Front) et l'avant du véhicule suiveur (appelé par la suite Ego), collision frontale lors d'un dépassement, le risque lors du rabattement qui peut induire une collision latérale ou un télescopage, le risque de collision latérale ou frontale avec un piéton ou un cycliste et le risque de perte de contrôle du véhicule en sur ou sous virage qui entraîne une collision avec l'environnement. Ces situations de collision sont les conséquences du système « conducteur, véhicule et environnement » que nous verrons dans la Section 2.3.1.

Selon l'organisation internationale des normes, la norme 31000¹ définit le risque comme la combinaison entre la gravité du danger (c'est-à-dire l'impact, les dégâts engendrés) et l'occurrence de probabilité ce qui signifie la probabilité d'exposition à ce danger : le risque = gravité × exposition. Les recherches menées dans le domaine du risque ont favorisé le développement de modèles de gravité d'impact et de collision [56]. A l'opposé, la probabilité d'exposition au danger est peu étudiée soit par manque de données statistiques, soit pour des raisons d'impossibilité de mesures. De ce fait, dans cette thèse nous nous focalisons plus particulièrement sur l'aspect évaluation de l'exposition au danger grâce à la quantité d'information que nous possédons au travers des informations de position avec la **détection et estimation de la distance par laser (LiDAR)** ou *light detection and ranging*, des données de localisation et des capteurs du bus CAN en utilisant la communication véhiculaire permettant l'échange de ces informations. Pour la suite, nous emploierons le terme de risque pour qualifier l'exposition au danger car nous avons pour but d'évaluer le danger quelle qu'en soit la gravité résultante.

2.2.1 Présentation du Réseau Bayésien

Les **RB** sont la combinaison de la théorie des probabilités et de la théorie des graphes. Les **RB** peuvent adopter une structure causale ou corrélative ou tout bonnement une structure aléatoire (cas peu fréquent du fait de la complexité des calculs et de la non praticité des résultats obtenus). Les **RB** sont surtout employés pour décrire des situations où l'information est incertaine qui peut également être méconnue ou ignorée. Les probabilités obtenues donnent une représentation de la connaissance que nous avons de la situation.

Un **RB** [49] dont le graphe est $G(X, \Omega)$ est composé de nœuds X représentant des variables discrètes ou continues et l'ensemble des arcs Ω sont orientés. Les nœuds sont des variables aléatoires notées $X = X_1, \dots, X_i, \dots, X_n$ qui peuvent être des variables mesurées ou non. Dans le jargon des **RB**, une variable mesurée est également nommée variable observée. Pour la suite des explications nous nous baserons sur l'exemple de la Fig. 2.1 et nous nous intéresserons uniquement au cas des nœuds discrets. Sur cette figure, le nœud *Température* est le parent du nœud *Météo* qui est lui-même parent du nœud *Etat de la Route*. A l'inverse, le nœud *Etat de la Route* est l'enfant du nœud *Météo* et la *Météo* est l'enfant des nœuds *Température* et *Précipitation*. Les nœuds se trouvant tout en haut du graphe sont également nommés nœuds racines, c'est le cas de *Température* ou *Précipitation*. Inverse-

1. <https://www.iso.org/fr/iso-31000-risk-management.html> ou pour le guide https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/archive/pdf/fr/iso_31000_for_smes.pdf

ment, en bas du réseau les nœuds sont appelés nœuds feuilles tel le nœud a_{max} (qui représente la décélération maximale du véhicule et qui est développé plus tard). Le RB relie les nœuds par des arcs orientés. Nous appelons circuit un chemin menant d'un nœud vers un autre nœud. La structure d'un RB ne peut contenir de cycle, c'est-à-dire qu'il ne peut contenir de circuit fermé. Les RB sont donc des graphes acycliques ([57], [50]). Chaque nœud racine est caractérisé par une probabilité a priori. La probabilité des autres nœuds se calculent à l'aide des probabilités conditionnelles comme sur l'exemple de la Fig. 2.2. Sur cette figure, le tableau conditionnel de « Y » dépend des états des nœuds parents ici « X » auquel « Y » est lié.

Ce qui donne par la suite le théorème de Bayes défini par l'Eq. 2.1 :

$$P(X|Y) = \frac{P(Y|X) \cdot P(X)}{P(Y)} \quad (2.1)$$

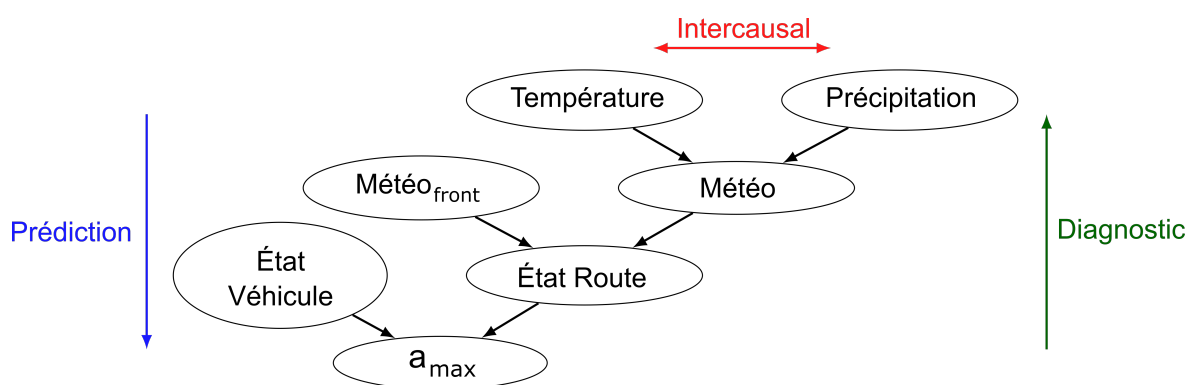


FIGURE 2.1 – Possibilité de raisonnement des réseaux Bayésiens

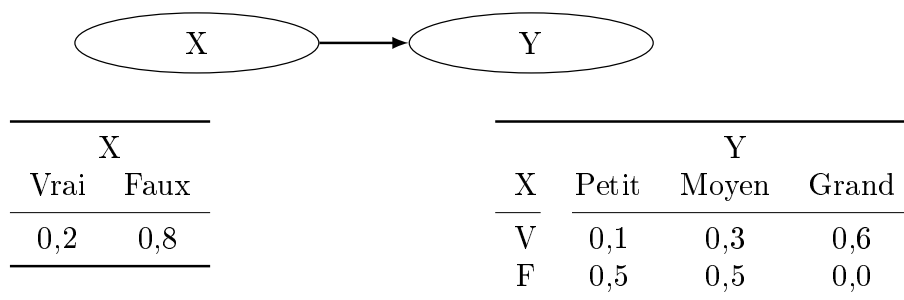


FIGURE 2.2 – Tableaux de probabilités a priori et conditionnelles

A noter que pour le cas d'un capteur sans incertitude, les valeurs du tableau sont déterministes. Si le capteur tient compte d'incertitude alors les valeurs fournies sont des probabilités.

2.2.1.1 Possibilité de raisonnement offerte par les réseaux Bayésiens

Les RB permettent d'explorer trois types d'analyses pour la détermination des probabilités [37] ou [49] :

- la prédiction va des racines vers les feuilles comme le montre la Fig. 2.1. Ici nous faisons une observation sur l'un des nœuds parents ou sur plusieurs nœuds parents afin de déterminer la probabilité d'un nœud enfant (la flèche en bleue sur la Fig. 2.1). Ce raisonnement permet l'étude des éventuelles conséquences;

- le diagnostic permet de déterminer les causes potentielles à partir d'un symptôme (la flèche verte sur la Fig. 2.1). L'utilisation du diagnostic est répandue dans le domaine médical ;
- le raisonnement intercausal permet d'obtenir une information sur un nœud se trouvant au même niveau que le nœud observé. Il résulte du raisonnement des deux précédents types d'analyse.

Dans notre cas d'étude, nous utilisons la prédiction afin d'évaluer la probabilité de risque.

2.2.1.2 Étapes du développement d'un réseau Bayésien

Les trois étapes du développement d'un RB sont décrites ci-après.

2.2.1.2.1 Choix de la granularité des nœuds

Pour décrire un RB, il faut tout d'abord définir le type des nœuds nécessaires : continu ou discret. Par la suite, nous nous focaliserons sur les nœuds discrets qui sont décrits par un nombre d'états finis et mutuellement exclusifs. Cette étape est nommée choix de la granularité et correspond au nombre d'états décrivant le nœud. Le choix de la granularité doit se faire en accord avec la précision disponible sur le système et l'utilisation qui en est faite. Reprenons l'exemple de la Fig. 2.1, le nœud *Température* est une variable continue qui pourrait donc se discrétiser en une infinité d'états. Néanmoins, si le but de ce nœud est juste d'indiquer si le sol est gelé ou non alors deux états suffisent. Dans notre domaine d'application, nous voulons caractériser l'état verglacé de la route, nous introduisons ainsi quatre états :

- un état qui nous permettra de dire que l'apparition du verglas est improbable ($> 4^{\circ}\text{C}$) ;
- un état où l'apparition de verglas est très probable ($< -3^{\circ}\text{C}$), risque de sol gelé pour un salage normal ;
- un état entre 1 et 4°C qui permet d'indiquer la possibilité de gel du fait de l'humidité ambiante et de l'action du vent ;
- un dernier état entre -3 et 1°C , où l'apparition de verglas est probable et dépendra du salage.

La valeur absolue des limites n'est pas critique puisque cela entrera dans les marges de sécurité. Le gel dépend d'autres paramètres tels la concentration de sel, du type de salage utilisé, de l'efficacité du salage, l'heure où le salage a été effectué, du type de sol, de la fréquentation, etc. Informations que nous ne possédons pas toujours. Cependant, cela nous permet de prendre en compte et d'avoir une idée sur la probabilité que la route soit gelée ou non. Ajouter plus d'états nécessite plus d'informations que nous n'avons pas. Sans ces informations, l'augmentation de la granularité engendrerait une augmentation de l'incertitude. En conséquence, il est nécessaire de faire un compromis entre la granularité et l'information présente. Mais il est également important de noter que ce compromis pourra toujours être revu par la suite si de nouvelles informations deviennent disponibles.

2.2.1.2.2 Détermination de la structure du réseau Bayésien

Plusieurs types de raisonnement existent pour la recherche de structure, par exemple les méthodes d'apprentissage du réseau comme la méthode K2 [10], de recherche glou-

tonne ou d'algorithme génétique [40]. Mais pour utiliser ces méthodes, il faut être en possession de données statistiques importantes et précises afin d'obtenir le réseau le plus représentatif. Il est également possible, si nous possédons un modèle probabiliste d'y associer une structure qui correspond à ce modèle [37]. La dernière possibilité est une connaissance des relations de cause à effet. Pour la construction de notre réseau bayésien, nous avons opté pour une représentation causale qui permet une représentation lisible et facilement exploitable par différentes personnes. Les deux premières méthodes posent le problème du choix des nœuds. Dans l'exemple précédent, afin d'améliorer la précision sur notre nœud a_{max} , nous aurions pu compléter le graphe avec le nœud *Revêtement* (c'est-à-dire le type de revêtement décrivant l'état du macadam, la présence de gravillons ou de pavés, etc.) et un lien de ce nœud vers le nœud a_{max} comme sur la Fig. 2.3. Cependant, pour introduire ce nouveau nœud *Revêtement* il faudrait des informations sur l'état du revêtement que nous ne possédons pas pour le moment. Ainsi, il y a un compromis à faire entre la représentation du système et les informations disponibles.

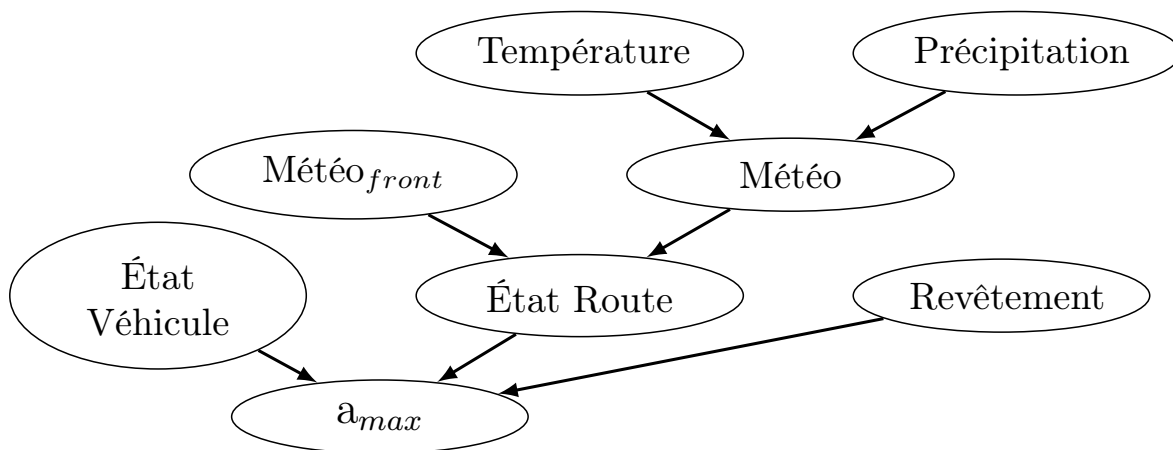


FIGURE 2.3 – Structure graphique possible des nœuds composant le nœud a_{max}

2.2.1.2.3 Détermination des modèles probabilistes ou paramétrage des tableaux de probabilités

Le paramétrage des tableaux de probabilités fixe les probabilités a priori et conditionnelles du réseau. Si nous disposons d'exemples représentatifs et précis alors nous pouvons utiliser des méthodes d'apprentissage de paramètres telles que l'algorithme de maximum de vraisemblance proposé par Dempster [16], qui auront pour but de remplir les tableaux de probabilités. Dans le cas où les informations sont peu précises, hétérogènes, disparates ou absentes, il est impossible d'utiliser des méthodes d'apprentissages. Il faudra alors utiliser les relations probabilistes provenant de la statistique ou des connaissances d'experts. Dans notre étude, nous n'avons pas utilisé les méthodes d'apprentissage, ni les méthodes statistiques à l'exception de quelques nœuds car il nous aurait fallu des informations sur les différentes situations de risques. Par exemple, dans le cas du télescopage, il faudrait faire des tests de collisions avec différents paramètres dans plusieurs cas : temps de réaction, types de véhicules, vitesses, inter-distances, etc. Ces différents tests sont très difficiles à mettre en place du fait de la dangerosité et des coûts que ceux-ci induiraient. De ce fait, nous avons opté pour une combinaison entre connaissances d'experts et statistiques.

2.2.2 Les réseaux de véhicules communicants

Les réseaux de véhicules communicants [18] font partie des systèmes de transports intelligents (Intelligent Transportation System [17]) permettant de fournir différents services. Ces services regroupent la fluidification, la sécurité du trafic et des aspects plus ludiques. Il y a également les réseaux véhiculaires comme le montre la Fig. 2.4 permettant la **communication entre véhicules (V2V)**, ou *Vehicle to Vehicle* et la **communication entre véhicules et infrastructures (V2I)**, ou *Vehicle to Infrastructure*. Les véhicules communiquent via des unités embarquées (On Board Unit – OBU) comprenant des capacités de communication, des capacités de calculs et des interfaces vers les capteurs du véhicule. L'infrastructure est quant à elle dotée d'équipements de bord de route (Road Side Unit - RSU) avec des capacités multiples de communication (y compris entre RSU distantes) et de capacité de calculs.

Les VANET permettent d'offrir des services concernant la sécurité des véhicules comme par exemple des systèmes d'alerte concernant les accidents, les alertes sur les infrastructures telles que la signalisation, les conditions de circulation (météo, trafic, état des routes, etc.) mais aussi des aspects plus ludiques tels l'accès internet et des systèmes de localisation autour de points d'intérêts dynamiques.

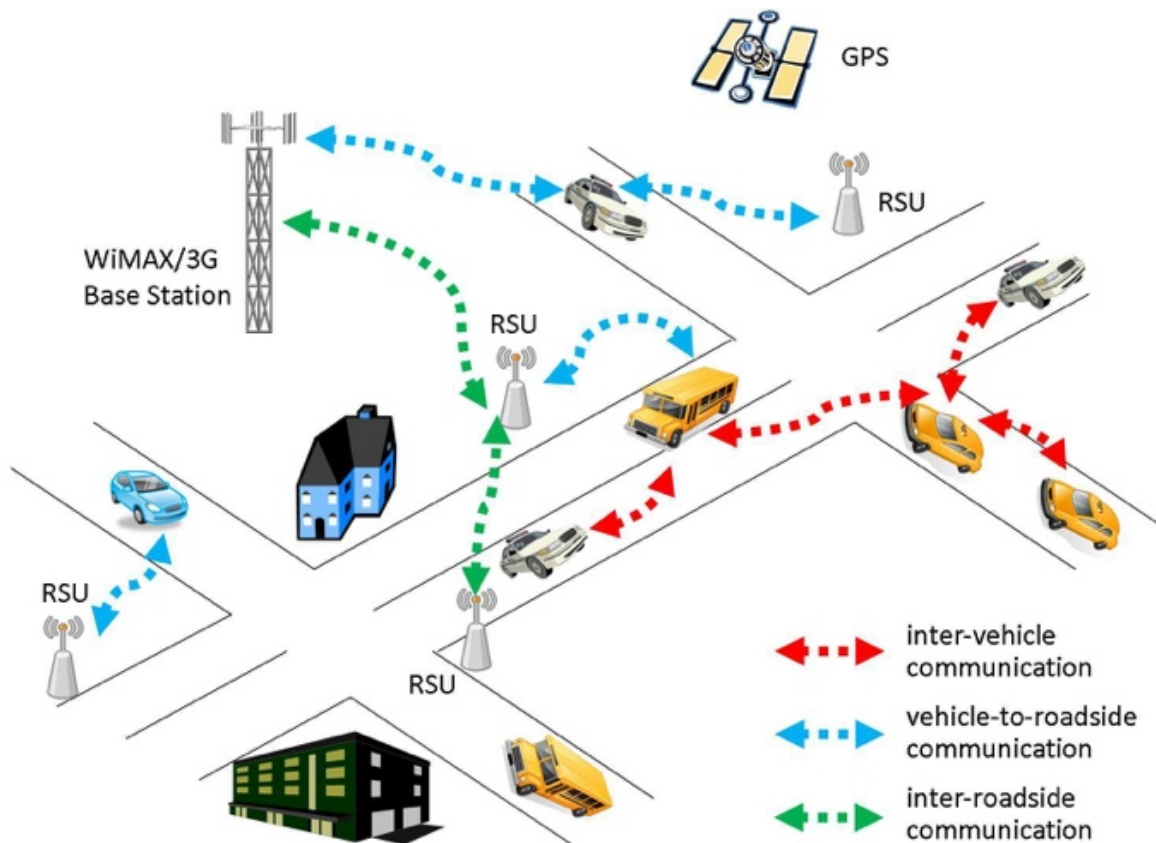


FIGURE 2.4 – Communication véhiculaire (V2V et V2I via des unités de bord de route (RSU) et des unités embarquées sur les véhicules (OBU))

Les VANET sont un sous-ensemble des **réseaux mobiles adhoc**, ou *Mobile Adhoc Network* [11] avec des contraintes différentes puisque les véhicules se déplacent sur des chemins prédéfinis à des vitesses pouvant être importantes (selon les limitations légales). Les VANET possèdent aussi des capacités de calculs importantes sans limitation d'énergie contrairement aux réseaux mobiles adhoc.

La communication V2V ou V2I se fait à l'aide de technologies sans fil IEEE 802.11 ou Wireless Fidelity (WiFi) et plus particulièrement le protocole 802.11p [29]. Ce protocole fait partie de l'architecture Wireless Access for Vehicular Environment (WAVE [30]) définissant une pile de protocoles dédiée aux réseaux véhiculaires.

Les contraintes de la norme 802.11p sont liées aux phénomènes de propagation qui seront décrits dans la Section 3.3.2.1. Ces phénomènes peuvent induire des problèmes de communication entraînant des pertes d'informations ou des délais dans l'échange de ces informations.

Concernant les mesures effectuées dans le cadre de cette thèse, celles-ci sont réalisées de deux façons différentes : des mesures réelles et des mesures via un simulateur réseau couplé à une librairie modélisant les RB. Les mesures réelles ont l'avantage de fournir des données physiques réalistes mais elles restent coûteuses à obtenir (flotte de véhicules nécessaire). A l'opposé, l'approche par simulation est moins coûteuse mais est moins réaliste. Cependant, elle permet d'avoir des situations reproductibles dans des milieux hétérogènes comme dans des villes européennes ou américaines (typologie des routes différentes) et dans des situations extra-urbaines (autoroute, campagne, etc.) où l'infrastructure joue un rôle essentiel. L'ensemble des outils utilisés, développés et les résultats sont décrits dans les Chapitres 3 et 4.

Cette introduction sur les VANET ne peut pas se terminer sans évoquer les aspects sécurité informatique [46] et les aspects de routage dans ces réseaux dynamiques [41]. La sécurité informatique au sens piratage reste un enjeu majeur dans les VANET et se doit d'être performante pour éviter des situations dangereuses au regard de la sécurité du trafic. Les aspects routage sont basés sur des protocoles multi-sauts permettant d'acheminer des messages de bout en bout et ce, au-delà de la portée des capteurs de véhicules [67] (entre plusieurs centaines de mètres et plusieurs kilomètres). Ces deux derniers points ne sont pas traités dans cette thèse.

La communication est un des éléments majeurs qui apportent des informations et constituent ainsi des nœuds dans le RB.

2.3 Le réseau Bayésien développé

Dans le domaine automobile, plusieurs types de risque peuvent se produire. Ici nous nous focalisons sur deux risques particuliers : le télescopage qui se traduit par une collision entre deux véhicules (ou plusieurs) et la sortie de route. Il est à noter qu'il y a une relation entre trois entités couplées : le conducteur, son véhicule et l'environnement que nous allons décrire dans cette partie. Le couplage de ces trois entités engendre le risque.

2.3.1 Introduction : les trois entités

2.3.1.1 Le conducteur

Le conducteur est le responsable principal des décisions prises. En deuxième lieu, ce sont les systèmes d'aides à la conduite. Par exemple, l'électrostabilisateur programmé² couplé à l'ABS va permettre de contrôler la trajectoire du véhicule en agissant sur les roues. Dans le cas de l'estimation du risque, nous distinguons trois situations :

- le conducteur n'a pas un comportement adéquat, celui-ci prend délibérément de mauvaises décisions. Ce conducteur prend des risques afin de satisfaire un besoin personnel [3], soit pour le plaisir (dans le but de ressentir une sensation forte), soit pour le cas d'un gain personnel (comme chercher son enfant à l'école, gagner en temps de trajet). Un exemple de comportement inadéquat du conducteur : celui-ci double une file de véhicules avec une faible visibilité tout en coupant la ligne continue;
- le conducteur prend de mauvaises décisions sans s'en rendre compte, soit par négligence, soit par manque d'expérience. A titre d'exemple, le conducteur peut avoir une vitesse inadaptée à une situation ;
- les conducteurs subissant les fautes ou erreurs de conduite des autres usagers. Elles sont en situation de danger du fait des situations décrites ci-dessus.

Le conducteur détermine sa vitesse, son accélération, son cap et l'inter-distance avec les autres véhicules. Tous ces facteurs sont fonction des aspects physiologiques, psychologiques et du caractère du conducteur (l'approche qu'il a par rapport à la conduite). Le temps de réaction du conducteur représente également un critère important pour la criticité du danger, qui dépend notamment de :

- la fatigue notamment en cas de somnolence. L'apparition de la fatigue peut dépendre de la saison [65], de l'heure de la journée (par exemple conduire de nuit ou après une journée de travail) [8] et de la durée du trajet ;
- la concentration. Par exemple, si le conducteur est distrait par une conversation, de la musique ou en consultant un appareil électronique (GPS, cellulaire, etc.) [59] ;
- l'âge [20] ;
- le caractère du conducteur c'est-à-dire l'approche qu'il a vis-à-vis de la conduite : une conduite sportive ou douce ;
- l'état psychologique (stress, états émotionnels) qui pourra influencer sa manière de conduire et la vigilance.

Tous ces facteurs vont impacter la conduite et par là, le risque.

Un aspect qui n'est pas étudié est la possibilité d'évaluer le comportement et la conduite du conducteur en analysant son attitude sur la route :

2. ESP, Electronic Stability Program

- les accélérations et les freinages : est-ce que le conducteur anticipe les freinages et les actions des autres véhicules? a-t-il une conduite sportive?;
- le suivi de trajectoire : suit-il la courbure de la route ou oscille-t-il?, s'arrête-t-il au stop? respecte-t-il les distances de freinage, les vitesses?

2.3.1.2 Le véhicule

Le véhicule est caractérisé par sa dynamique : vitesses et accélérations. Ses états dynamiques sont conditionnés entre autres par sa conception mécanique et ses équipements. En effet, la conception mécanique a un impact sur le roulis, le tangage, le lacet, le centre de gravité et par conséquent sur la tenue de route du véhicule. Elle a également un impact sur le risque absolu c'est-à-dire la gravité qui se verra au travers des zones de déformation qui dispersent l'énergie dans le but de réduire le choc. Dans notre étude, nous n'en tenons pas compte car nous évaluons la probabilité d'exposition. Les équipements embarqués peuvent être classés en 2 catégories :

- les systèmes passifs comme les pneus qui assurent la liaison avec la route, les freins qui dissipent l'énergie cinétique, les amortisseurs qui gardent le contact avec le sol et maintiennent le contrôle du véhicule ;
- les systèmes actifs notamment avec l'assistance des aides à la conduite comme l'antiblocage des roues (ABS³), l'électrostabilisateur programmé (ESP⁴), le capteur de somnolence, l'alerte de franchissement de ligne, etc.

2.3.1.3 L'environnement

L'environnement est composé principalement de la route, de la météo et des autres usagers. La route est définie par son type (une route urbaine, une route départementale ou une autoroute), sa géométrie (son rayon de courbure, sa largeur, son dévers, l'acolement, etc.), le type de revêtement, l'équipement routier (comme les lampadaires, les signalisations, etc.), les éléments d'interconnexions (le carrefour, le rond-point, etc.), les types de voies (la voie pour véhicule lent, la voie de bus et taxi, etc.). Ces caractéristiques routières vont agir sur deux aspects :

- la tenue de route et la dynamique du véhicule. Par exemple, une pente impacte le freinage du véhicule, la géométrie comme le rayon de courbure va agir sur la vitesse maximale dans les courbes, le revêtement agit sur l'adhérence des véhicules, la largeur de la voie nécessite une maîtrise de la direction ;
- la visibilité qui va dépendre de la présence de lampadaires, de balises, des marquages au sol, etc.

De la même façon, la météo va agir sur la tenue de route et la visibilité :

- lors d'une forte pluie le risque d'aquaplaning est plus important, s'il neige ou gèle l'adhérence sera plus faible ;
- la visibilité est également à prendre en compte avec des éléments comme le brouillard, la pluie, le soleil avec ses réflexions sur des éléments de la route. Du fait que la visibilité est altérée par ces contraintes météorologiques, le conducteur peut, par exemple, ne plus distinguer correctement la signalétique, les autres usagers, l'infrastructure, etc.

3. <https://www.securite-routiere-az.fr/a/abs/>

4. <http://www.car-engineer.com/fr/le-systeme-esp-programme-de-stabilite-electronique/>

Comme expliqué précédemment, l’environnement implique également les autres usagers de la route tels que les véhicules légers, les véhicules lourds, les piétons, les deux-roues motorisées et non-motorisées. A leur tour, ces usagers peuvent être fatigués, distraits, adopter une mauvaise conduite de manière délibérée ou non. Leur conduite peut impacter la réaction des autres usagers, par exemple un automobiliste qui subit la pression d’un véhicule le suivant de trop près ce qui peut entraîner une tendance à accélérer afin de s’éloigner de celui qui le suit au risque de ne pas respecter le code de la route. Dans le cadre de cette thèse, ces aspects psychologiques ne seront pas étudiés.

Avec l’arrivée des VANET, ceux-ci pourront transmettre ces informations aux autres conducteurs afin de les inciter à agir avec une plus grande prudence et anticiper le mauvais comportement du conducteur. De plus, les VANET pourront dans certaines situations apporter une nouvelle information comme la localisation des cyclistes et piétons en partageant leur position via leur mobile par exemple.

Dans la partie suivante, nous allons modéliser ces relations entre conducteur, véhicule et environnement par un RB au travers de quatre blocs.

2.3.2 Développement de la structure du réseau Bayésien

La Fig. 2.5 ci-dessous présente la structure du RB développé afin d’estimer le risque de télescopage et la perte de contrôle. Sur cette figure, les nœuds bleus correspondent aux nœuds observés, les verts aux nœuds communiqués, les blancs aux nœuds cachés (que nous ne mesurons pas) et les nœuds rouges aux risques. Chaque numéro de nœud de la figure est défini dans le Tableau 2.1. La structure choisie pour décrire notre RB est une description de cause à effet. Pour la suite de l’exposé, lorsque nous parlerons de deux véhicules qui se suivent, le véhicule de tête sera nommé véhicule Front et le suiveur véhicule Ego. Si le véhicule Front suit un autre véhicule alors ce dernier sera appelé Obstacle comme le montre la Fig. 2.11.

Nœud	Variable	Nœud	Variable
1	Risque _{front}	19	Evolution de l’angle au volant
2	a _{front}	20	Regard
3	Contexte	21	Age
4	Intention de freinage	22	Temps de réaction
5	Temps de trajet	23	Température
6	Biorythme	24	Précipitation
7	Facteurs extérieurs	25	Météo
8	Temps paupières	26	Météo _{front}
9	Fatigue	27	État de la route
10	Type de route	28	État du véhicule
11	Intégrale de l’angle au volant	29	Décélération maximale ou a _{max}
12	Intégrale de l’accélération	30	Rayon de courbure
13	Monotonie de la route	31	Vitesse _{ego}
14	Conversation	32	Vitesse _{front}
15	Radio	33	Inter-distance
16	Téléphone	34	a _{ego}
17	Attention	35	Perte de contrôle
18	Accélération	36	Risque de télescopage

TABLEAU 2.1 – Nomenclature des nœuds

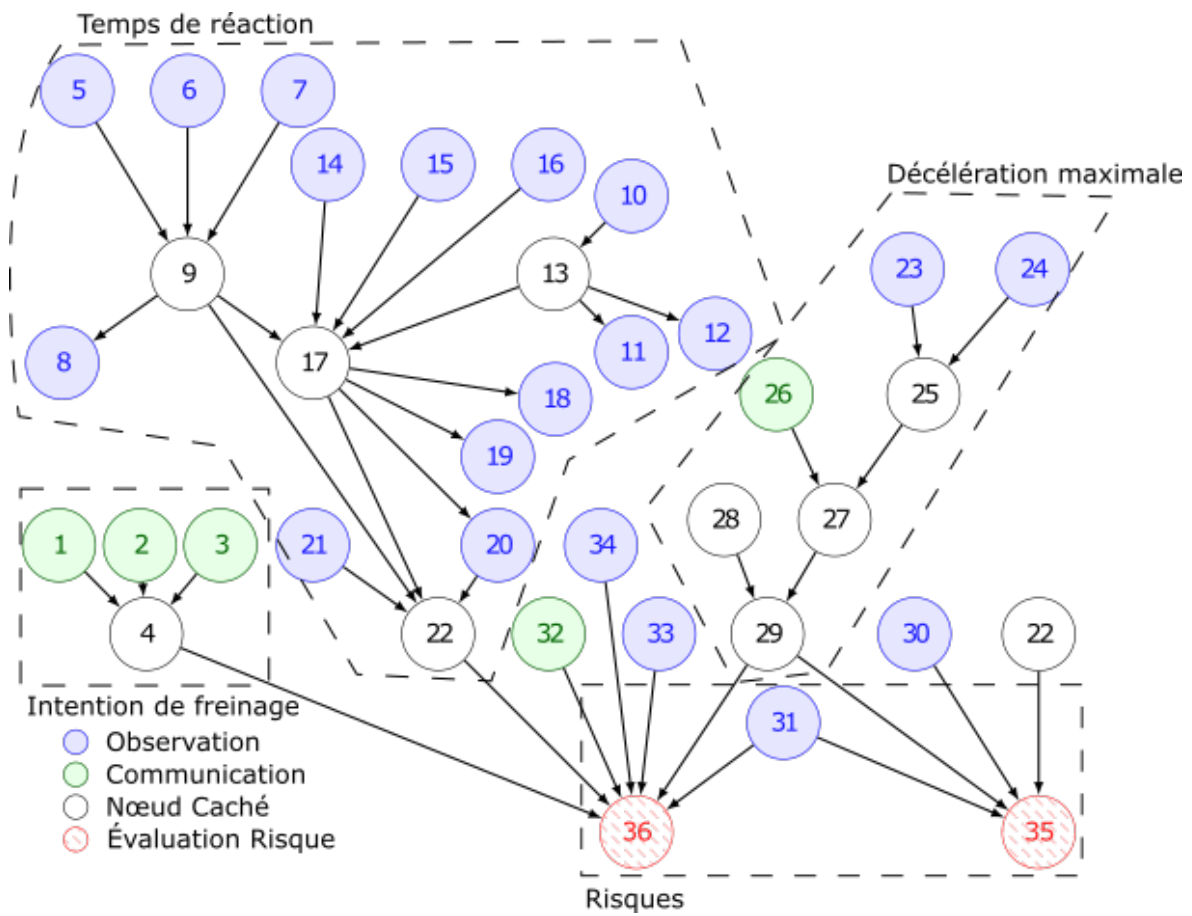


FIGURE 2.5 – Schéma du réseau Bayésien développé

Nous pouvons découper la représentation de notre RB en quatre blocs :

- le premier concerne la partie évaluation du comportement du conducteur, ce qui se résume au temps de réaction du conducteur (nœud n°22 qui est le point de convergence des nœuds du bloc) ;
- le second est spécifique à l’environnement routier et au véhicule Ego. Dans ce bloc, nous évaluons le potentiel de freinage maximal que peut fournir le véhicule nœud n°29 ;
- le troisième bloc concerne l’intention de freinage du véhicule Front, nœud n°4. Ce dernier dépend du risque du véhicule Front, de l’accélération de Front et du lieu (école, autoroute, etc.) ;
- le dernier bloc forme la synthèse des trois autres. Il permet l’évaluation du risque de perte de contrôle du véhicule dans une courbe et du risque de télescopage nœuds n°35 et 36.

2.3.2.1 Discussion des nœuds principaux

Dans cette section, le but est de montrer et d’expliquer les liens entre les différents nœuds au sens des RB. Un nœud principal est appelé ainsi car il s’agit d’un nœud de concentration de l’information. Puis cette information ira vers les nœuds exprimant les risques. Nous avons trois nœuds principaux qui sont le temps de réaction du conducteur (nœud n°22), la décélération maximale (ou potentiel de freinage maximal que peut fournir le véhicule, nœud n°29) et l’intention de freinage du véhicule Front (nœud n°4).

2.3.2.1.1 Le temps de réaction du conducteur

Les capteurs installés sur le véhicule, l’information présente sur le bus CAN et celle transmise via les VANET, vont nous permettre d’observer les variables influençant le temps de réaction :

- le nœud *Fatigue* (voir Fig. 2.6) dépend des nœuds *Durée du Trajet*, *Biorythme* du conducteur et *Facteurs Extérieurs* comme la température de l’habitacle qui agiront également sur la fatigue. Il a pour un des symptômes le nœud *Temps Paupières* que nous supposons mesuré
 - concernant l’influence du nœud *Temps de Trajet*, nous faisons l’hypothèse que plus ce dernier est long, plus le conducteur sera fatigué ;
 - le biorythme se traduit par des cycles périodiques. C’est un phénomène à la fois naturel et physiologique. Le nœud *Biorythme* correspond aux habitudes de conduite du conducteur. Par exemple, si celui-ci a pour habitude de conduire en journée alors lorsqu’il conduira de nuit il aura une probabilité plus forte d’être fatigué. De plus, la concentration sera différente [65] selon le moment de la journée. Il y a également l’exemple des chauffeurs poids-lourds qui ont pour habitude de conduire sur de longues périodes. De ce fait, ils peuvent avoir une plus grande facilité à gérer leur fatigue ;
 - le nœud *Facteurs Extérieurs* concerne plus particulièrement ce qui pourrait influencer de manière négative la conduite comme la trop haute température dans l’habitacle. En effet, c’est l’une des causes de micro-sommeil chez certains conducteurs [8]. Nous pouvons également citer la monotonie de la route, le son dans l’habitacle (traités par la suite) et la densité de circulation (dans le cas d’une forte densité, le conducteur est plus rapidement fatigué) ;

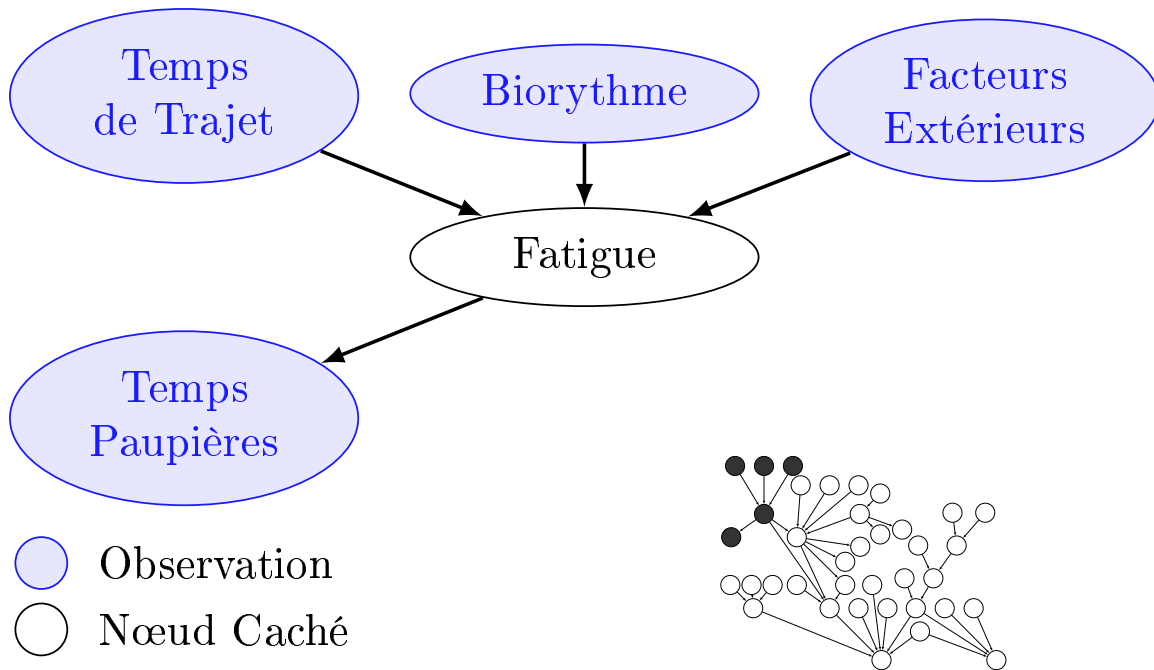


FIGURE 2.6 – Schéma du nœud Fatigue

- le nœud *Temps Paupières* est un nœud enfant du nœud *Fatigue*. Il y a d'autres symptômes (nœuds enfants) possibles comme l'électroencéphalogramme mais leur mesure n'apparaissant pas envisageable de façon embarquée dans un avenir proche, ils sont donc exclus de notre RB. Si le temps paupière dépasse la valeur de 350 ms [64] alors le conducteur est probablement fatigué et commence à somnoler.
- le nœud *Attention* (voir Fig. 2.7) associé au conducteur est fonction des nœuds *Fatigue*, *Monotonie de la Route*, *Téléphone*, *Conversation* et *Radio*. Et il a pour symptômes les nœuds *Regard*, *Accélération* et l'*Ecart de l'Angle au Volant*
 - si le conducteur est fatigué alors il aura tendance à être moins concentré;
 - comme son nom l'indique le nœud *Monotonie de la Route* (voir la Fig. 2.8) donne une information sur la nature de la route. Par exemple, une route droite comme les autoroutes aura tendance à favoriser la monotonie du trajet car ces routes varient peu en termes d'angle donné au volant et de courbure. Cependant, s'il y a une forte circulation ou même un bouchon, la route n'est pas forcément monotone car le conducteur devra constamment surveiller la route. A l'opposé, en ville le conducteur devra être beaucoup plus vigilant pour surveiller sa trajectoire, celle des éventuels autres usagers (véhicules, bus, camions, deux roues, piétons, etc.). De ce fait, nous pouvons considérer en milieu urbain une route non monotone dû aux différents évènements pouvant s'y produire. D'une part, le nœud *Monotonie de la Route* est mesuré grâce à l' $\int \alpha$ qui permet de constater l'action du conducteur par rapport à la direction : si cette valeur est non nulle alors le conducteur procède à des actions et la route peut être considérée comme non monotone. Hors agglomération, $\int \alpha$

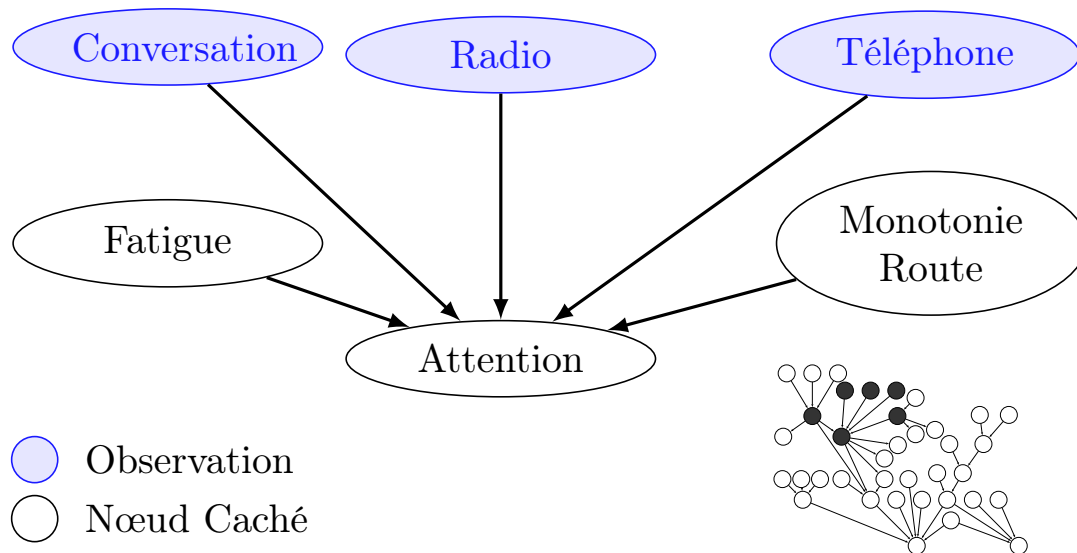


FIGURE 2.7 – Schéma du nœud Attention

est utile pour savoir si la route est sinueuse ou non. D'autre part, le nœud *Monotonie de la Route* est mesuré par $f\gamma$: si ce dernier est non nul c'est-à-dire qu'il y a des variations de l'accélération alors l'on peut considérer une action du conducteur et, de ce fait, dire que la route n'est pas monotone ;

- les nœuds *Téléphone*, *Discussion* et *Radio* de la Fig. 2.7 permettent de savoir si le conducteur téléphone, discute ou écoute de la musique. Ils influencent dans un premier temps négativement l'attention du conducteur car elles prennent une part d'attention du conducteur alors qu'il est censé rester concentré sur les événements de la route. Pour rappel, un accident sur dix est dû à l'utilisation du téléphone au volant voir [53] et [59]. Par contre, il y a une situation où l'influence des nœuds *Téléphone*, *Discussion* et *Radio* peut être positive sur la concentration du conducteur [34]. Si le conducteur est fatigué (l'information obtenue au travers du nœud *Fatigue*), idéalement il faudrait que le conducteur arrête de conduire mais dans le cas où il ne s'arrête pas, ces nœuds vont maintenir éveiller le conducteur du moins diminuera le risque de somnolence ;
- nous mesurons des états d'inattention sur la Fig. 2.9 par les nœuds γ (s'il a de forte accélération ou décélération par rapport à une conduite moyenne), $\Delta\alpha$ par rapport à la route qui exprime le suivi de trajectoire (c'est-à-dire suis-t-il précisément la trajectoire regardée ou oscille-t-il? est-ce une manœuvre adaptée à la situation?) et *Regard* du conducteur qui nous donne une information directe sur le point d'intérêt de la scène (la manipulation du téléphone, du GPS, de la radio). Par exemple, si le conducteur regarde son autoradio alors il ne peut suivre ce qui se passe sur la route. Les nœuds γ et $\Delta\alpha$ contrairement aux nœuds $f\alpha$ et $f\gamma$ mesurent la pertinence des manœuvres du conducteur alors que les deux derniers nœuds expriment l'action ou l'inaction du conducteur.
- si le nœud *Age* du conducteur est renseigné alors nous pourrons avoir une idée du rallongement du temps de réaction : plus une personne est âgée, plus grande est la

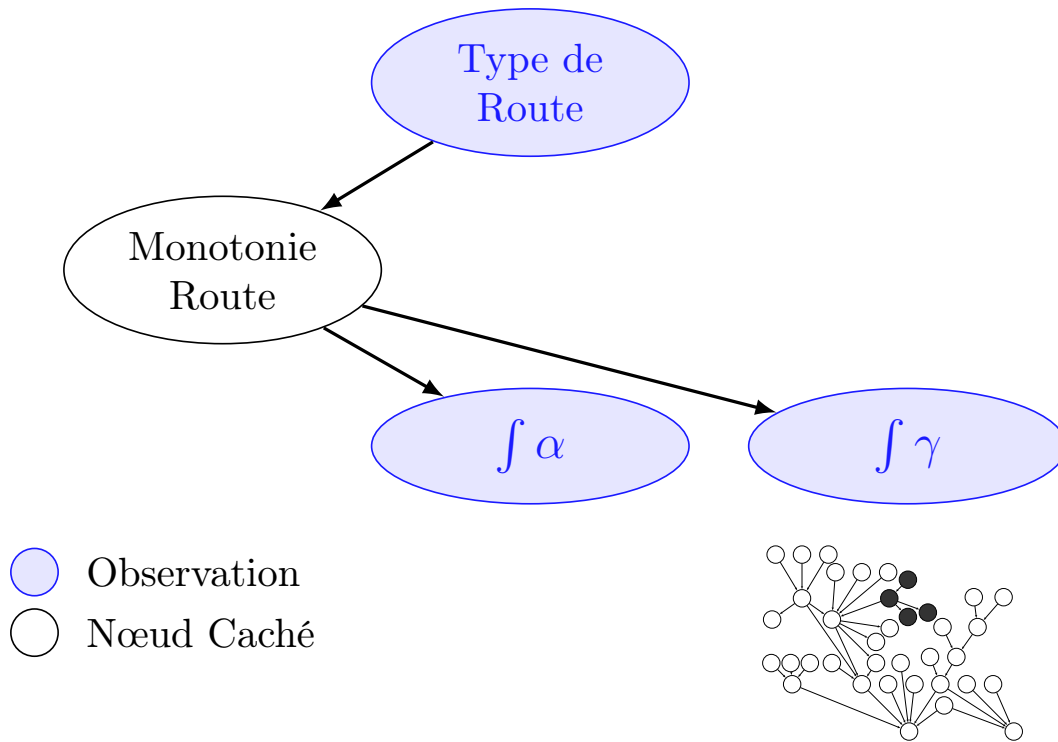


FIGURE 2.8 – Schéma du nœud Monotonie de la Route

probabilité que ses réflexes (prise et analyse d'informations et l'action inhérente) seront ralenties ;

- ils seraient intéressant de pouvoir mesurer d'autres facteurs comme le stress mais leur mesure n'apparaissant pas envisageable de façon embarquée dans un avenir proche, nous n'en tenons pas compte ici.

Les nœuds cités ci-dessus, plus particulièrement ceux qui concentrent l'information comme la *Fatigue* ou l'*Attention*, vont alors agir sur le nœud *Temps de Réaction* comme le montre la Fig. 2.9.

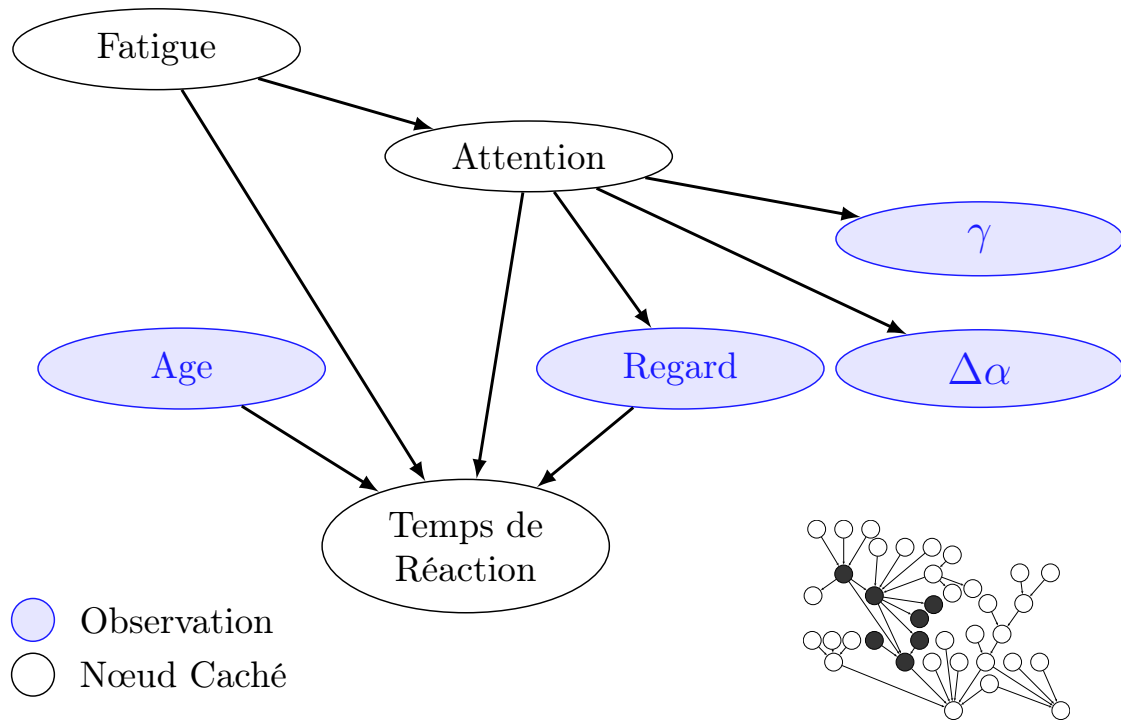


FIGURE 2.9 – Schéma du nœud Temps de Réaction

2.3.2.1.2 La décélération maximale

La décélération maximale d'un véhicule dépend de différentes variables et paramètres mais l'adhérence joue un rôle essentiel. Cependant, en absence de capteur, nous ne pouvons mesurer directement l'adhérence. Nous considérons alors ici que les véhicules évoluent sur un macadam avec une usure moyenne. Dans le cas d'un télescopage, la distance de freinage augmente lorsque l'adhérence diminue, ce qui n'est pas contraignant car les véhicules Front et Ego évoluent sur la même route. Ainsi le résultat reste inchangé. S'il y a une différence d'adhérence, celle-ci sera prise en compte dans nos marges de sécurité (précisément dans le calcul des distances, développé plus loin dans ce chapitre). Nous allons donc évaluer le nœud *État de la Route* au travers des nœuds *Météo* et *Météo de Front*. Le nœud *Décélération Maximale* (ou a_{max} sur la Fig. 2.10) est décrit en tenant compte des facteurs environnementaux et mécaniques suivants :

- le nœud *Météo* a un impact direct sur le nœud *État de la Route*. Pour évaluer la météo nous allons procéder par déduction. Les états du nœud *Météo* peuvent se traduire par la combinaison des nœuds *Température* et *Précipitation*. Ainsi grâce à la déduction du nœud *Météo* et de l'information météo que nous obtenons par [VANET](#), nous en déduisons le nœud *État de la Route* c'est-à-dire si le sol est sec, mouillé ou verglacé. Ici, nous favorisons l'information provenant du véhicule Ego car il se peut que le véhicule Front observe un autre état du nœud *Météo*, cela évite également qu'une information a priori incertaine par un processus d'envoi et de réception devienne au fil des boucles une information faussement probable (c'est-à-dire une autosatisfaction). De plus, c'est la capacité de freinage du véhicule Ego qui nous intéresse. En revanche, l'information provenant des autres véhicules permet de nuancer ou de conforter nos déductions;

- le nœud *État du Véhicule* est également déterminant pour la décélération du véhicule. Nous entendons par là l'ensemble des composants du véhicule comme l'état des pneus, des freins, des suspensions, etc. En présence de capteurs, nous pouvons passer par une auto-évaluation par le véhicule et dans le cas contraire, nous pouvons supposer que seuls les véhicules en bon état et apte à rouler sont en circulation grâce au contrôle technique. Les éventuelles incertitudes seront rattrapées par les marges de sécurité (comme évoqué précédemment celle-ci dépendra de l'adhérence).

Ainsi les nœuds *État du Véhicule* et *État de la Route*, nous permettent d'en déduire une décélération maximale que pourra fournir le véhicule.

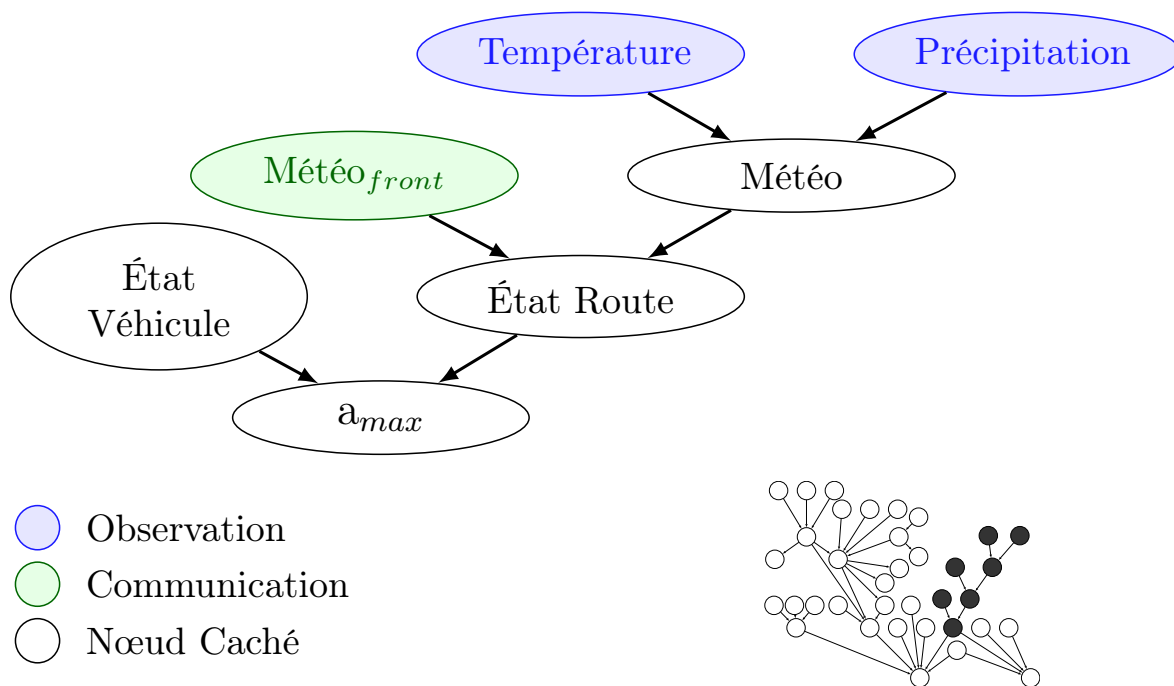


FIGURE 2.10 – Schéma du nœud a_{max}

2.3.2.1.3 L'intention de freinage du véhicule Front

Le code de la route existe en partie afin de prévenir les accidents. Ainsi, si les conducteurs le respectent alors les risques d'accident sont fortement réduits et les situations d'accidents sont dépendantes du hasard (par exemple un animal surgissant du bas-côté). Néanmoins, beaucoup de conducteurs ont une certaine tendance à ne pas respecter le code de la route et notamment la mauvaise habitude de rouler trop près les uns des autres. Ce comportement résulte d'un processus d'apprentissage négatif qui a son explication dans le fait que les conducteurs freinent rarement de manière brutale. Pour le cas du télescopage même si les distances de sécurité ne sont pas respectées, il y a peu d'accident car les conducteurs anticipent (c'est-à-dire ils voient à travers les véhicules donc voient les ralentissements possibles), les situations de freinage brutales sont peu fréquentes et souvent liés à des phénomènes extérieurs.

Dans le cas où les conducteurs respectent le code de la route, les systèmes d’alertes seraient inutiles. Cependant, de nombreux conducteurs ne respectant pas le code de la route [54], ceux-ci impliqueraient de nombreuses alertes diminuant ainsi la pertinence de celles-ci et l’attention du conducteur. De plus, les conducteurs n’accepteraient pas ce genre de système alertant à chaque écart de conduite. Afin de palier à ce problème de mauvaise conduite tout en proposant un système acceptable, nous avons défini le risque de télescopage (développé dans la partie 2.3.2.1.4) par trois zones : verte (respect du code de la route), rouge (la collision devenant inévitable) et orange se trouvant entre les deux zones précédentes (une zone de tolérance où le conducteur peut éviter l’accident s’il agit promptement). Il est à noter qu’au fur et à mesure que le véhicule se rapproche de la zone rouge un signal d’alerte est généré et s’intensifie. Nous pouvons également imaginer agir sur un système actif qui freine afin de ramener le conducteur dans une zone acceptable.

Le nœud *Intention de Freinage du véhicule Front* (voir la Fig. 2.12) permet d’apporter un début de réponse au problème précédent grâce à l’anticipation que cela apporte et ceci est possible grâce au VANET. Ce nœud exprime la probabilité et la manière de freiner que va adopter le véhicule Front et permet d’anticiper au-delà du véhicule N+1 comme le montre la Fig. 2.11. Prenons un exemple, trois véhicules qui se suivent (pour rappel l’ordre d’apparition Obstacle, Front et Ego sur la Fig. 2.11). Imaginons qu’Obstacle commence à freiner mais que Front ne freine pas et se rapproche au fur et à mesure d’Obstacle. Il va s’en dire que le risque de collision augmente pour les véhicules Front et Ego. Il est intéressant que le véhicule Ego connaisse cette information sur l’inaction de Front afin qu’Ego puisse déjà anticiper un freinage fort de la part de Front ou même une éventuelle collision. Le nœud *Intention de Freinage* dépend de trois nœuds communiqués qui sont le *Risque du véhicule Front*, le *Contexte* (lieu pouvant être à l’origine d’un freinage inattendu de Front, incitant le conducteur Ego à une attention particulière) et la *Décélération du véhicule Front* :

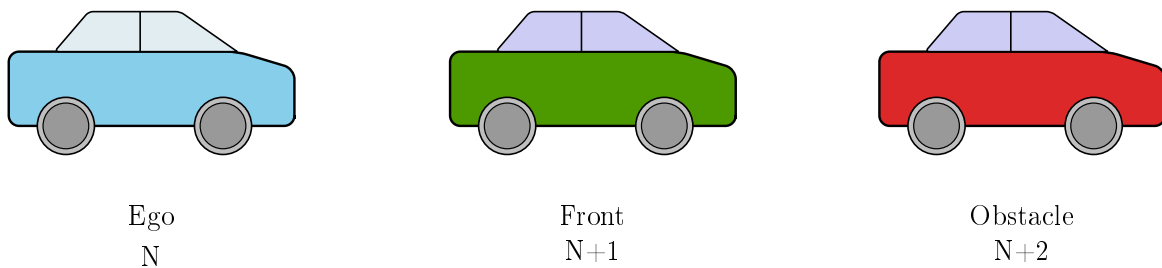


FIGURE 2.11 – Définition de véhicules qui se suivent

- le nœud *Risque du véhicule Front* a un impact direct sur notre risque car si le *Risque du véhicule Front* est faible alors la probabilité que ce dernier freine brusquement sera également faible et donc il n’y a pas de danger immédiat. A l’inverse, si la valeur *Risque du véhicule de Front* est élevée cela signifie qu’il va très certainement devoir freiner fortement. De ce fait, le véhicule Ego devra freiner tout aussi fortement voire plus et éventuellement anticiper ce freinage ;
- le nœud *Contexte* exprime la possibilité du conducteur à freiner ou devoir freiner brusquement à l’approche de lieux à risque comme les écoles, les arrêts de bus, les radars, etc. ;
- le nœud *Décélération du véhicule Front* contrairement aux deux nœuds précédents ne permet pas d’anticiper avant que le véhicule Front ne décélère. Toutefois, son

caractère anticipatif à court terme permet d'avoir une information exploitable. Par exemple, connaissant la variation de la décélération de Front, plus la décélération est forte plus il est probable que le conducteur Front freine encore plus fort l'instant d'après.

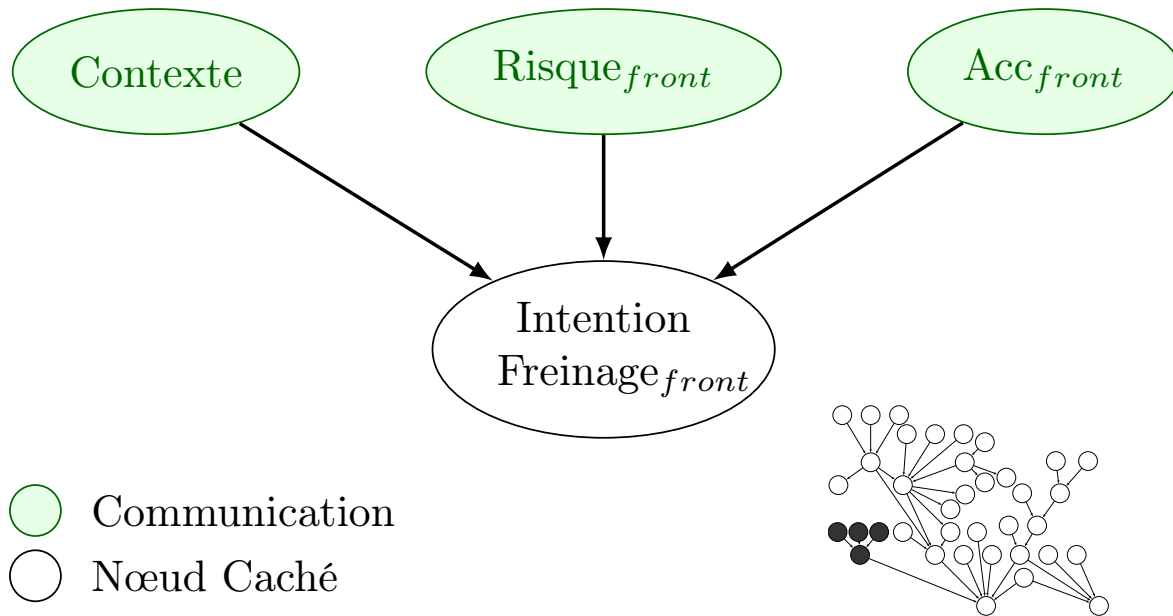


FIGURE 2.12 – Schéma du nœud Intention de Freinage

2.3.2.1.4 Les risques

Dans le cadre de nos travaux, nous nous focalisons sur l'étude de deux situations de risques : l'un concerne le risque de perte de contrôle du véhicule une fois engagé dans une courbe comme le montre la Fig. 2.13⁵ et le second est le risque de télescopage sur la Fig. 2.14⁶.

L'évaluation du risque avant l'entrée dans une courbe permet d'anticiper sur l'alerte à donner au conducteur et les actions d'aide éventuellement nécessaires à donner afin de ne pas perdre le contrôle du véhicule. Le nœud *Perte de Contrôle* (voir la Fig. 2.15) est dans un premier temps fonction du rayon de courbure. Cela nous permet d'obtenir la vitesse maximale dans la courbe lors de la phase d'approche du véhicule. Dans un second temps, avec les nœuds a_{max} , *Vitesse* et *Temps de Réaction* nous en déduisons si le véhicule Ego est encore capable d'atteindre cette vitesse. Plus le véhicule est loin, moins le risque est élevé car il a le temps de freiner. Alors que plus il est proche, plus il devra freiner fort pour ne pas excéder la vitesse critique au risque de perdre le contrôle du véhicule.

Le nœud *Risque de Télescopage* se produit lorsque l'inter-distance est nulle. Plus précisément, cela apparaît lorsque les vitesses, les accélérations, l'inter-distance, le freinage

5. http://subaru.nc/tec_vdc.html

6. <https://www.flotauto.com/traitement-des-accidents-en-file-indienne-laccident-en-chaine-20160415.html>

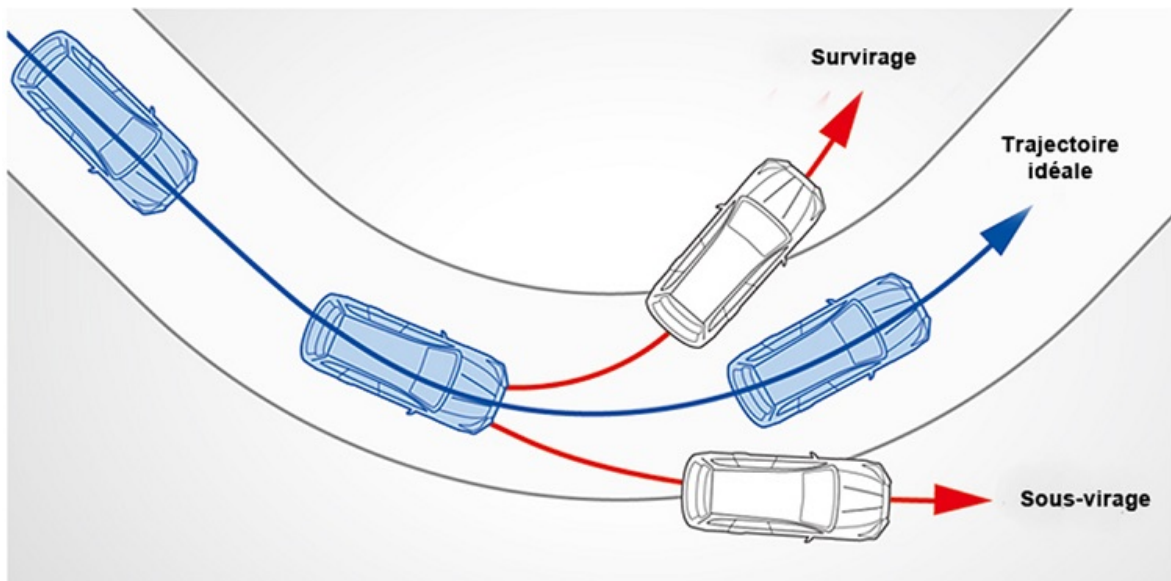


FIGURE 2.13 – Perte de contrôle du véhicule dans une courbe



FIGURE 2.14 – Télescopage de véhicules en ligne droite

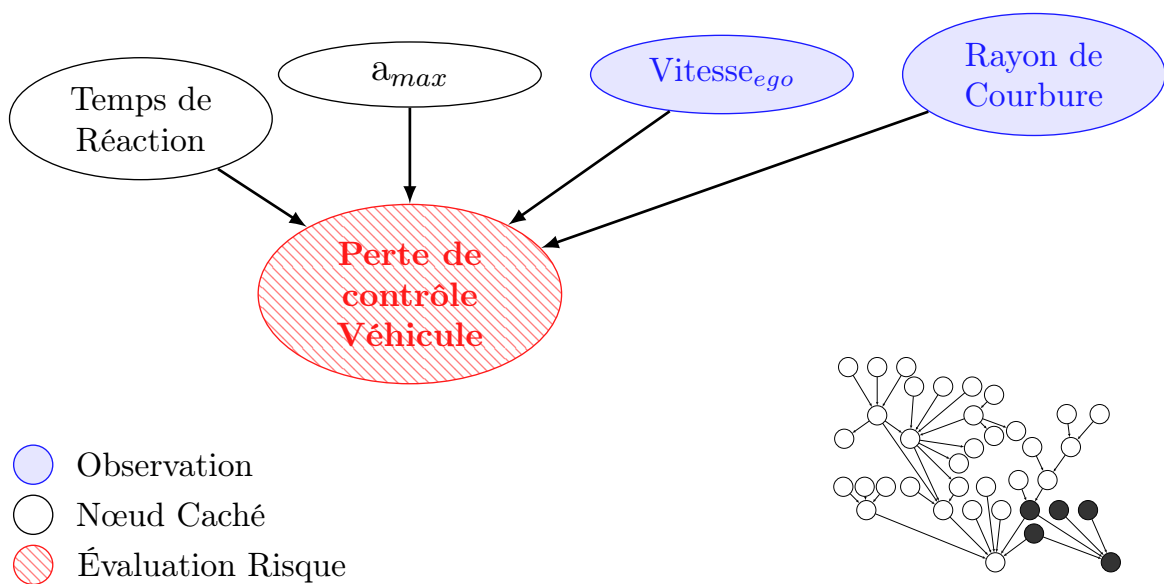


FIGURE 2.15 – Schéma du nœud Perte de Contrôle du véhicule

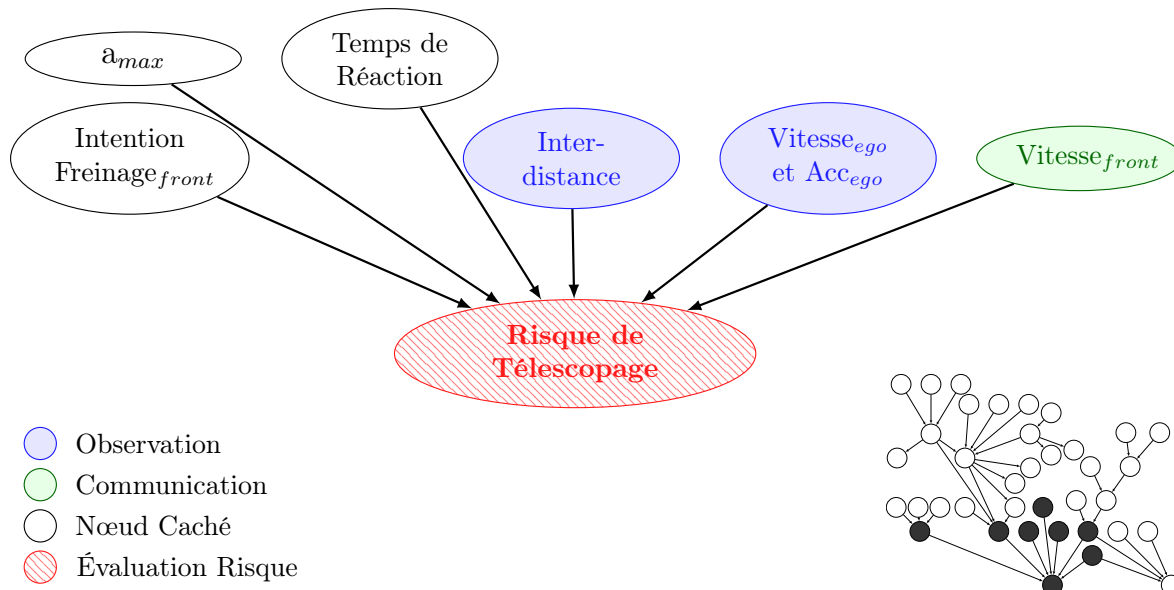


FIGURE 2.16 – Schéma du nœud Risque de Téslescope

appliqué et le temps de réaction sont inadaptés voir la Fig. 2.16. Il s'agit de relations coupées comme le montre les deux exemples qui suivent : les deux véhicules roulent à la même vitesse avec un temps inter-véhiculaire de 1 s (signifie que les deux véhicules sont séparés de 1 s). Tant que le véhicule Front ne freine pas, la collision est peu probable. Puis à l'instant t , le véhicule Front freine, la collision dépendra du temps de réaction d'Ego (supérieur à une seconde il y a collision sinon le contraire). Autre exemple, il se peut que le temps de réaction d'Ego soit dans la moyenne d'un conducteur attentif (de l'ordre d'une seconde) mais que l'inter-distance est trop faible au vu de la vitesse. Donc si l'une de ces variables est inadaptée à la situation, une collision peut se produire.

2.3.3 Modèle probabiliste

Pour rappel, notre RB est discret car ce type d'architecture répond parfaitement à notre problème. En effet, prenons l'exemple du bloc a_{\max} (voir la partie 2.2.1.2), la température est une variable continue mais nous l'utilisons de manière discrète. Par conséquent, la *Température* et *Précipitation* sont des nœuds discrets. Il est à noter que les racines du réseau (voir la Fig. 2.5) sont des nœuds observés et discrets à l'exception des nœuds *Vitesse*, *Accélération*, *Inter-distance* (ces nœuds seront traités dans la partie 2.3.3.5.1). Nous supposons pour tous ces nœuds que les valeurs fournies par les capteurs sont exactes et que les capteurs ne pourront pas tomber en panne. Toutefois, des incertitudes de mesures et des défaillances de capteurs peuvent être introduites dans notre simulateur mais il sera alors nécessaire de bénéficier de statistiques fiables. Par la suite, à titre d'exemple, nous présentons le bloc Temps de Réaction (les autres blocs seront détaillés en A.1). Comme expliqué dans la Section 2.2.1, chaque nœud racine est déterminé par une probabilité a priori et chaque nœud enfant par un tableau de probabilités conditionnelles dépendant des parents. Nos nœuds racines sont observés donc il n'est pas nécessaire de décrire le nœud par une probabilité a priori car la valeur est connue sans incertitude. Les nœuds des différents blocs sont présentés à travers le Tableau 2.2. Suivi de quelques explications

et de son tableau de probabilité. Dans le tableau de probabilités, lorsqu'une case est marquée par le signe ✓, cela signifie que l'état du nœud est actif.

Nom du nœud, numéro du nœud dans Tableau 2.1	XXXX, YYYY
Nature	Observé ou estimé
Certitude sur le nœud	Déterministe ou incertaine
Nombre d'états	XXXX

TABLEAU 2.2 – Modèle du tableau de description

2.3.3.1 Nœud Fatigue

Comme le montre la Fig. 2.6, le nœud *Fatigue* dépend de trois parents *Temps de Trajet*, *Biorythme*, *Facteurs Extérieurs* et possède trois nœuds enfants le *Temps Paupières*, *l'Attention* et le *Temps de Réaction*. Commençons par décrire les trois nœuds parents.

Nom du nœud	Temps de Trajet, 5
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	3

TABLEAU 2.3 – Description du nœud Temps de Trajet

La prévention routière [59] préconise une pause toutes les deux heures ce qui pourrait se traduire par deux états : temps de trajet inférieur ou supérieur à deux heures. Cependant, ce choix binaire est trop restrictif. Par conséquent, comme le montre le Tableau 2.3 nous avons choisi pour ce nœud trois états. L'état intermédiaire permet d'introduire des incertitudes en tenant compte des conducteurs qui se sentiraient fatigués dès 1h30 ou après 2h30 de conduite. Soit les trois états :

- inférieur à 1h30;
- entre 1h30 et 2h30;
- au-delà de 2h30.

Nom du nœud	Biorythme, 6
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	2

TABLEAU 2.4 – Description du nœud Biorythme

Le biorythme est l'influence de l'heure de la journée sur la fatigue. En l'absence de capteur, si nous sommes en journée nous considérons qu'il n'y a pas d'influence notable sur la fatigue. Par contre, de nuit, l'heure est une source potentielle de fatigue, à l'exception des conducteurs ayant pour habitude de rouler de nuit [65] [8]. Dans le Tableau 2.4, nous considérons deux états, l'état 1 où l'heure de la journée impacte négativement la fatigue et l'état 2 où il n'y a pas d'impact. C'est un nœud mesuré (car l'heure est mesurée), il s'agit donc d'un nœud déterministe car il n'y a pas d'incertitude sur la mesure de l'heure. L'incertitude apparaîtra lors du lien entre le nœud *Biorythme* et *Fatigue* (c'est-à-dire dans le tableau de probabilités conditionnelles).

Nom du nœud	Facteurs Extérieurs, 7
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	2

TABLEAU 2.5 – Description du nœud Facteurs Extérieurs

Pour l'instant, les facteurs extérieurs sont limités à la température dans l'habitacle. Dans le Tableau 2.5, l'état 1 signifie que la température influence négativement la fatigue du conducteur et l'état 2 signifie qu'il n'y a pas d'influence.

Les trois nœuds racines précédents agissent sur le nœud *Fatigue* dont nous n'avons pas de capteur spécifique comme un électroencéphalogramme, d'où son évaluation au travers de ces trois parents.

Nom du nœud	Fatigue, 9
Nature	Estimé
Certitude sur le nœud	Incertain
Nombre d'états	3

TABLEAU 2.6 – Description du nœud Fatigue

Ce nœud possède trois états (voir Tableau 2.6) correspondant à un état vert, orange ou rouge. Les probabilités sont données par le Tableau 2.7 de probabilités conditionnelles dépendant de ses trois parents. Ce tableau se lit de gauche vers la droite, les colonnes à bords noirs correspondent aux parents et les colonnes en bleu correspondent aux états du nœud Fatigue. Pour chaque combinaison des entrées, nous avons une probabilité pour les états en sortie. La somme des probabilités (sur une ligne) des états en sortie est égale à 1, cela correspond à l'impact des parents sur les états du nœud Fatigue. Par contre, la somme d'une colonne n'a aucune signification particulière. En l'absence d'étude spécifique, nous avons estimé les valeurs du tableau. Bien sûr, celui-ci peut être affiné grâce à l'avis d'un expert ou de statistiques disponibles. Pour le remplissage du tableau, nous avons pris comme hypothèse que le cumule d'influence sera plus fort qu'une influence individuelle. Par exemple, si nous prenons le cas où les trois nœuds parents ont une influence négative (état 1 pour les nœuds *Facteurs Extérieurs* et *Biorythme*, le *Temps de Trajet* à l'état 2h30 <) alors la probabilité liée à l'état critique du nœud *Fatigue* sera élevée, l'état Rouge vaut 1 alors que si la seule influence négative provient du *Temps de Trajet*, l'état Rouge vaut 0,1.

Le Tableau 2.8 décrit le nœud *Temps Paupièrès* comprenant deux états correspondant au fait que le conducteur cligne des yeux en un temps inférieur ou supérieur à 350 ms (voir partie 2.3.2.1.1). C'est un nœud observé, il n'y a donc pas de tableau de probabilités conditionnelles nécessaire. Les deux autres symptômes seront traités dans les sections suivantes.

Facteurs Extérieurs		Biorythme		Temps de Trajet			Fatigue		
1	2	1	2	<1h30	1h30 <h <2h30	2h30 <	Vert	Orange	Rouge
✓		✓		✓			0,1	0,85	0,05
	✓	✓		✓			0,2	0,75	0,05
✓			✓	✓			0,7	0,25	0,05
	✓		✓	✓			0,9	0,09	0,01
✓		✓			✓		0,1	0,75	0,15
	✓	✓			✓		0,15	0,75	0,1
✓			✓		✓		0,65	0,25	0,1
	✓		✓		✓		0,7	0,15	0,15
✓		✓				✓	0	0	1
	✓	✓				✓	0,05	0,15	0,8
✓			✓			✓	0,01	0,24	0,75
	✓		✓			✓	0,3	0,6	0,1

TABLEAU 2.7 – Tableau de probabilités du nœud Fatigue

Nom du nœud	Temps Paupières, 8
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	2

TABLEAU 2.8 – Description du nœud Temps Paupières

2.3.3.2 Nœud Monotonie de la Route

Le nœud *Monotonie de la Route* a pour parent le nœud *Type de Route* et trois enfants *Attention*, $f\gamma$ et $f\alpha$.

Le nœud *Type de Route* est obtenu grâce à un navigateur combinant l'information de géolocalisation et celle de la cartographie. Nous considérons qu'il n'y a pas d'incertitude de mesure (voir Tableau 2.9).

Nom du nœud	Type de Route, 10
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	3

TABLEAU 2.9 – Description du nœud Type de Route

Le nœud est composé de trois états selon la géolocalisation et la limitation de vitesse associée :

- un état pour les agglomérations, chemins de type forestier ou chemins ruraux;
- un état pour les routes nationales ou départementales ;
- un état pour les autoroutes ou les voies expressées séparées par un terre-plein central.

Concernant le nœud *Type de Route* et compte tenu des notes de la partie 2.3.2.1.1, les agglomérations ne sont pas considérées comme monotone. Les autres routes dépendent du trafic et de l'infrastructure routière (voir Tableau 2.10).

Les valeurs des parents et des enfants étant des mesures, le Tableau 2.11 ne servira que pour l'initialisation du RB.

Nom du nœud	Monotonie de la Route, 13
Nature	Estimé
Certitude sur le nœud	Incertain
Nombre d'états	2

TABLEAU 2.10 – Description du nœud Monotonie de la Route

Type de Route			Monotonie de la Route	
agglomération	route nationale	autoroute	vrai	faux
✓			0,01	0,99
	✓		0,35	0,65
		✓	0,55	0,45

TABLEAU 2.11 – Tableau de probabilités du nœud Monotonie de la Route

Les nœuds enfants de *Monotonie de la Route* sont $f\gamma$ et $f\alpha$ résumés dans le Tableau 2.12.

Nom du nœud	$f\gamma$ et $f\alpha$, 11 et 12
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	2

TABLEAU 2.12 – Description des nœuds $f\gamma$ et $f\alpha$

Les deux nœuds permettent de déterminer s'il y a une action du conducteur soit sur l'accélération $f\gamma$, soit sur la direction $f\alpha$. Ces deux nœuds, comme le nœud *Temps Pau-pières* sont observés, il n'y a donc pas de tableau de probabilités.

2.3.3.3 Nœud Attention

Le nœud *Attention* dépend des nœuds *Fatigue*, *Monotonie de la Route*, *Téléphone*, *Conversation* et *Radio*. Et il a pour enfants les nœuds *Regard*, *Accélération*, *l'Ecart de l'Angle au Volant* et *Temps de Réaction*.

Les nœuds *Téléphone*, *Discussion* et *Radio* possèdent chacun deux états (voir Tableau 2.13) : l'état 1 désignant la présence de son dans l'habitacle (comme une utilisation du téléphone) et l'état 2 l'absence de son.

Le nœud *Attention* comme pour le nœud *Fatigue*, possède trois états : vert, orange et rouge (voir Tableau 2.14). Le Tableau 2.15 décrit l'attention du conducteur en fonction de la contribution des nœuds parents. De ce fait, l'attention sera au plus bas dès lors que tous les nœuds parents auront une contribution négative et vice versa. Des données d'experts permettront d'affiner ces valeurs.

Nom du nœud	Téléphone, Conversation et Radio, 14,15 et 16
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	2

TABLEAU 2.13 – Description des nœuds Téléphone, Conversation et Radio

Nom du nœud	Attention, 17
Nature	Estimé
Certitude sur le nœud	Incertain
Nombre d'états	3

TABLEAU 2.14 – Description du nœud Attention

Téléphone		Radio		Conversation		Monotonie de la Route		Fatigue			Attention		
1	2	1	2	1	2	vrai	faux	vert	orange	rouge	vert	orange	rouge
✓		✓		✓		✓		✓			0,07	0,9	0,03
	✓	✓		✓		✓		✓			0,07	0,9	0,03
✓			✓	✓		✓		✓			0,07	0,9	0,03
	✓		✓	✓		✓		✓			0,6	0,4	0
✓		✓			✓	✓		✓			0,07	0,9	0,03
	✓	✓			✓	✓		✓			0,07	0,9	0,03
✓			✓		✓	✓		✓			0,07	0,9	0,03
	✓		✓		✓	✓		✓			0,8	0,2	0
✓		✓		✓			✓	✓			0,9	0,07	0,03
	✓	✓		✓			✓	✓			0,9	0,07	0,03
✓			✓	✓			✓	✓			0,9	0,07	0,03
	✓		✓	✓			✓	✓			0,85	0,15	0
✓		✓			✓		✓	✓			0,9	0,07	0,03
	✓	✓			✓		✓	✓			0,9	0,07	0,03
✓			✓		✓		✓	✓			0,9	0,07	0,03
	✓		✓		✓		✓	✓			0,99	0,01	0
✓		✓		✓		✓			✓		0,05	0,8	0,15
	✓	✓		✓		✓			✓		0,05	0,8	0,15
✓			✓	✓		✓			✓		0,05	0,8	0,15
	✓		✓	✓		✓			✓		0,05	0,8	0,15
✓		✓			✓	✓			✓		0,05	0,8	0,15
	✓	✓			✓	✓			✓		0,05	0,8	0,15
✓			✓		✓	✓			✓		0,05	0,8	0,15
	✓		✓		✓	✓			✓		0	0,8	0,2
✓		✓		✓			✓	✓			0,1	0,75	0,15
	✓	✓		✓			✓	✓			0,1	0,75	0,15
✓			✓	✓			✓	✓			0,1	0,75	0,15
	✓		✓	✓			✓	✓			0,1	0,75	0,15
✓		✓			✓		✓	✓			0,1	0,75	0,15
	✓	✓			✓		✓	✓			0,1	0,75	0,15
✓			✓		✓		✓	✓			0,1	0,75	0,15
	✓		✓		✓		✓	✓			0,7	0,3	0
✓		✓		✓		✓				✓	0	0	1
	✓	✓		✓		✓				✓	0	0	1
✓			✓	✓		✓				✓	0	0	1
	✓		✓	✓		✓				✓	0	0	1
✓		✓			✓	✓				✓	0	0	1
	✓	✓			✓	✓				✓	0	0	1
✓			✓		✓	✓				✓	0	0	1
	✓		✓		✓	✓				✓	0	0	1
✓		✓		✓			✓	✓		✓	0	0,1	0,9
	✓	✓		✓			✓	✓		✓	0	0,05	0,95
✓			✓	✓			✓	✓		✓	0	0,1	0,9
	✓		✓	✓			✓	✓		✓	0	0,05	0,95
✓		✓			✓		✓	✓		✓	0	0,02	0,98
	✓	✓			✓		✓	✓		✓	0	0,01	0,99
✓			✓		✓		✓	✓		✓	0	0,02	0,98
	✓		✓		✓		✓	✓		✓	0	0,01	0,99

TABLEAU 2.15 – Tableau de probabilités du nœud Attention

Le nœud *Attention* a pour enfants les nœuds *Regard*, γ et $\Delta\alpha$. Par exemple, le nœud *Regard* a pour but de vérifier si le conducteur regarde la route. Alors que le nœud *Temps Paupières* a pour but de vérifier que le conducteur n'est pas fatigué. Nous faisons cette distinction car il se peut que le conducteur regarde la route mais qu'il soit fatigué ou qu'il soit en pleine forme et ne regarde pas la route.

Nom du nœud	Regard, 20
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	2

TABLEAU 2.16 – Description du nœud Regard

Dans le Tableau 2.16 deux états correspondent au fait que le conducteur regarde ou non la route.

Un conducteur non attentif aura un écart entre sa trajectoire et la trajectoire attendue pour un conducteur attentif (trajectoire moins oscillante pour une route donnée). Il en est de même pour la distance inter-véhiculaire. Les nœuds γ et $\Delta\alpha$ permettent de mesurer ces écarts (voir Tableau 2.17 et Tableau 2.18).

Nom du nœud	Accélération, 18
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	2

TABLEAU 2.17 – Description du nœud γ

Les deux états du nœud *Accélération* permettent de définir une faible ou une forte variation de l'accélération pour une section de route donnée.

Nom du nœud	$\Delta\alpha$, 19
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	2

TABLEAU 2.18 – Description du nœud $\Delta\alpha$

Le nœud $\Delta\alpha$ permet de savoir si le conducteur suit la trajectoire correctement ou non pour une section de route donnée. Un cas particulier est celui où il y a des écarts de trajectoire qui peuvent correspondre à un conducteur novice du fait du manque d'expérience de celui-ci. Ce nœud n'est donc pas une mesure absolue et il ne peut être utilisé seul.

2.3.3.4 Nœud Temps de Réaction

Le nœud *Temps de Réaction* possède comme nœuds parents *Age*, *Regard*, *Fatigue*, *Attention* et comme enfant les nœuds *Perte de Contrôle* du véhicule et *Risque de Télescopage*.

Dans le Tableau 2.19 le nœud décrit l'influence potentielle de l'âge sur le temps de réaction. Nous avons adopté la limite de 70 ans [20]. Il n'y a pas de tableau de probabilités a priori car nous considérons l'information comme exacte sans incertitude.

Pour le temps de réaction, nous adoptons les trois états : vert, orange et rouge (voir Tableau 2.20 et Tableau 2.21).

Nom du nœud	Age, 21
Nature	Observé (renseigné par le conducteur)
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	2

TABLEAU 2.19 – Description du nœud Age

Nom du nœud	Temps de Réaction, 22
Nature	Estimé
Certitude sur le nœud	Incertain
Nombre d'états	3

TABLEAU 2.20 – Description du nœud Temps de Réaction

Age		Fatigue			Attention			Regard		Temps de Réaction		
<70 ans	70 ans <	vert	orange	rouge	vert	orange	rouge	ailleurs	route	vert	orange	rouge
✓		✓			✓			✓		0	0	1
	✓	✓			✓			✓		0	0	1
✓			✓		✓			✓		0	0	1
	✓		✓		✓			✓		0	0	1
✓				✓	✓			✓		0	0	1
	✓			✓	✓			✓		0	0	1
✓		✓				✓		✓		0	0	1
	✓	✓				✓		✓		0	0	1
✓			✓			✓		✓		0	0	1
	✓		✓			✓		✓		0	0	1
✓				✓		✓		✓		0	0	1
	✓			✓		✓		✓		0	0	1
✓		✓					✓	✓		0	0	1
	✓	✓					✓	✓		0	0	1
✓			✓				✓	✓		0	0	1
	✓		✓				✓	✓		0	0	1
✓				✓			✓	✓		0	0	1
	✓			✓			✓	✓		0	0	1
✓		✓			✓				✓	0,95	0,05	0
	✓	✓			✓				✓	0,65	0,34	0,01
✓			✓		✓				✓	0,8	0,19	0,01
	✓		✓		✓				✓	0,45	0,5	0,05
✓				✓	✓				✓	0	0	1
	✓			✓	✓				✓	0	0	1
✓		✓				✓			✓	0,9	0,1	0
	✓	✓				✓			✓	0,6	0,38	0,02
✓			✓			✓			✓	0,7	0,28	0,02
	✓		✓			✓			✓	0,35	0,55	0,1
✓				✓		✓			✓	0	0,1	0,9
	✓			✓		✓			✓	0	0,01	0,99
✓		✓					✓		✓	0,5	0,45	0,05
	✓	✓					✓		✓	0,4	0,5	0,1
✓			✓				✓		✓	0,3	0,55	0,15
	✓		✓				✓		✓	0,2	0,5	0,3
✓				✓			✓		✓	0	0	1
	✓			✓			✓		✓	0	0	1

TABLEAU 2.21 – Tableau de probabilités du nœud Temps de Réaction

Jusqu'à présent, nous avons décrit la démarche pour l'obtention des granularités (dépend de l'information sur le nœud et de son utilisation) et des tableaux de probabilités en allant des racines vers les feuilles à l'exemple du bloc *Temps de Réaction*. La démarche pour les blocs *Décélération Maximale* et *Intention de Freinage* est identique, raison pour laquelle les tableaux sont mis en annexe.

Le nœud *Risque de Télescopage* présente une particularité que nous allons présenter par la suite.

2.3.3.5 Nœud Risque de Télescopage

Le nœud *Risque de Télescopage* dépend de nœuds continus que nous n'avons pas discrétisés. Le pas de discrétisation détermine la dimension des tableaux de probabilités. Considérons l'exemple suivant :

- la vitesse variant entre 0 et 150 km/h où nous choisissons 51 états (c'est-à-dire une résolution de 3 km/h) ;
- pour l'accélération nous choisissons 14 états entre -9 et 4 m/s² (soit une résolution de 1 m/s²) ;
- pour la distance inter-véhiculaire nous choisissons 51 états pour une plage allant de 0 à 100 m (dans cet exemple la plage est volontairement réduite), soit une résolution de 2 m.

Tous les états suivants sont alors à considérer : 3 états pour les nœuds *Temps de Réaction* et a_{max} , 4 états pour *Intention de Freinage*, deux fois 51 états pour la *Vitesse* (véhicule Front et Ego), 14 états pour l'*Accélération* et 51 états pour l'*Inter-distance*. Ce qui nous fait 66 856 104 combinaisons. D'une part, outre le fait que la taille du tableau est difficilement gérable, le remplissage du tableau nécessiterait une connaissance et une précision des probabilités correspondantes que nous ne possédons pas. D'autre part, cela induirait un temps de traitement prohibitif pour l'évaluation des inférences.

Bien entendu, il est possible de discuter de la pertinence des résolutions dans l'exemple ci-dessus : il serait possible de passer d'une résolution absolue vers une résolution relative en fonction de la plage des valeurs (par exemple choisir des échelles logarithmiques) mais la réduction de la dimension des tableaux résultante ne suffirait pas pour résoudre le problème du temps de calcul et de l'information concernant les probabilités disponibles.

Ainsi, nous présentons une méthode de compression d'information en combinant équation déterministe et probabilité. Grâce à cette astuce, la discrétisation de ces nœuds continus n'est pas nécessaire et le nœud *Risque de Télescopage* reste discret. Avant de discuter de cette méthode, nous présentons le nœud *Risque de Télescopage* dans le Tableau 2.22.

Nom du nœud	Risque de Télescopage, 36
Nature	Estimé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	3

TABLEAU 2.22 – Description du nœud Risque de Télescopage

Nous avons classé le risque en trois zones : vert, orange et rouge. Pour le calcul du risque, en absence de connaissance sur l'action du conducteur Front, nous adoptons une vision pessimiste. Cela signifie que le calcul est fait en posant l'hypothèse que Front pile à tout instant. En revanche, en possession de cette donnée, le risque évalué est plus réaliste.

En fonction de ces trois zones, nous avons :

- vert : l'accident peut être évité si le conducteur Ego adopte une réaction adaptée ;
- orange : l'accident peut également être évité. Cependant les tolérances de sécurité sont très faibles voire nulle ;
- rouge : l'accident ne peut être évité même en cas de freinage d'urgence.

Sur la Fig. 2.17, la zone verte permet de compenser une erreur de jugement initial sur le freinage de Front. Par exemple, si le véhicule Front effectue un freinage d'urgence et que le véhicule Ego choisit une décélération moins importante, il pourra encore en raison de cette marge de sécurité rectifier sa décélération. En effet, au temps d'évaluation suivant $T_{\text{éval}}+1$, il est vérifié que le conducteur Ego a pris conscience de la situation. Pendant ce temps, le risque augmente et si Ego n'adopte pas un freinage suffisant le risque passe du vert à l'orange voire au rouge. Dans la zone orange, plus le véhicule Ego sera proche de la limite droite de la zone moins le conducteur Ego aura droit à une erreur de jugement initial. Dans la zone rouge, même en appliquant un freinage d'urgence l'accident ne peut être évité.

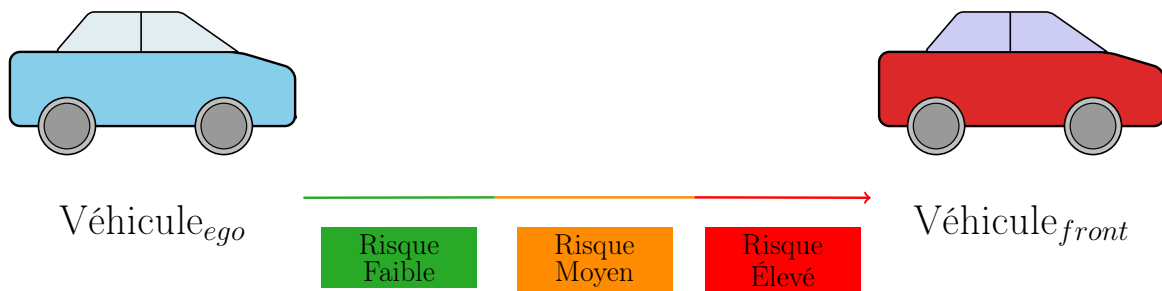


FIGURE 2.17 – La représentation des trois zones du risque de télescopage

2.3.3.5.1 Calcul du risque de télescopage

Dans cette section, nous présentons la méthode qui permet d'éviter de discrétiser les variables vitesse, accélération et inter-distance. Les équations suivantes proviennent des équations newtoniennes et du travail de Derbel [56].

Par la suite, nous considérons deux véhicules qui se suivent, séparés d'une distance d . A un instant donné, le véhicule Front freine suivi du freinage du véhicule Ego après son temps de réaction. Par conséquent, il faut déterminer les deux distances d'arrêt et tenir compte de d . Cela nous permet de savoir quelle est l'inter-distance de sécurité nécessaire une fois que les deux véhicules sont à l'arrêt sous condition que les décélération restent inchangées. Une éventuelle variation des décélération et des vitesses est prise en compte lors de l'évaluation suivante. Pour calculer la distance d'arrêt, nous partons de la formule suivante :

$$\text{DistanceArrêt} = \frac{v_{\text{finale}}^2 - v_{\text{initiale}}^2}{2 \cdot a} \quad (2.2)$$

où :

v_{finale} est la vitesse finale du véhicule

v_{initiale} est la vitesse initiale du véhicule

a est la décélération appliquée par le véhicule

Pour un arrêt total, à la fin de la décélération le but est que le véhicule soit à l'arrêt avec $v_{finale} = 0$. D'où

$$\text{DistanceArrêt}_{Front} = \frac{-v_{front}^2}{2 \cdot a_{frontEst}} \quad (2.3)$$

où :

v_{front} est la vitesse du véhicule Front initiale

$a_{frontEst}$ est la décélération estimée à l'aide de l'Intention de Freinage que le véhicule Front va appliquer, comme expliqué dans la partie 2.3.2.1

Il faut également évaluer la distance d'arrêt minimale du véhicule Ego, celle-ci est fonction de la décélération maximale applicable, le temps de réaction du conducteur Ego, de sa vitesse instantanée et de l'accélération instantanée en faisant l'hypothèse que ces dernières sont supposées constantes durant le temps d'évaluation. Cela signifie que les vitesses et accélérations ne seront actualisées qu'au calcul suivant. Cependant, nous tenons compte d'une variation de vitesse d'Ego durant son temps de réaction. La distance d'arrêt d'Ego est décrite ci-dessous :

$$\text{DistanceArrêt}_{Ego} = \frac{-(v_{ego} + a_{ego} \cdot t_{réact})^2}{2 \cdot a_{max}} + (v_{ego} \cdot t_{réact} + 0,5 \cdot a_{ego} \cdot t_{réact}^2) \quad (2.4)$$

où :

v_{ego} est la vitesse du véhicule Ego initiale

a_{ego} est l'accélération du véhicule Ego initiale

$t_{réact}$ est le temps de réaction estimé du conducteur Ego

a_{max} est la décélération maximale atteignable (voir la partie 2.3.2.1)

Le premier terme correspond à la distance de freinage du véhicule Ego et le deuxième terme à la distance que parcourt le véhicule Ego durant le temps de réaction (avant le début du freinage). Dans le premier terme, nous tenons compte d'une éventuelle accélération (positive ou négative) et donc de la variation de la vitesse possible avant freinage résultant du temps de réaction.

Grâce aux équations (2.3) et (2.4), nous obtenons la distance inter-véhiculaire après freinage (2.5).

$$D_{inter} = d - (\text{DistanceArrêt}_{Ego} - \text{DistanceArrêt}_{Front}) \quad (2.5)$$

où :

d est la distance inter-véhiculaire initiale

Au vu de nos hypothèses de départ, D_{inter} est une variable continue même si le temps de réaction est discret.

Définissons deux autres distances :

- $D_{codedelaroute}$, la distance inter-véhiculaire nécessaire pour être au-delà de la distance de sécurité préconisée par le code de la route;
- $D_{collision}$, la distance à partir de laquelle il y a une collision.

Ces distances vont être modulées par des marges de sécurité qui vont elles-mêmes dépendre de la décélération maximale. Maintenant, nous avons tous les éléments pour déterminer les trois zones de risque dont voici l'algorithme :

- $D_{inter} < D_{collision}$ est la zone rouge. La collision est inévitable;
- $D_{inter} \leq D_{codedelaroute}$ et $D_{inter} > D_{collision}$ est la zone orange. La collision peut être évitée mais plus la valeur du risque est proche de la limite droite moins il y a de marge de sécurité;
- $D_{inter} > D_{codedelaroute}$ est la zone verte. Il y a une forte probabilité que le véhicule Ego évite l'accident à la condition que le conducteur réagisse.

A ce stade de l'explication, il faut revenir sur les trois nœuds discrets *Temps de Réaction*, a_{max} et *Intention de Freinage* qui interviennent dans le calcul de la variable continue D_{inter} . Prenons l'exemple du nœud *Temps de Réaction*, nous n'avons qu'une connaissance incertaine de cette valeur. Cette incertitude est modélisée par une distribution de probabilités dans l'intervalle de 0 à 4 s. Selon Summala [69] et l'ONISR [55] : le conducteur moyen (état bon) possède un temps de réaction d'une seconde en-dessous nous nous rapprochons du temps de réaction des pilotes donc un cas rare; l'état moyen fluctue entre 1 s et 2,2 s; au-delà le conducteur somnole ou dort donc le temps de réaction est infini. Cependant nous l'avons limité à 4 s car déjà après 3 s, les distances nécessaires sont immense et inaccessibles. Comme le montre la Fig. 2.18, les distributions de probabilités sont discrètes. Une discussion avec des experts permettra d'affiner les choix faits. Chaque état du nœud de *Temps de Réaction* possède une distribution qui lui est propre. Donc pour chaque valeur $t_{réact}$, nous allons obtenir un D_{inter} . Chaque valeur de D_{inter} porte un poids qui dépend de la distribution de probabilité de $t_{réact}$. Sur la Fig. 2.19 nous faisons le calcul du risque pour l'état vert du temps de réaction. Nous pouvons noter que chaque D_{inter} contribuera à un état du risque, par conséquent la somme des D_{inter} correspondra à la probabilité de l'état du nœud.

Ce principe est également appliqué aux nœuds a_{max} et *Intention de Freinage*. Leurs distributions sont présentées sur les Fig. 2.20 et Fig. 2.21. Elles prennent leurs valeurs dans l'intervalle -9 et 0 m/s². Sur la Fig. 2.21, par souci de lisibilité, l'échelle a été calibrée sur les distributions de faible amplitude (les états : freinage faible, moyen et fort) car ces distributions varient de 0 à 0,06. Alors que pour la distribution de l'état « freinage > au freinage fort », celle-ci est unitaire et vaut 1 pour la valeur -9 m/s². D'où le fait que cette distribution n'est pas entièrement représentée.

Ainsi nous obtenons la probabilité sur le nœud *Risque de Télescopage*.

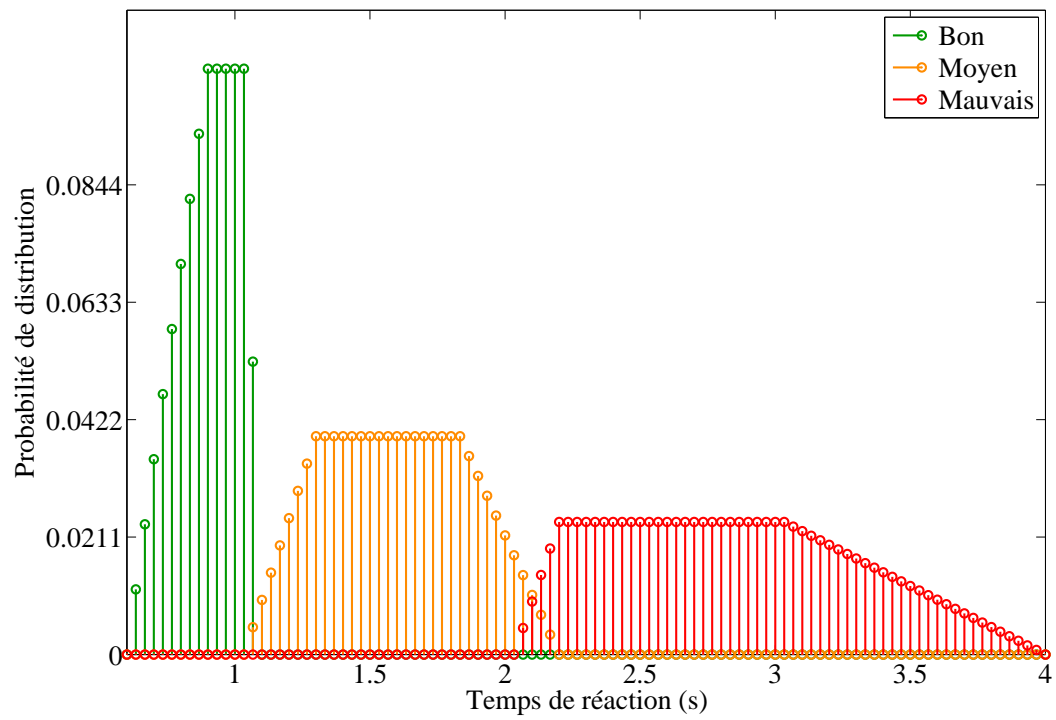


FIGURE 2.18 – Distribution de probabilités pour le temps de réaction

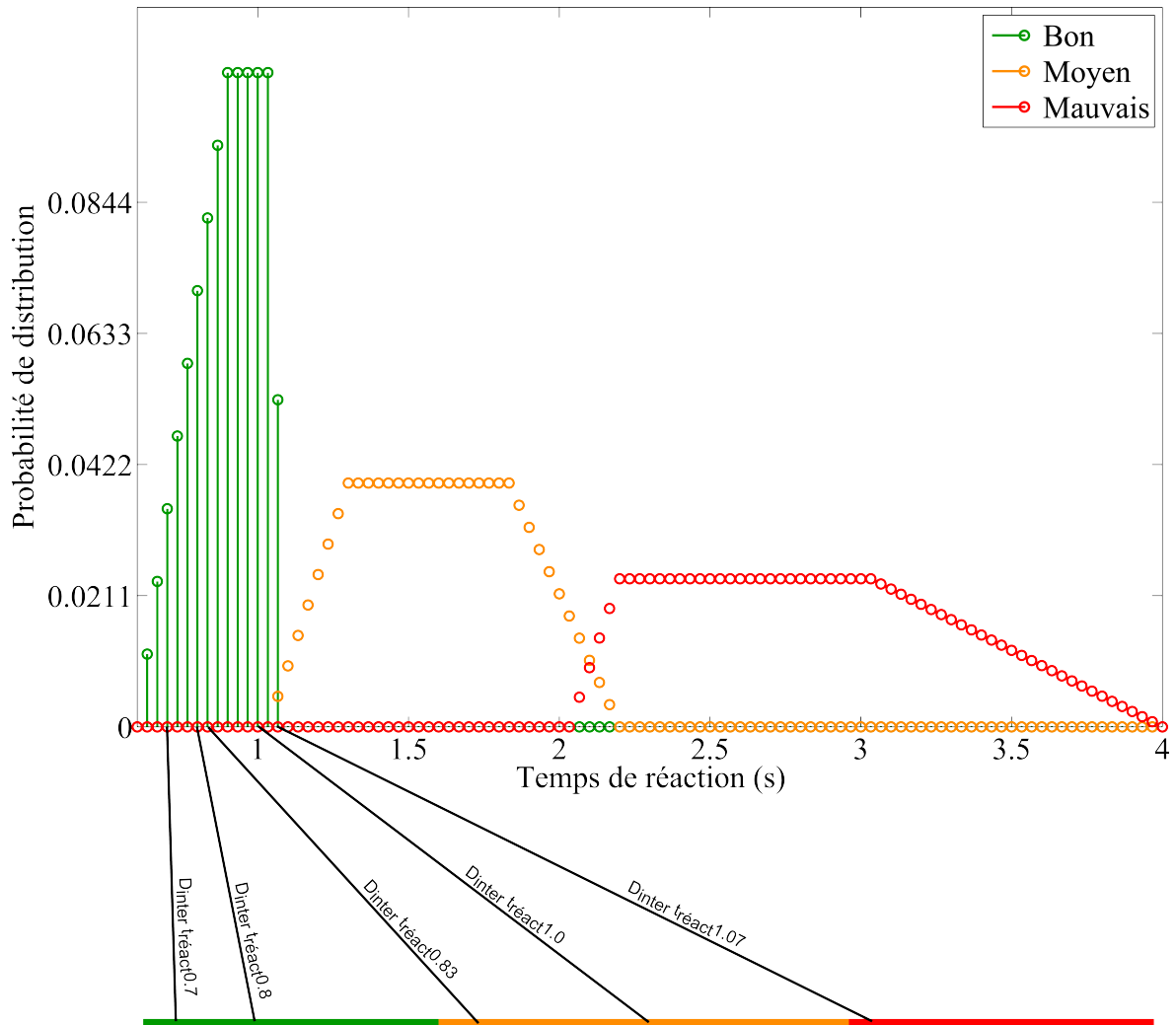


FIGURE 2.19 – Evaluation du risque : contribution de chaque temps de réaction

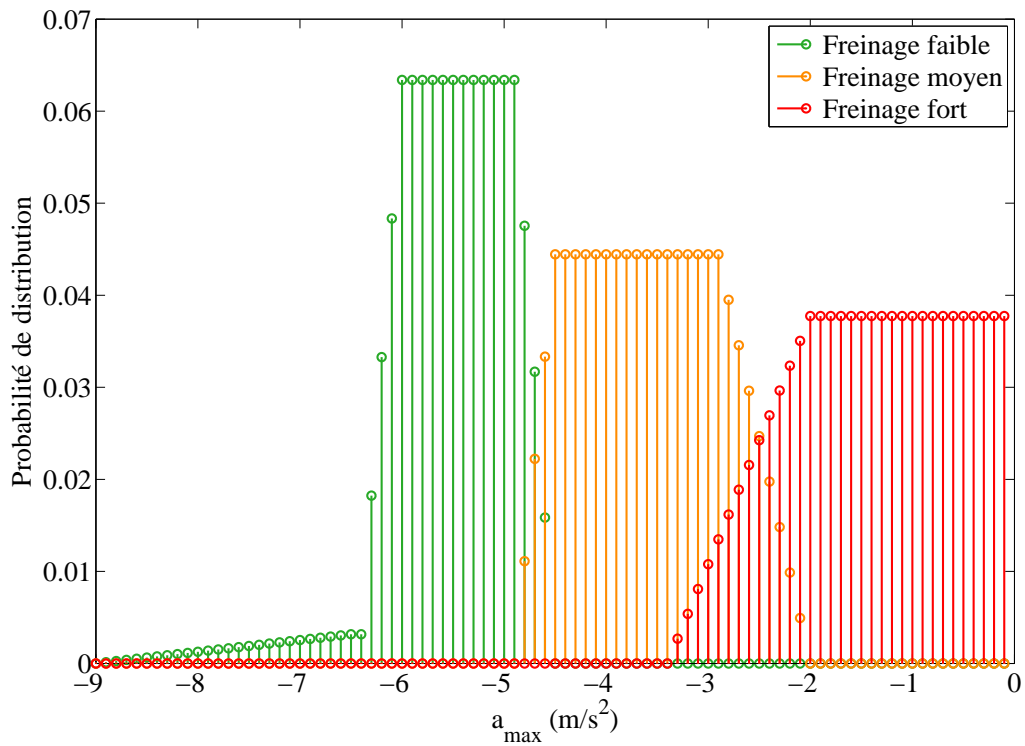


FIGURE 2.20 – Distribution de probabilités pour a_{\max}

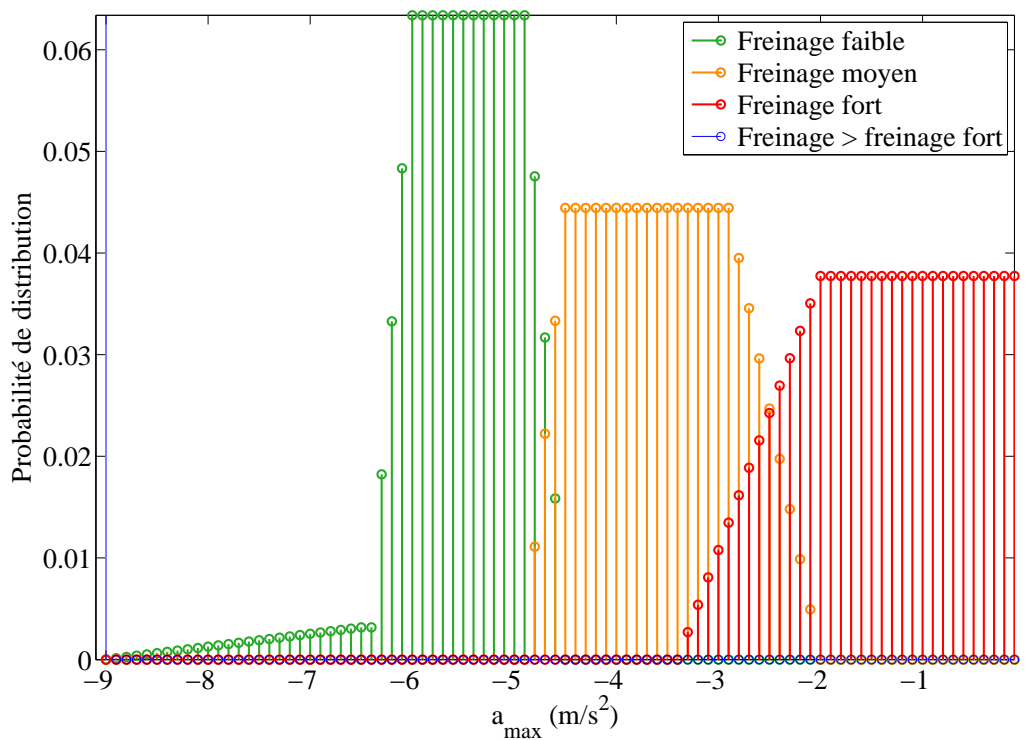


FIGURE 2.21 – Distribution de probabilités pour l'intention de freinage du véhicule Front

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter les outils utilisés : les **réseaux Bayésiens (RB)**, ou *Bayesian Network* et la **communication véhiculaire (VANET)**, ou *Vehicular Adhoc Network*. Le RB que nous adoptons est un réseau discret comportant des nœuds observés, communiqués et cachés. Les nœuds observés sont des variables mesurées ou renseignées. Les nœuds communiqués sont un cas particulier des nœuds observés et ceci est possible grâce au VANET. Nos nœuds cachés correspondent aux nœuds qui ne sont pas mesurés mais estimés c'est-à-dire les nœuds intermédiaires et les deux risques étudiés. L'incertitude de mesure est prise en compte par les distributions de probabilités ainsi que les marges de sécurité.

Puis, nous avons présenté le modèle des interactions que nous avons développé. Ce modèle a été découpé en trois parties qui sont le conducteur, le véhicule et l'environnement.

Ensuite ce modèle d'interaction a été modélisé par l'outil Bayésien. D'une part, avec sa description structurelle, modélisée par des nœuds et arcs, d'autre part avec un modèle probabiliste, c'est-à-dire la granularité (le nombre d'état de chaque nœud) et la quantification des relations (l'impact des nœuds parents sur les nœuds enfants), qui exprime notre connaissance du nœud. Chaque nœud observé est supposé mesuré sans imprécision d'où la non nécessité de fournir un tableau de probabilités pour ces nœuds.

Le nœud *Risque de Télescopage* possède une particularité car il combine des nœuds discrets et continus. La méthode adoptée permet d'éviter des tableaux de taille démesurée (c'est-à-dire fournir l'ensemble des probabilités pour chaque combinaison) et éviter un temps de calcul prohibitif.

La suite de l'exposé portera sur le développement informatique de notre RB qui sera porté sur Matlab et sur un simulateur réseau en C++. Nous étudierons la véracité des résultats par rapport à des données expérimentales menées avec nos véhicules d'essais.

Chapitre 3

Les simulateurs

Sommaire

3.1	Introduction	58
3.2	Description des différents logiciels pour l'exploitation des réseaux Bayésiens	60
3.2.1	Exemple introductif	60
3.2.1.1	Traitement analytique	60
3.2.1.2	Programmation sous Matlab	62
3.2.2	Netica	64
3.2.2.1	Programmation sous Netica	64
3.2.2.2	Représentation du modèle de risque sous Netica	66
3.3	Environnement Network Simulator 3	68
3.3.1	Combinaison de NS3 et Netica	68
3.3.2	Définition et usage des Vehicular Ad-hoc NETWORK	69
3.3.2.1	Phénomènes de propagation et interférence	69
3.3.2.2	Etude des différentes métriques	70
3.3.2.2.1	Cas du croisement	70
3.3.2.2.2	Cas du suivi de véhicule	74
3.4	Conclusion	78

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, le but est de mettre en œuvre notre modèle de risque et de l'exploiter dans des situations réalistes. Pour cela, nous allons utiliser une toolbox sous Matlab développée par Kevin Murphy [48] qui permet la génération d'un **réseau Bayésien (RB)**, ou *Bayesian Network* et son exploitation. Nous avons fait le choix d'utiliser cette toolbox Matlab car elle est reconnue, gratuite, open source, facile d'utilisation. Une fois le réseau créé, nous l'avons testé pour certains cas d'utilisations, comme le télescopage, dans le but de vérifier que nous arrivons à prédire les collisions. Dans notre étude, nous évaluons une distance inter-véhiculaire par une **détection et estimation de la distance par laser (LiDAR)** ou *light detection and ranging* ou localisation (GPS). Malgré cette technologie innovante et performante, elle ne peut être efficace dans toutes les situations : lors d'un croisement sa vue peut être obstruée par des arbres, des immeubles voire des véhicules lourds type camions ; sa portée qui n'est que de 150 m (selon le modèle) ; son incapacité à fonctionner pour des conditions climatiques extrêmes type brouillard. Une solution est de générer de la redondance d'information en utilisant d'autres capteurs combinés à la **communication véhiculaire (VANET)**, ou *Vehicular Adhoc Network*. Cette dernière est intéressante car elle peut être considérée comme des capteurs déportés, elle permet la transmission d'information hétérogène telles la distance, la vitesse, l'accélération et les coordonnées GPS. De plus cette technologie à la capacité d'échanger des informations par tous les temps (comme la pluie, le brouillard), en tout lieu (sur ligne droite, croisement ...), possède une portée plus importante que le **LIDAR** (jusqu'à 800 m) et permet de partager de multiples données. Dans le cas de la position, le **LIDAR** pourrait suffire lorsque l'environnement est dégagé (sur autoroute) ou sur très courte distance (pour détecter des piétons) mais sur un croisement celle-ci souffre de son incapacité à percevoir à travers les murs. Pour compléter ces données, il est intéressant de l'associer avec les **VANET** combiné à un système de positionnement par satellites ou GNSS¹ qui permet de combler les lacunes du **LIDAR**. Dans le cas d'un GPS² nous pouvons avoir une précision centimétrique si nous utilisons un d-GPS³ mais cela suppose une balise fixe. Dans un cas d'usage grand public, la précision est métrique ce qui n'est pas contraignant sur autoroute au vu des distances d'usage. En utilisation urbaine, le GPS sert à valider les mesures du **LIDAR** ou à combler ses lacunes comme sur un croisement sans visibilité. Malgré sa précision métrique dans un carrefour cela n'est pas contraignant car au fur et à mesure que le véhicule se rapproche du carrefour le **LIDAR** pourra percevoir la scène.

Dans le but d'améliorer notre connaissance de l'environnement (le nombre de véhicules présents, les vitesses, les distances ...), de pouvoir tenir compte de l'impact de la communication entre les différents véhicules présents et d'obtenir un outil réaliste, nous avons eu pour but de créer un simulateur liant communication par **VANET** et **RB**. Pour cela nous avons besoin d'outils, comme le simulateur communication réseau Network Simulator 3⁴ (NS3) avec lequel notre laboratoire travaille régulièrement d'où le fait que notre choix s'est porté sur ce simulateur. Par ailleurs, nous y avons intégré une mobilité et les phénomènes de propagation réalistes grâce aux simulateurs Simulation For Urban MObility⁵ (SUMO), la cartographie OpenStreetMap⁶ et la librairie du « Karlsruhe Insti-

-
1. Global Navigation Satellite System
 2. Global Positioning System, système de positionnement mondial
 3. GPS différentiel
 4. <https://www.nsnam.org>
 5. <https://sourceforge.net/projects/sumo/>
 6. <https://www.openstreetmap.org/>

tute of Technology » appelé PhySim-Wifi⁷.

La communication est un des éléments clés de notre modèle permettant l'échange d'information concernant les distances, les vitesses, les accélérations et finalement le risque. Pour la suite nous pensions pouvoir faire une passerelle entre Matlab et NS3. Cependant, il s'est avéré qu'il était difficile de synchroniser les deux systèmes. Nous nous sommes donc tournés vers une solution industrielle qu'est l'API⁸ Netica⁹ développé par Norsys Software Corp. Cette solution permet la construction d'un RB, son exploitation en C++, est facilement intégrable dans le simulateur NS3, la description de nœud déterministe par une équation, un coût à l'achat faible et une interface graphique facilement compréhensible.

7. <http://dsn.tm.kit.edu/english/ns3-physim.php>

8. application programming interface ou interface pour les systèmes informatiques

9. <http://www.norsys.com/index.html>

3.2 Description des différents logiciels pour l'exploitation des réseaux Bayésiens

3.2.1 Exemple introductif

Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous avons tout d'abord développé un modèle de risque par la méthode des RBs sous l'environnement Matlab en utilisant la toolbox BNT, existant depuis plus de 10 ans [40] [19], open source et gratuite développée par Murphy [48]. Dans le but d'initier le lecteur à la programmation de RB avec la toolbox BNT, nous développerons le cas d'école suivant où l'on traite le problème d'arroseur de M. Holmes. Ce RB se compose de quatre nœuds où le nœud Pelouse de Watson a pour parent le nœud Pluie et le nœud Pelouse d'Holmes a pour parent Pluie et Arroseur. Chaque nœud possède deux états comme le montre la Fig. 3.1 où les liens ainsi que les tableaux de probabilités sont définis. Dans ces deux exemples, Holmes aimerait savoir s'il a oublié d'éteindre son arroseur. Pour cela il se pose les questions suivantes « quelle est la probabilité que mon arroseur soit allumé si ma pelouse et celle de mon voisin Watson sont mouillées? » et « quelle est la probabilité qu'il ait plu si les pelouses sont mouillées? ».

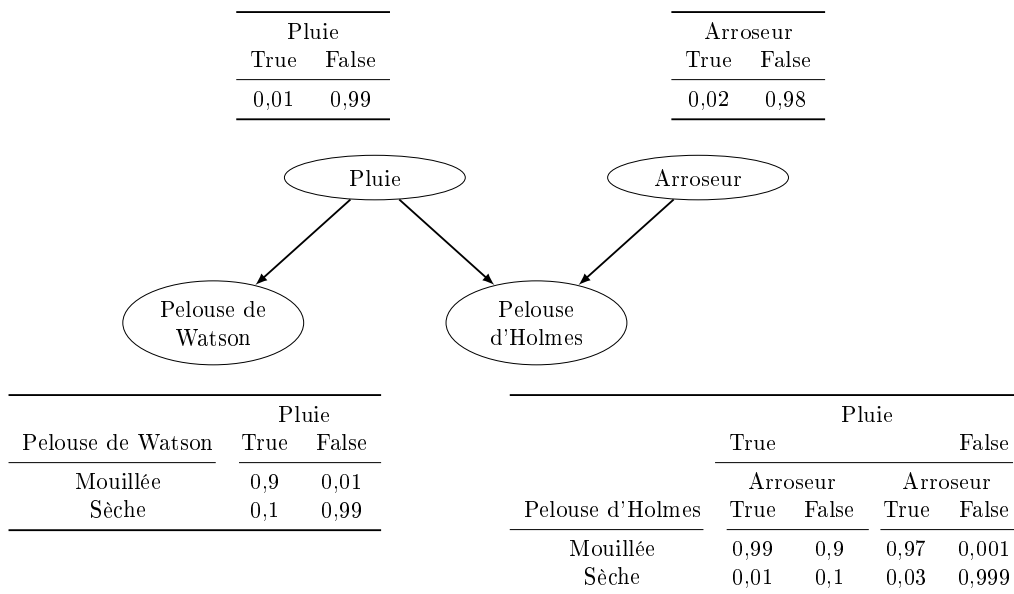


FIGURE 3.1 – Tableaux de probabilités a priori et conditionnelle pour le cas Holmes

3.2.1.1 Traitement analytique

Pour calculer les probabilités, il faut revenir au théorème de Bayes que l'on applique à notre cas soit :

$$P(A = True | H = Mouillée, W = Mouillée) = \frac{P(A, H, W)}{P(H, W)} \quad (3.1)$$

Décomposons Eq. 3.1 en Eq. 3.2 et Eq. 3.3 :

$$\begin{aligned}
 P(A = True, H = Mouillée, W = Mouillée) &= \sum_{i=0}^1 P(P_i)P(A)P(H|A, P_i)P(W|P_i) \\
 &= P(P = True)P(A)P(H|A, P = True)P(W|P = True) \\
 &\quad + P(P = False)P(A)P(H|A, P = False)P(W|P = False)
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

où :

- A correspond au nœud Arroseur
- H correspond au nœud Pelouse d'Holmes
- W correspond au nœud Pelouse de Watson
- P correspond au nœud Pluie
- X = y correspond au nœud X dans l'état y

$$\begin{aligned}
 P(H = Mouillée, W = Mouillée) &= \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 P(P_i)P(A_j)P(H|A_j, P_i)P(W|P_i) \\
 &= P(P = True)P(A = True)P(H|A = True, P = True)P(W|P = True) \\
 &\quad + P(P = False)P(A = True)P(H|A = True, P = False)P(W|P = False) \\
 &\quad + P(P = True)P(A = False)P(H|A = False, P = True)P(W|P = True) \\
 &\quad + P(P = False)P(A = False)P(H|A = False, P = False)P(W|P = False)
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Après calcul, nous obtenons pour la question « quelle est la probabilité que mon arroseur soit allumé si ma pelouse et celle de mon voisin Watson sont mouillées? » le résultat suivant $P(A = True|H = Mouillée, W = Mouillée) = 0,0445$. Au vu du résultat de 4,5 %, Holmes en déduit que son arroseur n'était pas allumé car même la pelouse de Watson est mouillée, il est plus probable qu'il ait plu durant la nuit. Avec le résultat de 4,5 % il est certain qu'il ait plu mais pour en être totalement convaincu répondons à la question « quelle est la probabilité qu'il ait plu si nos pelouses sont mouillées? ». Soit :

$$P(P = True|H = Mouillée, W = Mouillée) = \frac{P(P, H, W)}{P(H, W)} \tag{3.4}$$

Décomposons Eq. 3.4 en Eq. 3.5 et Eq. 3.6 :

$$\begin{aligned}
 P(P = True, H = Mouillée, W = Mouillée) &= \sum_{i=0}^1 P(A_i)P(P)P(H|A_i, P)P(W|P) \\
 &= P(P)P(A = True)P(H|A = True, P)P(W|P) \\
 &\quad + P(P)P(A = False)P(H|A = False, P)P(W|P)
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

où :

- A correspond au nœud Arroseur
- H correspond au nœud Pelouse d'Holmes
- W correspond au nœud Pelouse de Watson

P correspond au nœud Pluie

X = y correspond au nœud X dans l'état y

$$\begin{aligned}
 P(H = \text{Mouillée}, W = \text{Mouillée}) &= \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 P(P_i)P(A_j)P(H|A_j, P_i)P(W|P_i) \\
 &= P(P = \text{True})P(A = \text{True})P(H|A = \text{True}, P = \text{True})P(W|P = \text{True}) \\
 &\quad + P(P = \text{False})P(A = \text{True})P(H|A = \text{True}, P = \text{False})P(W|P = \text{False}) \\
 &\quad + P(P = \text{True})P(A = \text{False})P(H|A = \text{False}, P = \text{True})P(W|P = \text{True}) \\
 &\quad + P(P = \text{False})P(A = \text{False})P(H|A = \text{False}, P = \text{False})P(W|P = \text{False})
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Ainsi, nous obtenons $P(P = \text{True}|H = \text{Mouillée}, W = \text{Mouillée}) = 0,9757$. Holmes en déduit donc qu'il a plu au vu des 97,6 % de risque de pluie. Cela confirme le résultat précédent de 4,5 % pour la probabilité que l'arroseur soit allumé.

Dans la suite, nous présentons comment le programmer avec la toolbox BNT.

3.2.1.2 Programmation sous Matlab

Rappelons que le logiciel de développement Matlab ne permet pas de calcul formel et qu'il est orienté calcul matriciel. Chaque variable est donc décrite par une matrice pouvant contenir des valeurs numériques, des caractères ou des variables qui eux-mêmes contiennent des valeurs numériques. Pour la programmation d'un RB avec la toolbox BNT il faut définir les variables employées et les liens existants entre ces variables. Ces variables et les liens seront décrits dans une matrice contenant des caractères. Puis créer la matrice qui contient toutes ces informations.

```

% names est le vecteur contenant le nom des variables
names = { 'PelouseHolmes', 'Pluie', 'Arroseur', 'PelouseWatson' };
% links est le vecteur contenant les liens entre chaque noeud,
% la premiere variable correspond au parent et le second l'enfant
link = { 'Pluie', 'PelouseHolmes'; 'Pluie', 'PelouseWatson';
        'Arroseur', 'PelouseHolmes' };

% creation de la matrice contenant les informations
% nom et liens des variables
[dag, name] = mk_adj_mat(link, names, 1);

```

Par la suite, il va falloir définir le nombre de nœuds discrets, continus et le nombre d'états de chaque variable tout en tenant compte du fait que plus tard il faudra remplir les tableaux de probabilités a priori ou conditionnelles. Il faut donc choisir un nombre d'états qui soit en relation avec la précision et les informations possédées. Ici le nombre N correspond au nombre de nœuds du réseau donc quatre. Le vecteur "ns" contient le nombre d'états de chaque nœud. Comme indiqué dans les lignes de code chaque nœud possède deux états.

```

% soit N = 4, le nombre de noeuds
N = length(dag);
% creation d'un vecteur decrivant les noeuds discrets
discrete_node = 1:N;

```

```
% le vecteur qui donne le nombre d'etats de chaque noeud, ici binaire
ns = [2 2 2 2];
```

```
% creation du reseau bayesien
% contient les noms, les liens, les etats et la nature des noeuds
bnet = mk_bnet(dag, ns, 'names', name, 'discrete', discrete_node);
```

Après ces étapes, il faut décrire la relation entre chaque nœud c'est-à-dire les tableaux de probabilités a priori et conditionnelles. Ces probabilités sont entrées dans un vecteur puis associé au nœud. L'association au nœud se fait avec la commande `bnet.CPD`¹⁰. En voici un exemple :

```
% vecteur contenant des probabilités
val_Pluie = [0.99 0.01];
% indique que le noeud Pluie possède les probabilités citées
bnet.CPD{'Pluie'} = tabular_CPD(bnet, 'Pluie', val_Pluie);

% le vecteur est plus long car il faut décrire plus de combinaisons
% PelouseHolmes possède 2 parents binaire soit 4 combinaisons
% PelouseHolmes a 2 états soit au total 8 probabilités à fournir
val_PelouseHolmes = [0.999 0.03 0.1 0.01 0.001 0.97 0.9 0.99];
bnet.CPD{'PelouseHolmes'} =
    tabular_CPD(bnet, 'PelouseHolmes', val_PelouseHolmes);
```

Maintenant le **RB** est complètement décrit : les variables, les liens entre variables, le nombre de nœuds discret, le nombre d'états et les tableaux de probabilités. Nous pouvons répondre aux questions précédentes. Il faut pour cela indiquer que la Pelouse d'Holmes et de Watson sont mouillées, poser la question quelle est la probabilité que l'arroseur soit allumé et quelle est la probabilité qu'il ait plu. La matrice "evidence" aura pour but de contenir les observations. Comme indiqué précédemment le nœud "PelouseHolmes" possède deux états le premier (1) la pelouse est sèche et le deuxième état (2) la pelouse est mouillée. La toolbox utilise l'algorithme arbre de jonction¹¹. Soit :

```
% le vecteur d'interrogation
evidence = cell(1,N);
% observation de l'état mouillée pour le noeud PelouseHolmes
evidence{'PelouseHolmes'} = 2;
% observation de l'état mouillée pour le noeud PelouseWatson
evidence{'PelouseWatson'} = 2;
% choix de l'algorithme de calcul
engine = jtree_inf_engine(bnet);
[engine, loglike] = enter_evidence(engine, evidence);

% calcul des probabilités pour les états du noeud Arroseur
margA = marginal_nodes(engine, 'Arroseur');
% soit le resultat = [0.9555 0.0445]
resultat = margA.T

% calcul des probabilités pour les états du noeud Pluie
```

10. CPD pour conditional probability distribution

11. en anglais junction tree ou clique tree

```
margP = marginal_nodes(engine, 'Pluie');
% soit le resultat = [0.0243 0.9757]
resultat = margP.T
```

A travers cet exemple, nous notons que la toolbox de Murphy donne exactement les mêmes résultats que le calcul analytique du [RB](#).

3.2.2 Netica

Pour les raisons évoquées précédemment, nous avons utilisé Netica pour sa praticité. C'est un logiciel qui permet la programmation et l'exploitation des algorithmes de [RB](#). Dans nos travaux de recherche, nous avons utilisé Netica-C, API développée par Norsys Software Corp. afin de créer notre [RB](#) en C++ pour la modélisation du risque de collision. Cette API est une librairie avec des fonctions en C++ pour les [RBs](#) (également appelé réseau de croyance, modèle graphique ou modèle probabiliste causal) et les diagrammes d'influences (également connu sous le nom de réseau de décisions). L'API possède des fonctions permettant d'apprendre à partir de données, modifier, transformer, faire des tests de performance du réseau crée, sauvegarder et lire le dit réseau et calculer des probabilités d'inférence. Netica peut être utilisé pour diagnostiquer (c'est-à-dire remonter le réseau afin d'en déduire une probabilité sur un parent), prédire (c'est-à-dire l'évaluation inversée du diagnostic, le but étant d'en déduire une probabilité sur un enfant), classifier, la fusion de données, l'analyse de risque, combiner des informations incertaines et des calculs d'inférences [51]. L'API utilise l'algorithme d'arbre de jonction, afin de calculer les probabilités en envoyant des messages aux différentes cliques, basé sur les travaux de Lauritzen [61] sur les inférences de probabilités.

Dans ces travaux, nous utilisons l'algorithme d'arbre de jonction (cet algorithme permet d'avoir un résultat numérique exact mais le temps de calcul est long), les fonctions en C++ pour la création de nœud discret et continu, les fonctions de distributions de probabilités et la fonction d'équation qui traduit une équation en tableau de probabilité conditionnelle.

3.2.2.1 Programmation sous Netica

Reprenons l'exemple introductif de M. Holmes et sa pelouse dans le but de montrer un aperçu de la programmation avec la librairie Netica. Pour cela, nous donnerons quelques exemples sous forme de lignes de code pour la construction de notre réseau.

En premier lieu, il faut créer le réseau et décrire les nœuds qui le composent. Chaque nœud possède un nom et des états. Si c'est un nœud continu alors la valeur de l'état est indiquée par 0 sinon par le chiffre 2 ou plus. Dans notre exemple chaque état portera le chiffre 2.

```
\ \ creation de variables pour la creation du graphe
net_bn* net;
int res;
char mesg[MESG_LEN_ns];
env = NewNeticaEnviron_ns ("numero_serie", NULL, NULL);
\ \ initialisation du reseau
res = InitNetica2_bn (env, mesg);

% instantiation du graphe
net = NewNet_bn ("nom_reseau", env);
```

```

\\ creation du noeud PelouseHolmes qui possede 2 noeuds
node_bn *PelouseHolmes = NewNode_bn ("PelouseHolmes", 2, net);
\\ creation du noeud Pluie qui possede 2 noeuds
node_bn *Pluie = NewNode_bn ("Pluie", 2, net);
node_bn *Arroseur = NewNode_bn ("Arroseur", 2, net);
node_bn *PelouseWatson = NewNode_bn ("PelouseWatson", 2, net);

```

Ensuite, il est possible et optionnel de donner des noms aux états des nœuds discrets. Ainsi nous pouvons appeler un état par son nom (s'il en possède un), sinon par la position de l'état dans le nœud. Par exemple, le nœud PelouseWatson possède deux états, le premier "Mouillée" (ou l'état 0) et le second état "Sèche" (ou état 1). Une fois que les nœuds sont créés, il faut donner les liens existants.

```

\\ les etats du noeud PelouseWatson sont Mouillee et Seche
SetNodeStateNames_bn (PelouseWatson, Mouillee, Seche);
\\ les etats du noeud Arroseur sont Vrai et Faux
SetNodeStateNames_bn (Arroseur, Vrai, Faux);
\\ definition du lien de Pluie vers PelouseHolmes
AddLink_bn (Pluie, PelouseHolmes);
AddLink_bn (Pluie, PelouseWatson);
AddLink_bn (Arroseur, PelouseHolmes);

```

Il y a ensuite deux manières de définir les tableaux de probabilités de chaque nœud soit en donnant le tableau de probabilités avec toutes les combinaisons ou si le nœud est déterministe rentrer l'équation qui le décrit. Si pour un nœud le tableau de probabilités n'est pas décrit alors par défaut la distribution est uniforme. Pour une combinaison des états des nœuds parents, il faut fournir les probabilités des états du nœud considéré. Ici, pour le nœud PelouseWatson, la première valeur correspond à l'état 0 du nœud Pluie et les valeurs suivantes sont les probabilités des états Mouillée et Sèche.

```

\\ definition du tableau de probabilites de PelouseWatson
\\ lorsque la Pluie est a l etat 0
SetNodeProbs (PelouseWatson, 0, 0.9, 0.1);
\\ lorsque la Pluie est a l etat 1
SetNodeProbs (PelouseWatson, 1, 0.01, 0.99);

\\ definition du tableau de probabilites de PelouseHolmes
\\ lorsque la Pluie est a l etat 0
\\ et Arroseur a l etat Vrai (ou 0)
SetNodeProbs (PelouseHolmes, 0, 0, 0.99, 0.01);

\\ lorsque la Pluie est a l etat 0
\\ et Arroseur a l etat Faux (ou 1)
SetNodeProbs (PelouseHolmes, 0, 1, 0.9, 0.1);

\\ lorsque la Pluie est a l etat 1
\\ et Arroseur a l etat Vrai (ou 0)
SetNodeProbs (PelouseHolmes, 1, "Vrai", 0.97, 0.03);

\\ lorsque la Pluie est a l etat 1
\\ et Arroseur a l etat Faux (ou 1)
SetNodeProbs (PelouseHolmes, 1, "Faux", 0.001, 0.999);

```


Une fois que chaque nœud est discrétisé (s'il est continu) et que son tableau de probabilités est donné, nous pouvons entrer les observations et évaluer une probabilité. Nous entrons l'information sur les nœuds PelouseHolmes et PelouseWatson respectivement avec l'état Mouillée et 0. Puis évaluons la probabilité du nœud Arroseur.

```

\\ observation de l etat mouillee pour le noeud PelouseHolmes (ou 0)
EnterFinding_bn(PelouseHolmes, 0);
\\ observation de l etat mouillee pour le noeud PelouseWatson (ou 0)
EnterFinding_bn(PelouseWatson, "Mouillee");

\\ compilation du reseau
CompileNet_bn (net);
\\ calcul de probabilite pour l etat Vrai (ou 1) du noeud Arroseur
\\ le resultat est belief = 0.0445
prob_bn belief = GetNodeBelief ((char *)"Arroseur", (char *)"Vrai", net);

```

A travers cet exemple, nous notons que la librairie Netica donne exactement les mêmes résultats que le calcul analytique du RB et que la version Matlab.

Dans cette partie, nous avons donné quelques points d'utilisation afin de permettre au lecteur de se familiariser avec Netica. Pour de plus amples informations et utilisations voir le manuel d'utilisation ¹².

Toutefois, nos travaux sous Matlab ne nous permettent pas la prise en compte des phénomènes liés au VANET. Pour tenir compte de la communication VANET, nous avons choisi d'intégrer Netica dans le simulateur NS3.

3.2.2.2 Représentation du modèle de risque sous Netica

Netica alloue une certaine quantité mémoire pour son utilisation. Dans cette mémoire y sont stockés les nœuds, le nombre d'état de chaque nœud, les liens entre nœuds et la discrétisation des nœuds continus. Pour l'utilisation de Netica, il est important de trouver un compromis parmi toutes ces données. Il faut également se rappeler que plus le réseau est important (nombre de nœuds, nombre d'états, etc.) plus le temps de calcul sera grand.

Lors des premières utilisations de Netica, nous avons construit un RB complet (comportant tous les nœuds) mais nous sommes tombés sur une erreur de limitation mémoire. Le RB programmé, c'est-à-dire la description des nœuds, des états, des liens, des tableaux de probabilités et des discrétisations demandaient trop de ressource en mémoire. Puis nous avons essayé de reproduire l'astuce du Chapitre 2 que nous avons employée sous Matlab qui consistait à introduire des tableaux dynamiques. Cette astuce ne pouvait être reproduite sous Netica. Par conséquent, nous avons opté pour une réduction de la taille du RB en nous concentrant sur les nœuds principaux voir Fig. 3.2 et Tableau 3.1.

Par exemple, pour le cas du nœud *Temps de Réaction*, nous avons enlevé tous ses nœuds parents. Cela implique que nous imposons un état au *Temps de Réaction*. Cette réduction est également appliquée au nœud a_{max} . Outre ces réductions au niveau des nœuds, nous avons dû discrétiser des variables continues comme la vitesse et l'accélération sur des plages d'utilisation moindre. Ainsi nous avons limité le RB pour une utilisation urbaine, par exemple des vitesses variant de 0 à 50 km/h avec un pas de 1 km/h. Ces réductions et restrictions nous ont permis d'utiliser notre RB sur notre simulateur.

12. http://www.norsys.com/downloads/NeticaAPIMan_C.pdf

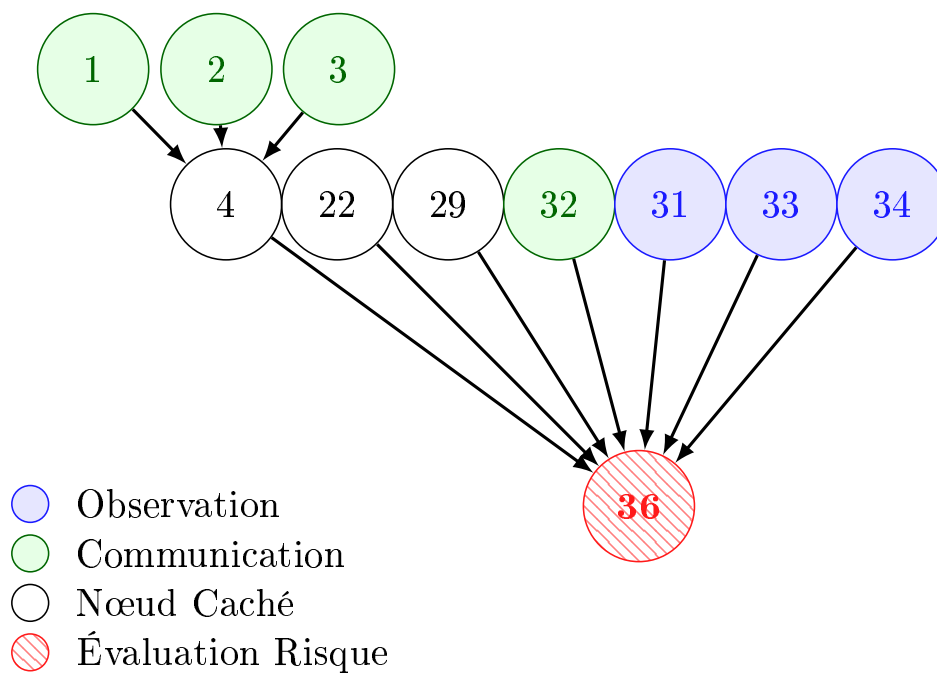


FIGURE 3.2 – Schéma du réseau Bayésien utilisé sur NS3

Nœud	Variable
1	Risque _{front}
2	a_{front}
3	Contexte
4	Intention de freinage
22	Temps de réaction
29	Décélération maximale ou a_{max}
31	Vitesse _{ego}
32	Vitesse _{front}
33	Inter-distance
34	a_{ego}
36	Risque de télescopage

TABEAU 3.1 – Nomenclature des nœuds sous NS3

3.3 Environnement Network Simulator 3

Afin d'intégrer la communication (la plus réaliste possible), nous nous sommes tournés vers le simulateur réseau Network Simulator 3, déjà utilisé dans notre équipe de recherche. Comme expliqué précédemment NS3 est un simulateur à événements discrets principalement utilisés dans les aspects de recherche liés aux réseaux informatiques et cellulaires dont les communications sans fil font parties.

L'ambition de NS3 est de développer des simulations réseaux les plus réalistes possibles pour des systèmes IP¹³ et non-IP. Des modèles existent pour différents types de technologies de communication, WiFi, WiMAX et même un support pour des réseaux cellulaires (LTE¹⁴). Différents protocoles réseaux sont également implantés tels que des protocoles IP (MAC, Ethernet) mais aussi des protocoles réseaux tel que OLSR ou AODV pour des réseaux ad-hoc notamment utilisé dans le cadre des VANET [35], [9].

NS3 est programmé en langage Python et C++ permettant des développements et l'intégration de bibliothèques externes.

Dans notre cas, comme expliqué dans la Section 3.3.2.1 sur les phénomènes de propagation, nous avons intégré une couche physique réaliste appelé PhySim-Wifi du Karlsruhe Institute of Technology (KIT) pour modéliser la couche IEEE 802.11p. Cette couche nous permet d'avoir accès au codage et décodage utilisé dans les VANET, l'Orthogonal Frequency-division Multiplexing (OFDM) qui ne sera pas détaillé ici. Cette bibliothèque est elle-même basée sur une bibliothèque mathématiques It++¹⁵ implémentant la transmission du signal. Ces deux bibliothèques sont discutées dans le chapitre de livre [4].

Ce simulateur couplé avec le simulateur de mobilité « Simulation For Urban Mobility - SUMO¹⁶ » et la cartographie OpenStreetMap¹⁷ permet d'obtenir des scénarios de mobilité VANET réaliste.

3.3.1 Combinaison de NS3 et Netica

Notre simulateur d'évaluation du risque pour différents scénarios résulte de l'intégration de Netica dans le simulateur NS3. Comme expliqué plus haut, l'intégration de bibliothèque externe à NS3 a été réalisée. Nous avons effectué le lien entre la bibliothèque Netica dans le système de gestion de construction des binaires.

De ce fait, chaque véhicule évoluant dans l'environnement de NS3 pourra ou non posséder son propre RB et donc évaluer le risque auquel il est exposé. Dans nos scénarios, chaque véhicule peut accéder à ses données de dynamique du véhicule (telles que la vitesse, l'accélération, la position etc.) et au risque du véhicule Front grâce à la communication par VANET. Par conséquent, à chaque temps de calcul, les véhicules partagent leur dynamique et leur risque tout en tenant compte de la propagation et du protocole de routage choisi. Ensuite les nœuds d'observations (par exemple les capteurs de vitesses) sont mis à jour et de nouvelles inférences sont évaluées.

Du fait de la consommation mémoire de Netica, nous pouvons faire évoluer les véhicules que sur certaines plages de vitesse, d'accélération, de distance, etc. Cela signifie pour le cas de la vitesse que nous ne pouvons simuler que sur la plage de 0 à 50 km/h. Ce

13. Internet Protocol

14. Long Term Evolution

15. IT++ library of mathematical, signal processing and communication classes and functions <https://sourceforge.net/p/itpp>

16. <https://sourceforge.net/projects/sumo/>

17. <https://www.openstreetmap.org/>, publié sous licence Open Database Licence (odbl)

problème est dû au fait que nous avons besoin de discrétiser nos valeurs continues pour que l'API puisse évaluer les inférences. Or l'algorithme évalue toutes les possibilités. En conséquence les calculs deviennent de plus en plus long et demande de plus en plus de mémoire. Pour contrer cela l'API limite le nombre de possibilités et donc la finesse des discrétisations. Ces limites sont de deux ordres :

- le premier est dépendant de la mémoire du système compte tenu de la discrétisation mais aussi du nombre de véhicules dans notre simulation ;
- le deuxième est dépendant de la puissance de calcul. Nous avons utilisé dans notre cas un lame de calcul basé sur 16 processeurs mais des limites sur 20 véhicules ont été rapidement montré.

Dans la suite de la thèse, lorsque le simulateur NS3 sera évoqué, nous parlerons du simulateur dans lequel nous avons intégré l'ensemble des bibliothèques discutés ici.

3.3.2 Définition et usage des Vehicular Ad-hoc NETWORK

Les VANET utilisent la norme WiFi 802.11p et sont utilisés afin d'apporter une nouvelle dimension à l'utilisation des capteurs. Grâce au VANET nous pouvons avoir accès aux données des véhicules environnants comme leur vitesse, accélération, position, etc. Finalement dans notre cas d'utilisation des VANET pourraient être défini comme des capteurs déportés.

3.3.2.1 Phénomènes de propagation et interférence

La technologie VANET est soumise à des phénomènes physiques qui vont perturber le signal émis voire [28] ou [58]. Il y a quatre types de perturbations :

- l'atténuation du signal (ou « path-loss ») entre l'émetteur et le récepteur qui est due à la distance entre les deux communicants ;
- l'atténuation grande-échelle (ou « large-scale shadowing ») apparaît lorsque le signal rencontre un obstacle tel qu'un camion, un immeuble et que le signal ne peut le traverser. Par conséquent le signal sera réfléchi et déphasé ;
- l'atténuation petite-échelle (ou « small-scale fading ») apparaît également lorsqu'il y a rencontre avec un obstacle de « petite taille » les feuilles d'un arbre, des phénomènes météorologique (pluie, neige, etc.). De ce fait, le signal pourra en partie traverser l'objet et sera peu déphasé mais aura une amplitude différente ;
- l'effet Doppler altère la fréquence du signal émis et fais apparaître un déphasage du signal due à la vitesse des nœuds.

Ces perturbations peuvent induire un délai dans l'arrivée du message mais aussi la perte du message correspondant du fait de l'impossibilité de décoder le message à l'arrivée. Les phénomènes de propagation sont à considérer pour la validité de notre modèle afin d'avoir un modèle le plus réaliste possible. En effet, si un des messages est perdu ou altéré, une collision pourrait s'ensuivre.

Dans les exemples suivants, nous tiendrons compte de ces phénomènes de propagations au travers de modèles de propagation réaliste intégré dans notre simulateur réseau NS3 [1].

3.3.2.2 Etude des différentes métriques

Il y a deux mesures principalement utilisées dans les VANET qui sont le **taux de réception (PDR)**, ou *Packet Delivery Ratio* et **temps de délivrance du paquet (E2E)**, ou *End-to-End delay*. Le PDR définit le nombre de paquets reçus au regard du nombre de paquets émis. Le E2E delay comme son nom l'indique est le temps qu'il faut pour que le paquet émis soit réceptionné et décodé par le récepteur.

Ces deux paramètres sont dépendants de la puissance de réception (définie en dBm). La puissance de réception est dépendante des phénomènes décrits ci-dessus et de la puissance d'émission (fixée à 20 dBm en France). Le seuil minimum de réception est de -95 dBm fixé dans la norme IEEE 801.11.

Ainsi les études suivantes ont été réalisées dans le cadre du simulateur réseau NS3¹⁸ que nous décrivons dans la Section 3.3 couplé à la librairie PhySim-Wifi¹⁹ et la librairie Netica. Une étude [4] a été réalisée quant au réalisme de l'émulation de la couche physique par des modèles statistiques. Ce sont ces modèles que nous allons utiliser dans notre simulateur pour émuler la couche physique.

Dans le cadre de notre étude, nous allons étudier deux scénarios de mobilité pour le cas d'un croisement de 2 véhicules et d'un suivi de 3 véhicules nous permettant d'évaluer l'impact des phénomènes de propagation dans la communication véhiculaire.

3.3.2.2.1 Cas du croisement

Afin d'effectuer l'étude sur la communication, nous avons réalisé une étude sur un croisement de 2 véhicules se rapprochant à un carrefour comme le montre la Fig. 3.3. Chaque véhicule est distant au départ de 1 km et se rapproche à la vitesse de 50 km/h.

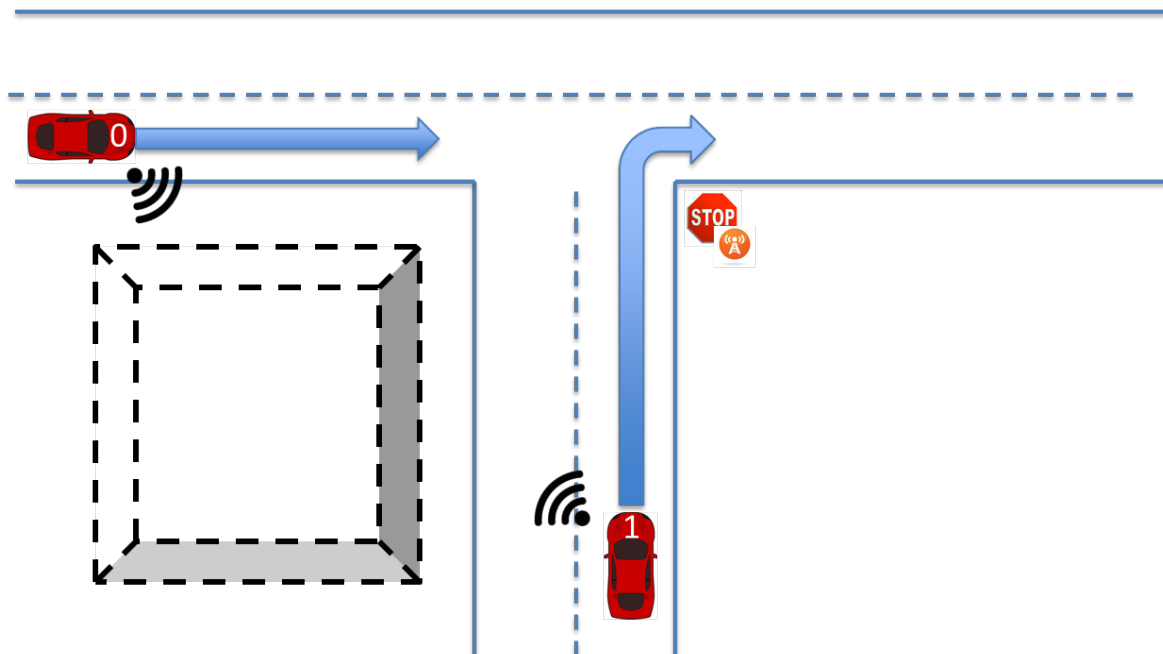


FIGURE 3.3 – Schéma du croisement

L'objectif est de connaître le PDR compte tenu des phénomènes de propagation. Pour cela, nous avons étudié la puissance de réception en fonction de la distance dans deux cas :

18. The ns-3 discrete-event network simulator for Internet systems (<https://www.nsnam.org>)

19. <http://dsn.tm.kit.edu/english/ns3-physim.php>

- le premier cas considère que les deux véhicules sont en ligne de vue directe (Line Of Sight, LOS) ;
- le deuxième cas considère que les véhicules ont une ligne de vue non direct (Non Line of Sight, NLOS) ce qui vient encore perturber la communication.

Dans le cas NLOS, un bâtiment sépare les deux véhicules. Pour considérer ce type de problème, nous devons faire appel à une infrastructure de communication et utiliser un protocole de routage VANET qui permettrait de relayer l'information par un ou plusieurs sauts entre les véhicules en utilisant dans notre exemple le panneau stop (infrastructure). Pour cette étude, nous avons utilisé le protocole AODV [35]. Une étude préliminaire a été effectuée mais sans intégrer le risque.

Comme expliqué précédemment, les phénomènes de propagations sont modélisés dans NS3 par des modèles statistiques. Nous avons donc répété la simulation 20 fois pour obtenir ces résultats. Le nombre de simulation a été déterminé en suivant une loi normale sur nos résultats. Le Tableau 3.2 définit les paramètres utilisés.

Paramètre	Valeur du paramètre
Simulateur	NS3 avec Physim-Wifi
Nombre de véhicules	2 véhicules se déplaçant à 50 km/h
Puissance de transmission	20 dBm
Modèles de propagation	Modèle ABBAS LOS et modèle de fading (Rician fading avec paramètre $K = 2$) Modèle ABBAS NLOS et modèle de fading (Rician fading avec paramètre $K = 2$)
Durée de la simulation	80 s (collision entre les 2 véhicules i.e. distance < 1 m à $T = 72$ s)
Temps entre l'envoi de 2 paquets	0,1 s

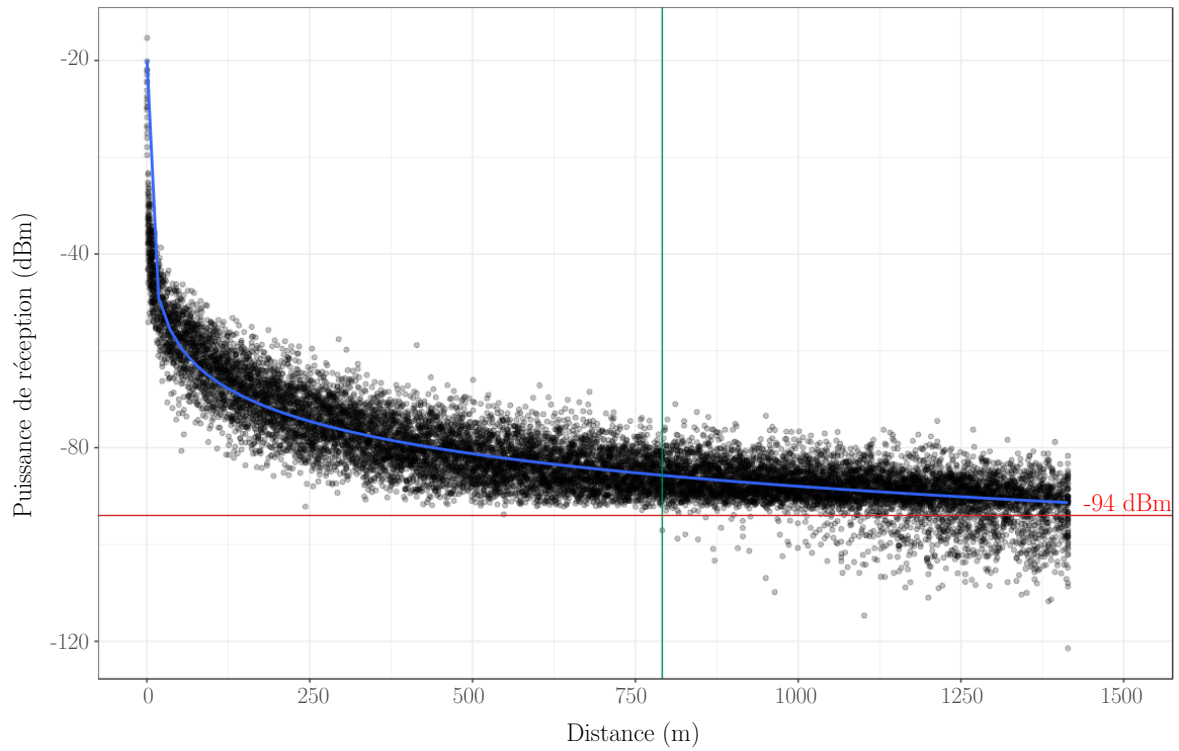
TABLEAU 3.2 – Paramètres utilisés pour l'étude du croisement

Nous pouvons voir sur la Fig. 3.4a que la communication est établie dès une distance de 690 m dans le cas LOS et sur la Fig. 3.4b à 590 m dans le cas NLOS. Soit à $T = 35$ s pour LOS et à $T = 30$ s. La collision arrivant à $T = 72$ s, nous pouvons donc considérer qu'il serait possible d'arrêter un véhicule à temps pour éviter la collision et en incluant le temps de réaction des conducteurs.

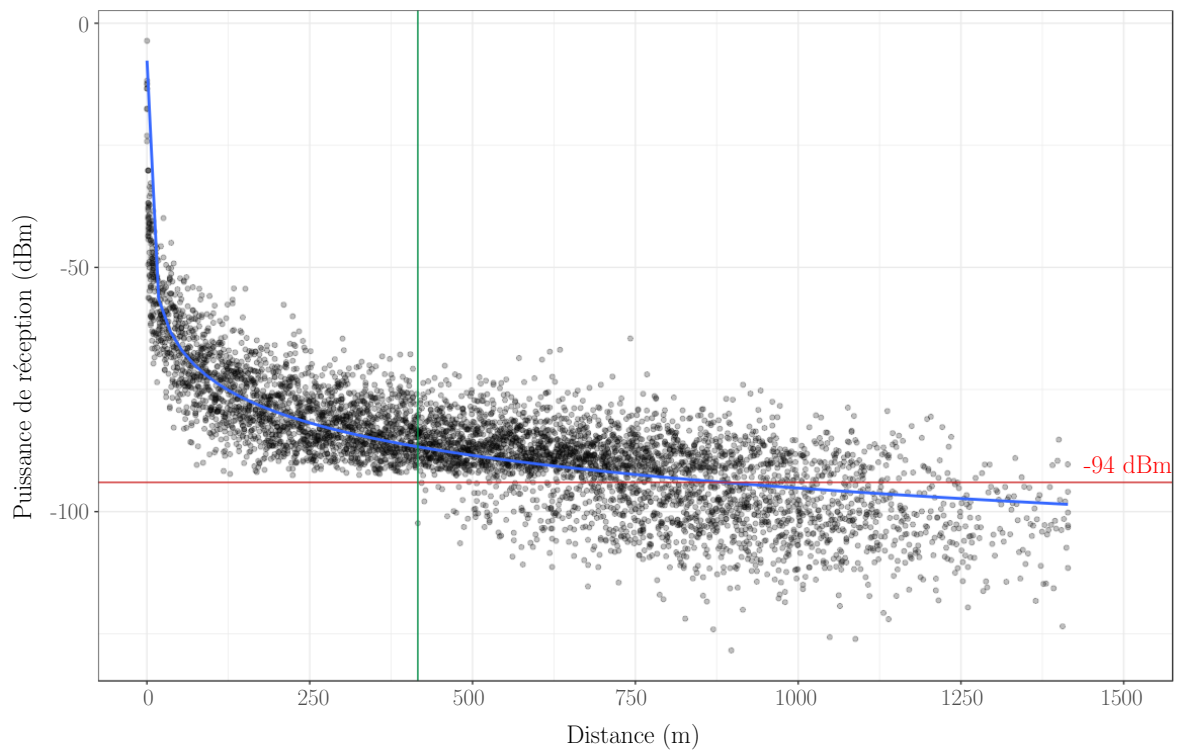
Cette étude, nous conduit donc à regarder le PDR et le E2E delay. Pour cela, nous avons défini 2 distances, une distance limite permettant au véhicule de s'arrêter avant la collision ($d_{max} = 28$ m) et une distance pour laquelle la collision pourrait s'avérer inévitable ($d_{critique} = 13$ m). Ces deux distances ont été déterminées en tenant compte de la vitesse et du temps de réaction moyen. d_{max} correspond à deux fois la distance parcourue en 1 s (distance provenant du code de la route). Le temps de réaction moyen est d'une seconde, ici le véhicule parcourt 13,9 m/s donc pour une distance inférieure à 1 s par exemple 0,9 s (soit 13 m) cela en devient critique, d'où $d_{critique} = 13$ m.

La Fig. 3.5 montre le PDR sur l'ensemble des 20 simulations pour les cas LOS et NLOS. Nous pouvons noter que sur les 20 simulations lorsque le véhicule est compris entre les distances d_{max} et $d_{critique}$, le PDR est de 100 %, c'est à dire que 100 % des paquets émis ont été reçus.

La Fig. 3.6 montre que pour les 20 simulations le E2E delay est de 0 s ou proche de 0 s ce qui convient parfaitement à notre cas d'usage.



(a) Pour le cas LOS



(b) Pour le cas NLOS

FIGURE 3.4 – Puissance de réception en fonction de la distance pour le croisement

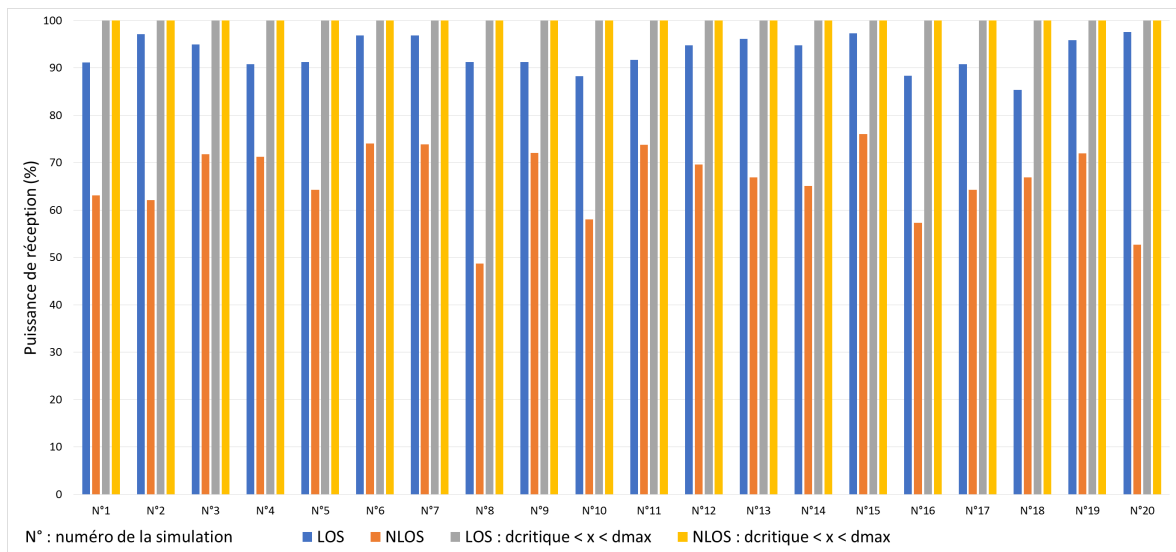


FIGURE 3.5 – Puissance de réception pour les 20 simulations en situation de croisement

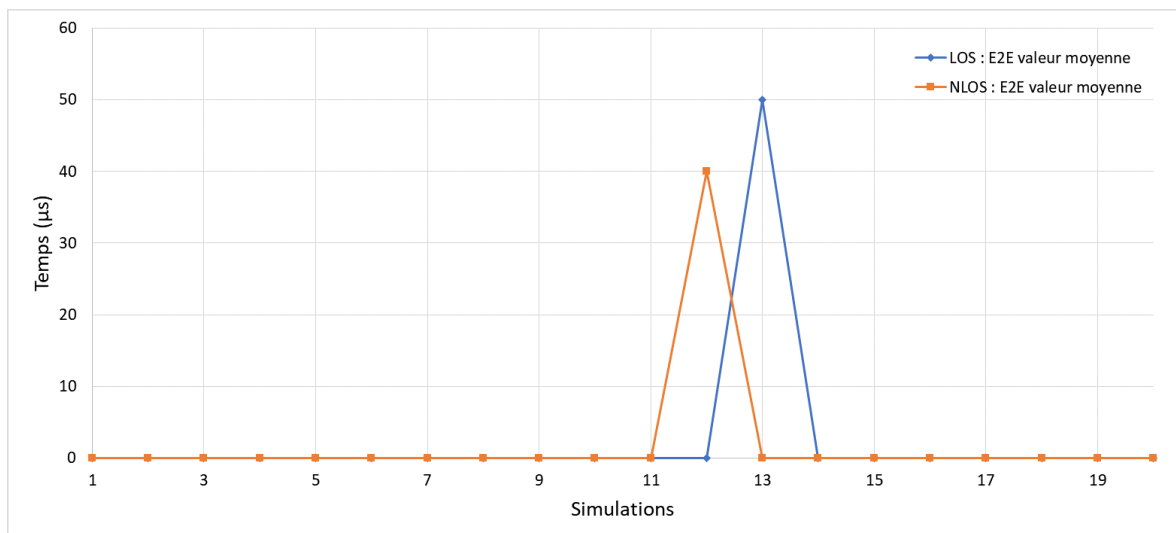


FIGURE 3.6 – Temps de délivrance du paquet en situation de croisement

Nous nous sommes placés dans cette étude sur 2 véhicules se rapprochant depuis 1000 m, dans ces conditions, la communication s'établit dès que les véhicules sont à portée. Néanmoins, dans des conditions moins optimales (un véhicule avec un moteur à l'arrêt qui démarre quelques mètres avant le carrefour), le temps d'établissement de la communication pourrait s'avérer trop important au regard de la distance parcourue par le véhicule. De même, sur des vitesses plus importantes, ces mêmes phénomènes réseaux pourraient apparaître.

3.3.2.2.2 Cas du suivi de véhicule

Dans cette partie nous avons pour but d'étudier la qualité de la communication : la puissance de réception, le taux de réception et le temps de délivrance des paquets pour le cas du suivi. Dans le cas de suivi de véhicules en ville, les distances employées sont très souvent inférieures à 50 m (plus de détail dans le Chapitre 4). Pour cette étude sur la communication en situation urbaine, nous avons réalisé une étude sur deux véhicules, où le véhicule Ego se rapproche du véhicule Front. La distance initiale est de 1 km, le véhicule Ego roule à 40 km/h et Front à 31,5 km/h. L'objectif est de connaître le PDR compte tenu des phénomènes de propagation. Pour cela, nous avons étudié la puissance de réception en fonction de la distance dans deux cas :

- le premier cas considère que les deux véhicules sont en ligne de vue directe (Line Of Sight, LOS) ;
- le deuxième cas considère que les véhicules ont une ligne de vue partiellement obstruée (Obstructed Line of Sight) ce qui vient encore perturber la communication.

Comme expliqué précédemment, les phénomènes de propagations sont modélisés dans NS3 par des modèles statistiques. Nous avons donc répété la simulation 20 fois pour obtenir ces résultats. Le nombre de simulation a été déterminé en suivant une loi normale sur nos résultats. Le Tableau 3.3 définit les paramètres utilisés.

Paramètre	Valeur du paramètre
Simulateur	NS3 avec Physim-Wifi
Nombre de véhicules	2 véhicules Front à 31,5 km/h et Ego à 40 km/h
Puissance de transmission	20 dBm
Modèles de propagation	Modèle ABBAS LOS et modèle de fading (Rician fading avec paramètre $K = 2$) Modèle ABBAS NLOS et modèle de fading (Rician fading avec paramètre $K = 2$)
Durée de la simulation	80 s (collision entre les 2 véhicules i.e. distance < 1 m à $T = 72$ s)
Temps entre l'envoi de 2 paquets	0,1 s

TABLEAU 3.3 – Paramètres utilisés pour l'étude du suivi

Nous pouvons voir sur les figures de puissance de réception, sur la Fig. 3.7a que pour le cas LOS la communication est établie dès 1000 m et sur la Fig. 3.7b à 630 m pour le cas OLOS. Il faut également déterminer si la communication est maintenue et le temps qu'il faut pour échanger des paquets.

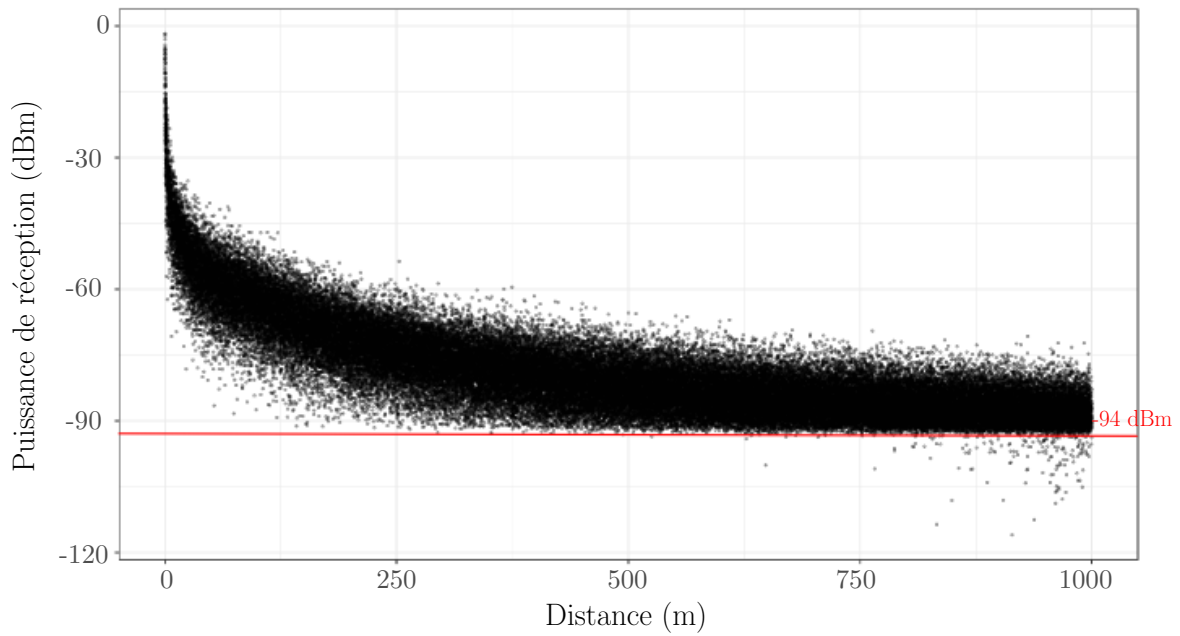
Cette étude, nous conduit donc à regarder le PDR et le E2E delay. Pour cela, nous avons défini un intervalle [A;B] correspondant aux cent derniers mètres à parcourir. Le choix de cet intervalle est motivé par le fait que les véhicules urbains évoluent sur des distances très

proches (inférieure à 50 m), nous avons donc fait le choix de prendre une distance plus grande pour nous assurer que même dans une situation imprévue la communication est stable.

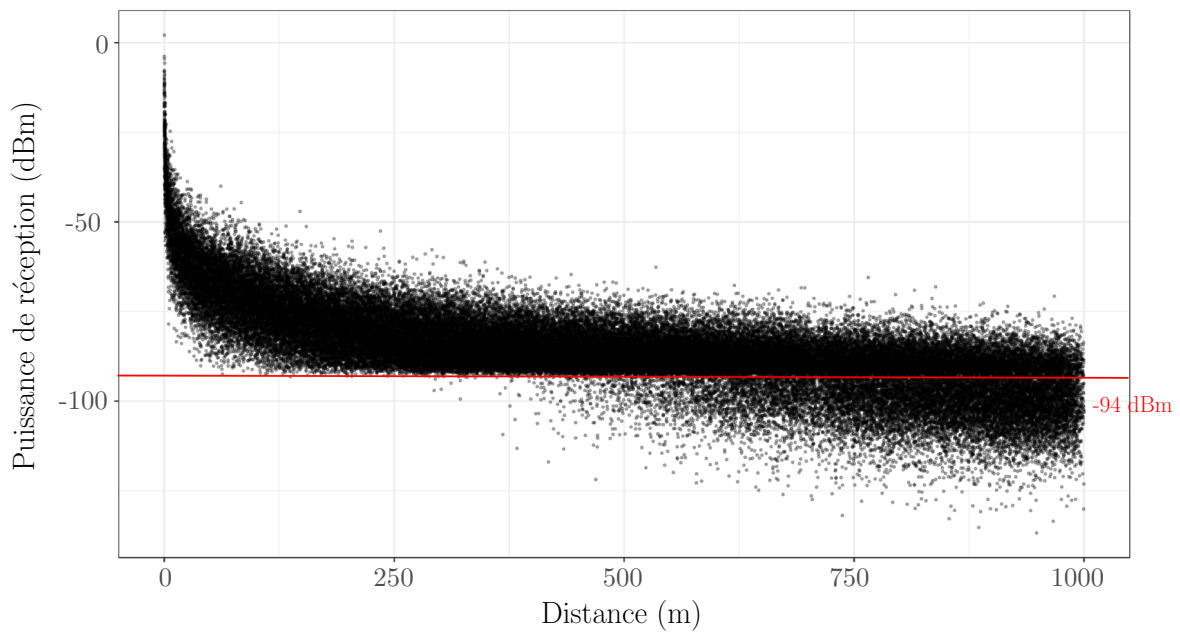
La Fig. 3.8 montre le **PDR** sur l'ensemble des 20 simulations pour les cas LOS et OLOS. Nous pouvons noter que sur les 20 simulations sur le suivi de 1000 m en LOS, le **PDR** est en moyenne de 99 % et de 88 % en OLOS. Lorsque le véhicule est compris dans l'intervalle [A;B], le **PDR** est de 100 % pour le cas LOS et OLOS, c'est à dire que 100 % des paquets émis ont été reçus.

La Fig. 3.9 montre que pour les 20 simulations le **E2E delay** est de 0 s pour le cas LOS ou proche de 0 s (au maximum de $\approx 4,5 \mu\text{s}$) pour le cas OLOS ce qui convient parfaitement à notre cas d'usage. D'autre part, le délai est imperceptible pour le conducteur humain.

En refaisant des simulations, nous avons retrouvé des résultats similaires au précédent. En effet, dans ce cas seul l'effet doppler impacte la communication. Les vitesses utilisées dans nos tests (milieu urbain) restant faibles au regard de ces effets, l'impact de cet effet reste très limité et le **PDR** ainsi que le **E2E delay** sont respectivement à 100 % et quasi nul dans la zone qui nous intéresse (inférieure à 100 m).



(a) Pour le cas LOS



(b) Pour le cas OLOS

FIGURE 3.7 – Puissance de réception en fonction de la distance pour le suivi

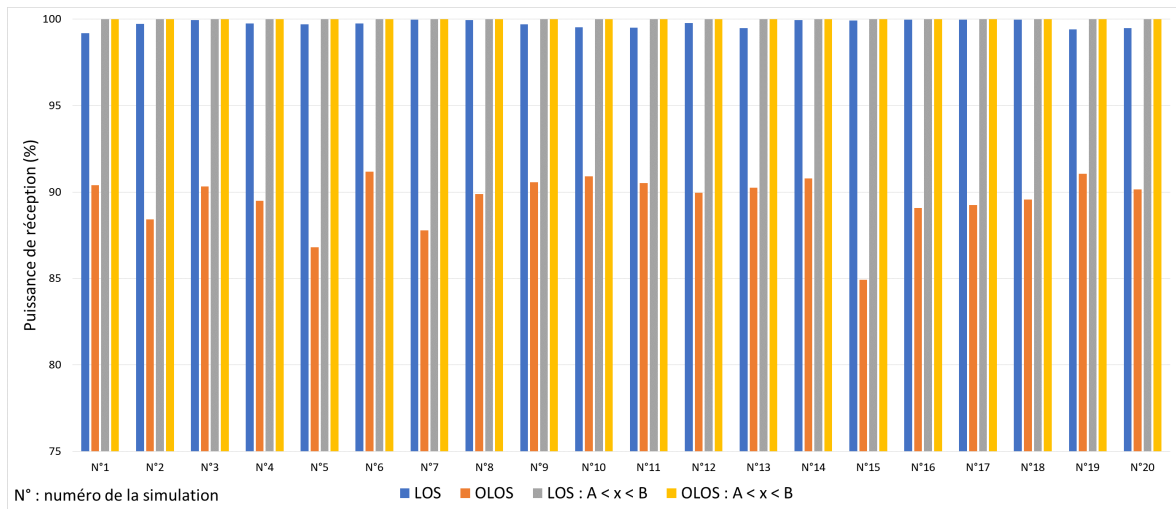


FIGURE 3.8 – Puissance de réception pour les 20 simulations en situation de suivi

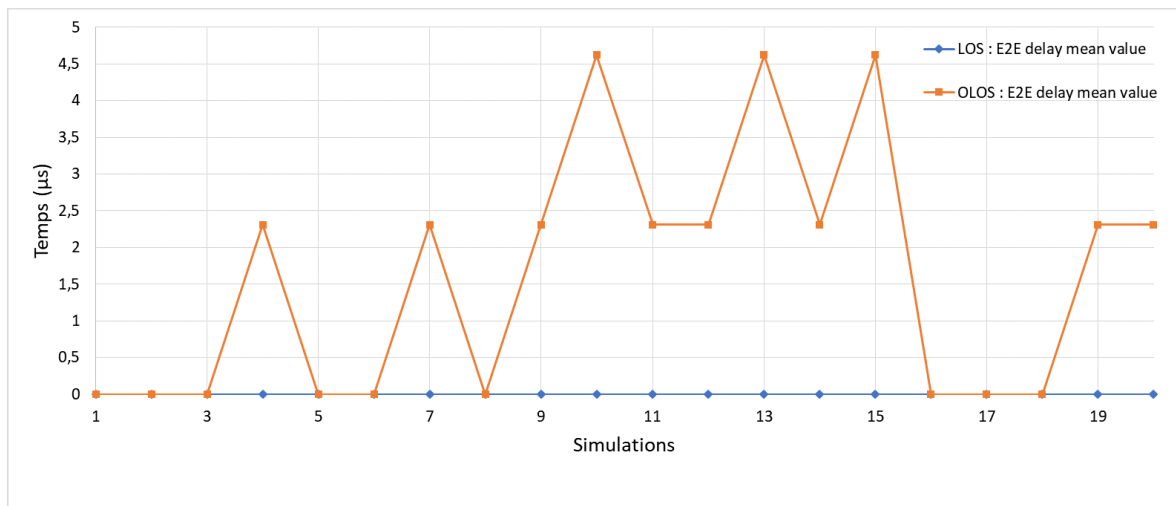


FIGURE 3.9 – Temps de délivrance du paquet en situation de suivi

3.4 Conclusion

Dans cette partie, à l'aide d'un exemple nous avons introduit le traitement analytique d'un **réseau Bayésien (RB)**, ou *Bayesian Network* sur l'exemple de la pelouse de M. Holmes. Puis nous avons décrit la toolbox BNT et la librairie Netica utilisées. Enfin nous avons donné un aperçu de la programmation pour chaque toolbox/librairie à l'aide d'un exemple et nous avons vérifié que les résultats calculés correspondaient aux résultats théoriques. Le **RB** utilisé sous Netica a été décrit ainsi que ses réductions et restrictions principalement dues à la saturation de la mémoire et des ressources systèmes utilisées par l'API.

Notre modèle de risque développé sous la toolbox BNT a permis la publication de deux communications [62] et [63]. Dans le premier communiqué [62], nous abordons un modèle de risque conservatif avec des hypothèses fortes qui est qu'à chaque instant le véhicule Front effectue un freinage d'urgence (« pile »). Nous avons ensuite amélioré notre modèle [63] ce qui nous a permis d'être plus précis et plus exacte sur l'évaluation du risque de collision par télescopage. Cette amélioration est due à la prise en compte de la communication de l'accélération et du risque du véhicule Front donc à la possibilité d'évaluer l'intention de freinage du véhicule Front, c'est-à-dire fin de l'hypothèse qu'à chaque instant le véhicule Front pile.

Dans un deuxième temps, nous avons amélioré notre **RB** en y ajoutant l'aspect **communication véhiculaire (VANET)**, ou *Vehicular Adhoc Network* ce qui nous a contraint à introduire d'autres ressources comme l'emploi d'un environnement d'évolution des véhicules réalistes (OpenStreetMap et SUMO), des phénomènes de propagations réalistes avec PhySim-Wifi et introduire des protocoles de routage selon les cas d'études avec NS3. S'ensuit une étude de la communication pour connaître les limites en termes de portée, de temps de réponse et de puissance de réception pour nos cas d'études.

Dans la suite de notre développement, nous allons exposer différents scénarios de collisions, d'évitement de collisions, de prévention du conducteur par un système d'alerte anti-collision ainsi que leurs résultats.

Chapitre 4

Les essais sur piste et les simulations

Sommaire

4.1	Introduction	80
4.2	Présentation des véhicules d'essais et de la piste	81
4.2.1	Les véhicules d'essais	81
4.2.2	La piste	85
4.3	Essais sur piste	87
4.3.1	Conditions initiales du réseau Bayésien	87
4.3.2	Protocole expérimental	88
4.3.3	Vérification du réseau Bayésien pour le télescope	88
4.3.3.1	Essai avec collision	88
4.3.3.2	Essai sans collision	92
4.3.4	Identification des freinages	95
4.4	Simulation sous NS3	97
4.4.1	Protocole des simulations	99
4.4.1.1	Stratégie de communication	99
4.4.1.2	Stratégie de freinage humain	99
4.4.2	Simulation sans affichage du risque	100
4.4.3	Simulations avec affichage du risque	101
4.4.3.1	Évolution des risques de Front et Ego en fonction des zones de risque, sans freinage des véhicules	101
4.4.3.2	Évolution des risques en cas de freinage d'Obstacle dans une zone verte	104
4.4.3.2.1	Cas d'un freinage adapté	104
4.4.3.2.2	Cas d'un freinage non adapté	107
4.4.3.3	Évolution des risques en cas de freinage d'Obstacle dans une zone orange	110
4.5	Conclusion	113

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons tester notre algorithme pour différents scénarios en simulation et sur piste. En premier lieu, nous présentons les véhicules d'essais utilisés (matériels et logiciels) et la piste.

Dans un second temps, nous testons notre [réseau Bayésien \(RB\)](#), ou *Bayesian Network* avec des données réelles issues de campagne d'essais sur piste. Ces essais impliquent des simulations d'accidents à plusieurs vitesses et inter-distances. Ainsi ces tests nous permettront de valider nos résultats fournis par notre simulateur qui plus est de valider notre modèle de risque. Pour cela, nous comparerons l'évaluation du risque à la situation réelle.

Ensuite, par l'intermédiaire des essais sur piste nous identifions différents types de freinage tels un freinage en douceur, fort et d'urgence. A la suite de cette étude, ces freinages sont implémentés dans le simulateur réseau NS3 pour que chaque véhicule puisse avoir un freinage réaliste lors de nos simulations. Le [RB](#) est testé dans le cas d'un système d'alerte anti-collision, c'est pourquoi nos simulations comporteront plusieurs situations mettant en jeu trois véhicules dont le but est d'éviter une collision. Pour cela, les véhicules auront accès à la [communication véhiculaire \(VANET\)](#), ou *Vehicular Adhoc Network* et auront une stratégie d'évitement de collision.

En dernier lieu, nous étudierons en simulation la conduite d'un conducteur lors d'un évitement de collision par freinage et nous comparerons nos résultats avec un automobiliste possédant un système d'alerte anti-collision utilisant notre [RB](#). Le but étant de montrer l'utilité de notre modèle de risque combiné à la communication véhiculaire.

4.2 Présentation des véhicules d'essais et de la piste

4.2.1 Les véhicules d'essais

Au sein de notre laboratoire, nous avons à disposition deux véhicules d'essais : un Renault Scénic et un Renault Twizy respectivement baptisés ARTEMIPS et POCHETTE. Les deux véhicules sont respectivement équipés d'une centrale inertielle modèle Oxford RT-3002 et du modèle Oxford RT-Split (comme le montre la Fig. 4.1) qui permet la mesure de la vitesse, de l'accélération et de la position. Les deux véhicules sont équipés d'un ordinateur dont le but est de recueillir les informations provenant des différents capteurs, de piloter les actionneurs du véhicule tels que la direction et la pédale de frein. Ils sont également équipés d'une antenne WiFi pour permettre la communication-véhiculaire. Chaque ordinateur recueille les données des différents capteurs embarqués grâce au logiciel RT-Maps¹.

Sur la Fig. 4.2a, nous pouvons voir l'antenne WiFi, les LIDAR et sur le toit un coffre permettant de ranger un fauteuil roulant du fait de l'étude pour subvenir aux besoins des personnes à mobilité réduite. Nous pouvons voir sur la Fig. 4.2b qu'à l'emplacement du coffre se trouve l'ordinateur permettant de récupérer les données des capteurs et de commander les différents actionneurs.

Sur la Fig. 4.3a, nous pouvons voir sur le siège arrière et sur le toit les centrales inertielles Xsens² (petit boîtier orange) et sur le siège arrière à côté de la centrale Xsens se trouve la RT-Split (une centrale inertielle beaucoup plus précise). A l'avant du véhicule, l'installation métallique permet la détection d'obstacle grâce aux différents capteurs radars. Nous pouvons voir sur la Fig. 4.2b qu'à l'arrière du véhicule se trouve le coffre où nous avons déposé l'ordinateur permettant aux véhicules de récupérer les données et commander les actionneurs. Sur le toit, on peut également y voir les antennes WiFi utilisées.

1. <https://intempora.com/products/rmaps.html>

2. <https://www.cadden.fr/familles-de-produit/centrales-inertielles/centrales-inertielles-miniatures>

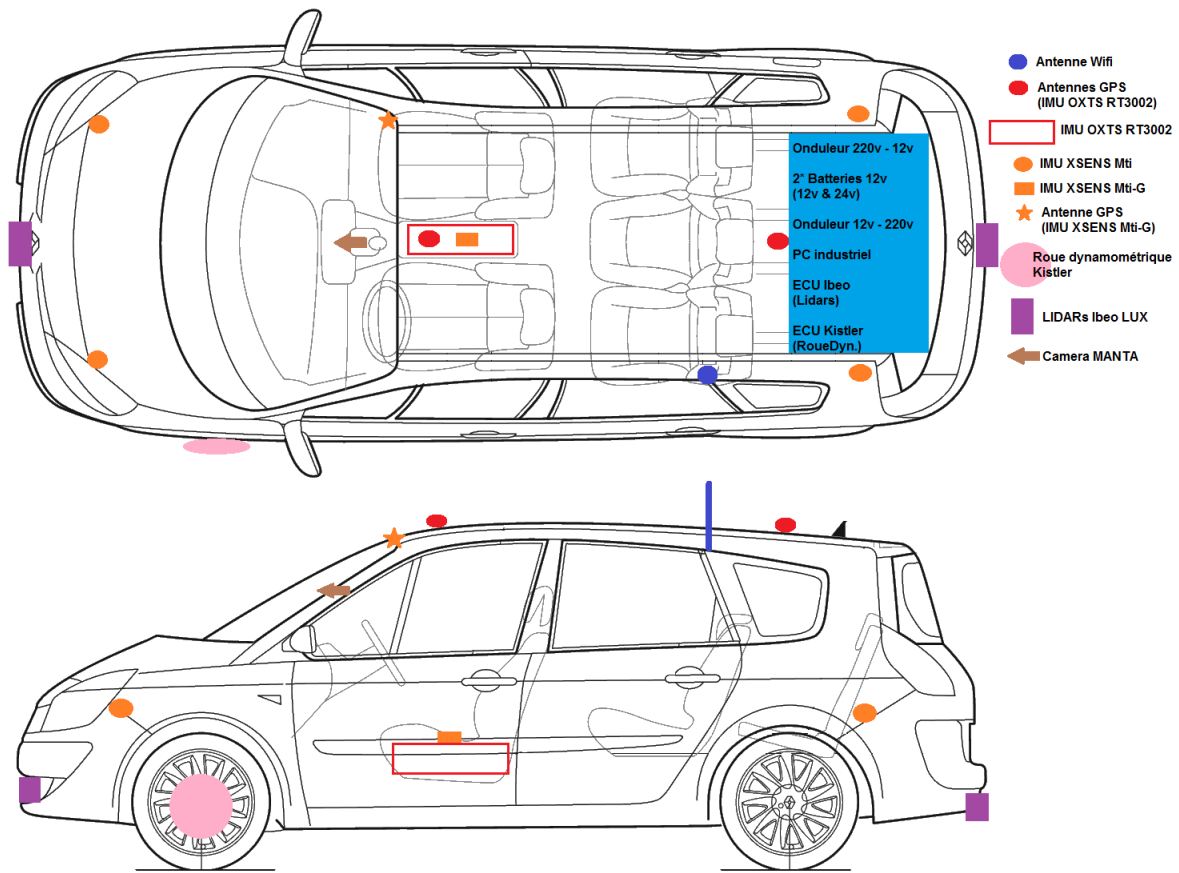


FIGURE 4.1 – Schéma du matériel sur le véhicule ARTEMIPS



(a) Vue de profil



(b) Vue de l'arrière

FIGURE 4.2 – Photos d'ARTEMIPS



(a) Vue de profil



(b) Vue de l'arrière

FIGURE 4.3 – Photos de POCHETTE

4.2.2 La piste

Nous avons fait des essais sur la piste de la Cité de l'Automobile³ qui est le plus grand musée automobile du monde. Cette piste est composée d'un anneau de forme elliptique qui a pour périmètre environ 344 m. Une deuxième piste sous la forme d'un huit est reliée à l'anneau extérieur voir Fig. 4.4.

Dans le cadre de nos essais, nous souhaitons tester l'algorithme pour une situation de télescopage avec et sans collision. L'étude du télescopage exige que les véhicules se suivent l'un derrière l'autre. Par conséquent, l'étude de cas se fera sur la partie droite de la piste. Cette partie droite correspond au trait noir de la Fig. 4.4, elle mesure environ 60 m. Comme nous souhaitons une collision entre nos deux véhicules, la Fig. 4.5 présente la situation étudiée. Afin de garantir une sécurité à nos pilotes (c'est-à-dire éviter la collision entre nos véhicules), nous les avons décalé latéralement de quelques mètres comme nous pouvons le voir sur la Fig. 4.6. Ceci est possible car la piste d'essai est assez large pour accueillir deux véhicules sur la partie droite et la largeur est d'environ 8 m représentée par le trait rouge de la Fig. 4.4. Les conducteurs sont aidés dans cette tâche grâce à la mise en place de plots pour délimiter les deux couloirs voir la Fig. 4.7. Quelle qu'en soit la situation, le conducteur Ego a pour consigne d'éviter l'accident.



FIGURE 4.4 – Piste de la Cité de l'Automobile

3. nous remercions l'équipe de la Cité de l'Automobile pour l'accueil et le prêt de la piste, <http://www.citedelautomobile.com/fr>

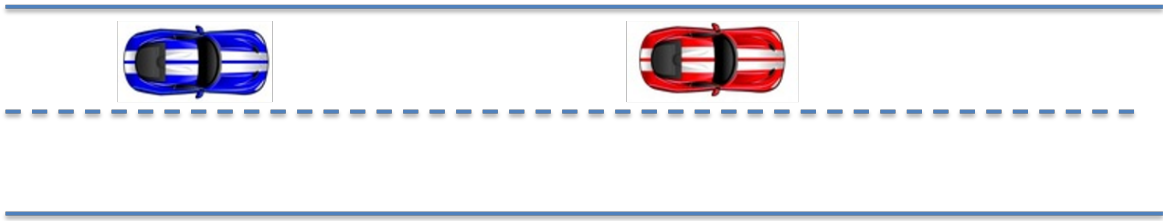


FIGURE 4.5 – Situation de télescopage étudiée

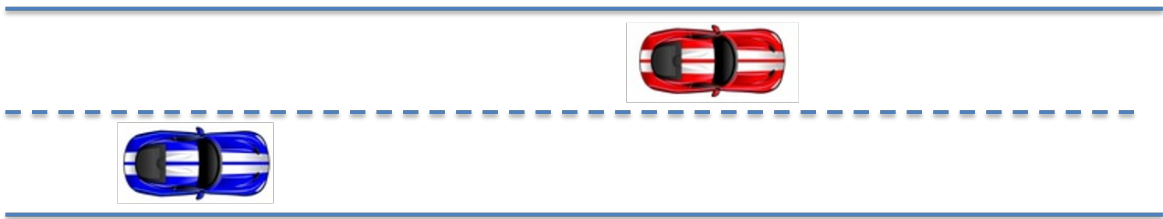


FIGURE 4.6 – Situation de télescopage réelle



FIGURE 4.7 – Photo des véhicules et de la mise en place des plots

4.3 Essais sur piste

4.3.1 Conditions initiales du réseau Bayésien

En vue d'évaluer le risque de télescopage, il faut pouvoir observer les données conducteur et de la route. Pour la suite nous utilisons le **gras** pour donner les états des nœuds discrets.

Lors de nos essais, la météo était ensoleillée donc **bonne**, la route sèche, les véhicules ne présentaient aucune usure notable d'où un état **bon**.

Concernant les pilotes, ils étaient reposés et concentrés (plus tard nous verrons leur temps de réaction) cela signifie que leur biorythme était **bon**. Nous faisons des essais sur de courte période donc le temps de trajet est **bon**, il n'y a pas de facteur extérieur contraignant car la température intérieure et extérieure est **bonne**. Les essais se sont déroulés le matin avec une température agréable et bonne. Seul le temps paupière n'a pu être mesuré nous avons donc imposé un temps de paupières **bon** puisqu'il n'y avait aucun signe de fatigue particulière.

Vis-à-vis de leur concentration, les conducteurs évoluaient sans distraction sonore (comme la radio ou une discussion). Ils roulaient à des vitesses que l'on peut retrouver en situation urbaine en raison de la configuration de la piste et du contexte, la route est considérée comme **non monotone**. Par contre, nous n'avons pas pu suivre le regard du conducteur Ego. Nous avons donc imposé un regard **bon** ce qui se justifie a posteriori au vu des temps de réaction relevés.

Dans la partie de la piste qui nous intéresse, nous avons imposé un risque **rouge** transmis par le véhicule Front. Afin d'indiquer qu'il y a une raison que Front va effectuer un freinage d'urgence. Le contexte est **mauvais** ce qui rend le risque **rouge** plus probable. Dans le Tableau 4.1 vous retrouvez les nœuds et leur état.

Nœud	État
Temps de trajet	bon
Biorythme	bon
Facteurs extérieurs	bon
Temps paupières	bon
Type de route	urbain
Intégrale de l'angle au volant	bon
Intégrale de l'accélération	bon
Évolution de l'angle au volant	bon
Accélération	bon
Conversation	pas de conversation
Radio	pas de radio
Téléphone	pas de communication
Regard	bon
Température	bon
Précipitation	ensoleillée
Météo _{front}	ensoleillée
État du véhicule	bon
Risque _{front}	rouge
Contexte	mauvais

TABLEAU 4.1 – Etat des nœuds pour les essais sur piste

4.3.2 Protocole expérimental

Dans cette section, nous allons vérifier que notre RB évalue un risque et dans le cas d'une collision est capable de la prédire. Comme le montre la Fig. 4.8, la mesure de la position des véhicules montre que les deux véhicules roulent autour de l'anneau et sont espacés de deux mètres en latéral. Les conducteurs ont pour consigne de rouler autour de l'anneau à une vitesse proche des 40 km/h. Puis le véhicule de tête, ici POCHETTE, a pour consigne d'effectuer un freinage d'urgence sur la portion droite du circuit. Etant donné qu'il n'y a pas de risque de collision réelle vu la piste et les dispositions prises (une séparation des couloirs par des plots et largeur des couloirs) aucune manœuvre d'évitement n'est à prévoir. De ce fait le véhicule suiveur, ici ARTEMIPS, a pour consigne d'éviter la collision simulée avec POCHETTE en freinant. Il est à noter que le conducteur Ego (se trouvant dans ARTEMIPS) ne connaît pas l'instant de freinage de POCHETTE. Cependant, le conducteur Ego sait à l'avance que le véhicule Front va freiner sur la portion de ligne droite et cela va améliorer le temps de réaction du conducteur Ego.

Pour rappel, nos véhicules d'essais communiquent en WiFi pour s'échanger des données telles l'inter-distance, les vitesses, etc. Cependant nos essais ne sont pas fait à la norme WiFi 802.11p utilisée par les VANET mais à la norme WiFi 802.11ac (couramment utilisée par nos ordinateurs au quotidien). Les quelques différences portent sur la bande passante et la bande de fréquence. Plus précisément, la bande passante est plus faible ce qui a pour conséquence que le débit maximum peut être plus faible selon le nombre d'utilisateur présent. En outre, nous utilisons une norme WiFi commune aux ordinateurs, smartphones, objets du quotidien où la bande de fréquence a une tendance plus forte à être saturée et perturbée. En clair, nous nous plaçons dans des conditions défavorables par rapport aux VANET. Malgré cela, la communication n'a pas été impactée (voir le Chapitre 3) et toutes les données ont pu être transmises comme nous pouvons le voir par la suite.

4.3.3 Vérification du réseau Bayésien pour le télescopage

Nous présentons deux essais, l'un où il y aura collision entre les véhicules et un autre sans collision pour montrer que l'algorithme réagit correctement. Afin d'être dans la situation de télescopage, les figures des essais présentées ne concerneront que la partie droite de l'anneau. De ce fait les figures débutent après 30 s (le temps nécessaire pour atteindre la portion droite).

4.3.3.1 Essai avec collision

Les deux véhicules roulent à des vitesses proches que nous pouvons voir sur la Fig. 4.9a. Sur la Fig. 4.9b, nous notons que le véhicule Front débute son freinage à $T \approx 33,8$ s et à $T \approx 34,5$ s c'est le véhicule Ego qui freine afin d'éviter le véhicule Front. En comparant ces deux temps, nous obtenons le temps de réaction du conducteur Ego, soit de $\approx 0,7$ s ce qui est très proche d'un temps de réaction d'un pilote professionnel. Ceci s'explique par le fait que le conducteur Ego s'attend au freinage du véhicule Front donc le temps de réaction d'Ego est plus faible que s'il ne s'y attendait pas. Cela prouve bien que nous avons raison de supposer que son temps de réaction est bon lors des conditions initiales. Notre conducteur est donc attentif à son environnement et au comportement du véhicule Front.

Sur la Fig. 4.10a dès 30 s, le RB indique un risque rouge de 100 % et ce jusqu'à la collision. Ce qui signifie que nous sommes certain que le véhicule Ego va entrer en collision

avec Front sous condition que Front freine ce qui est bien le cas ici. Effectivement, comme le montre la Fig. 4.10b, les deux véhicules entrent en collision à $T \approx 35,8$ s malgré le très bon temps de réaction du conducteur Ego. Ce qui prouve que notre RB combiné au VANET, nous permet de prédire une collision.

Le conducteur Ego n'a pas pu éviter l'accident car il était trop proche du véhicule Front, sur la Fig. 4.10b nous notons que l'inter-distance est inférieure (en moyenne de 2,5 fois) à la distance légale imposée par le code de la route. Le RB montre cela par les valeurs de risque vert et orange nulles comme le montre la Fig. 4.10a.

Nous pouvons donc conclure que notre RB a bien prédit la collision en situation de télescopage et pour cet essai.

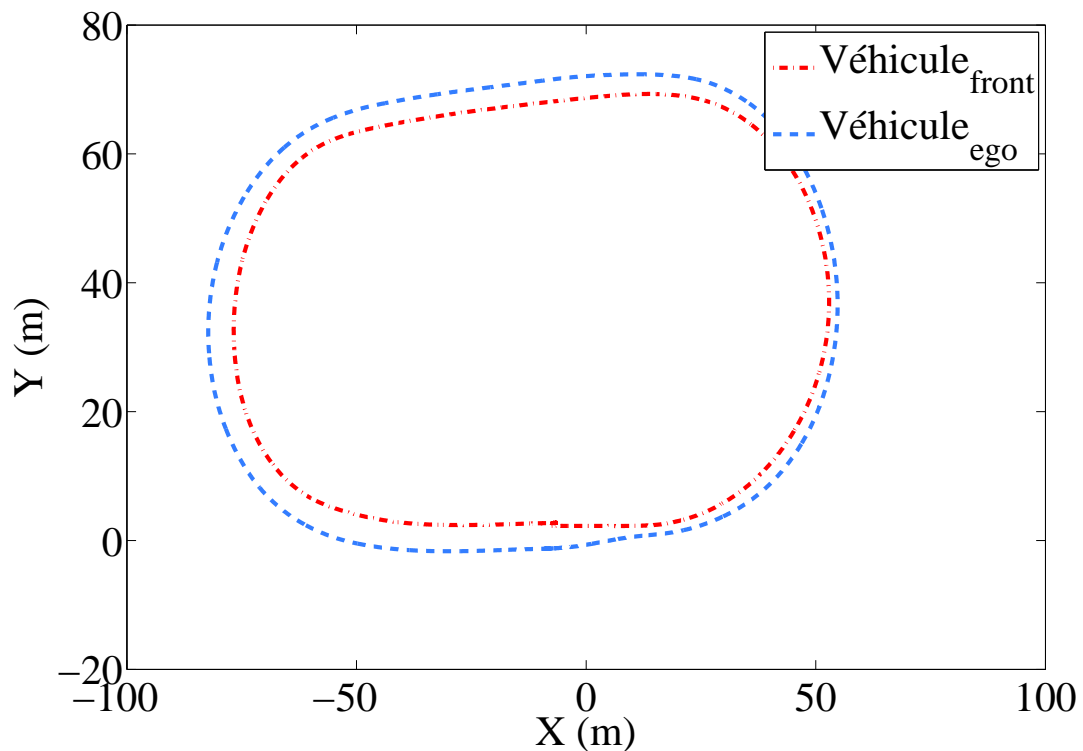
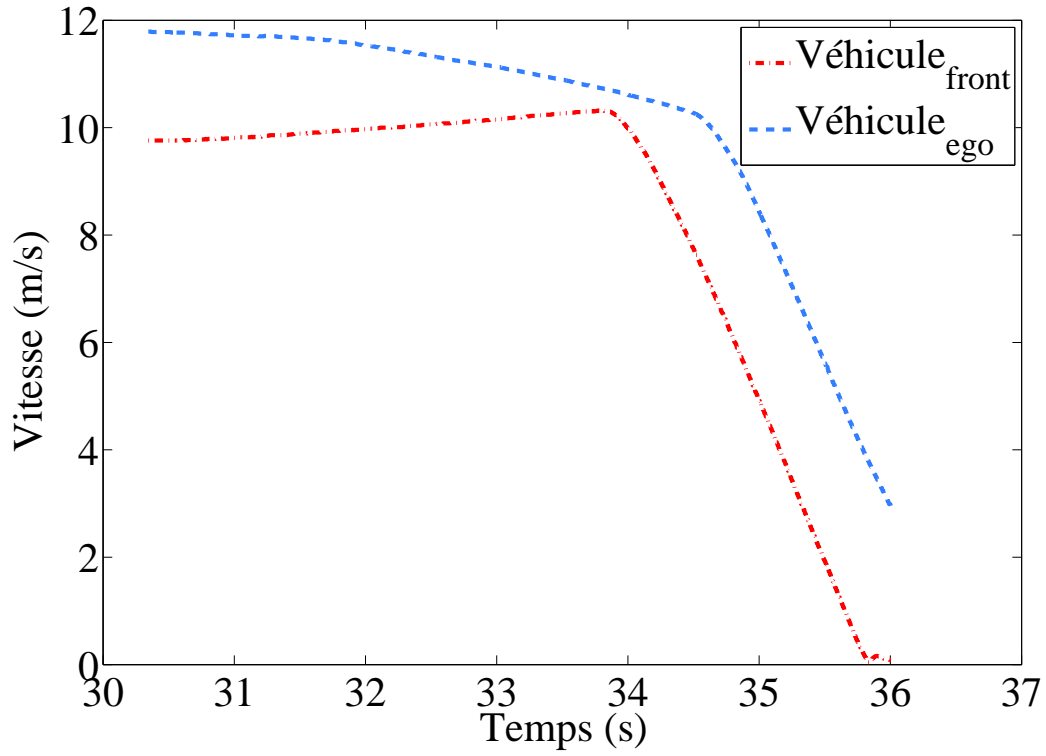
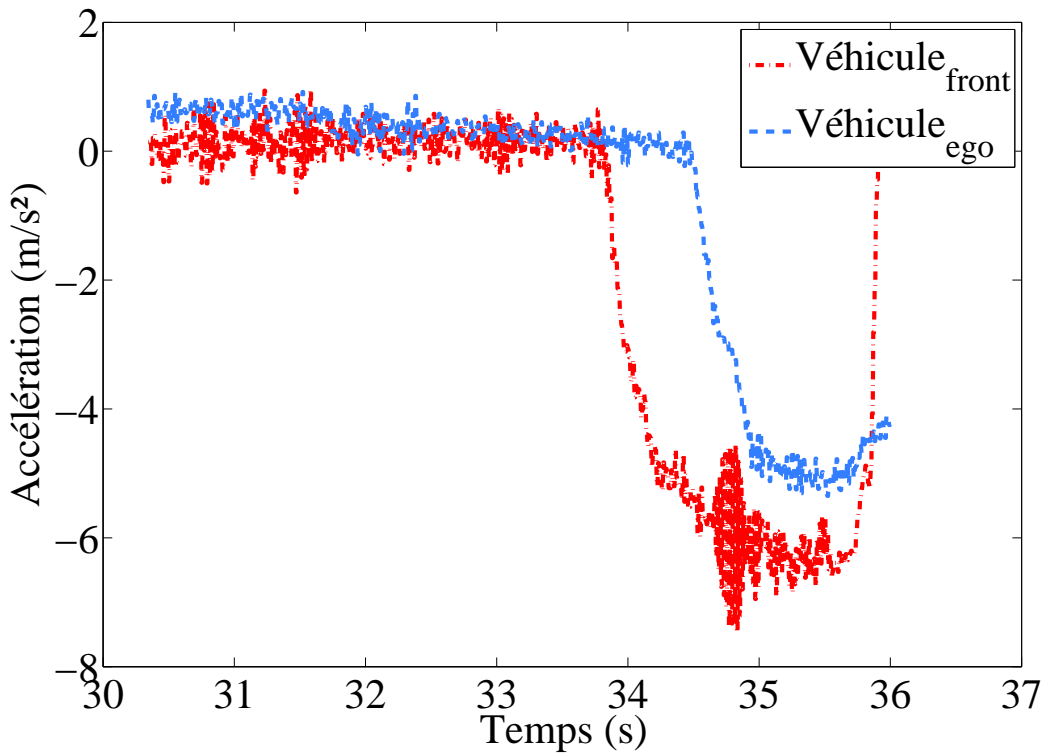


FIGURE 4.8 – Parcours des deux véhicules

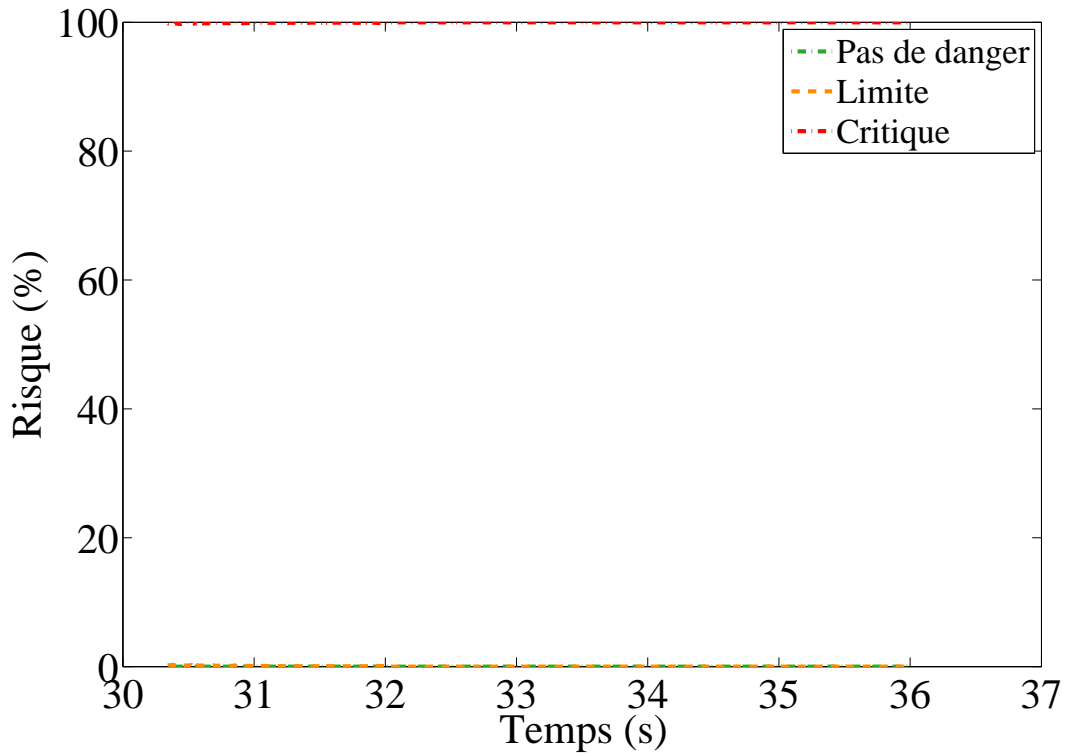


(a) Evolution des vitesses

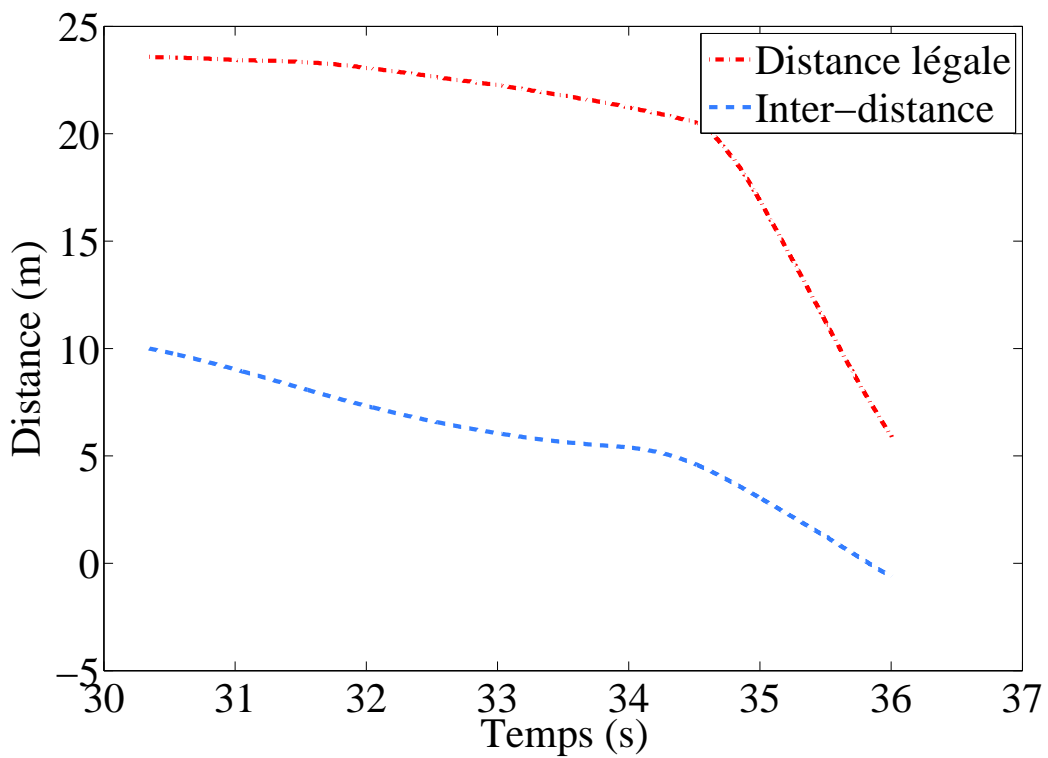


(b) Evolution des accélérations

FIGURE 4.9 – Dynamique des véhicules : essai avec collision



(a) Evolution des probabilités de télescopage du véhicule Ego



(b) Evolution de l'inter-distance

FIGURE 4.10 – Résultat de l'essai avec collision pour la détection de collision

4.3.3.2 Essai sans collision

Les deux véhicules roulent à des vitesses proches des 40 km/h que nous pouvons voir sur la Fig. 4.11a. Sur la Fig. 4.11b, nous notons que le véhicule Front débute son freinage à $T \approx 33,9$ s et à $T \approx 34,6$ s c'est le véhicule Ego qui freine afin d'éviter le véhicule Front. En comparant ces deux temps, nous obtenons le temps de réaction du conducteur Ego, celui-ci est à nouveau proche de 0,7 s ce qui est voisin d'un temps de réaction d'un pilote professionnel.

Nous pouvons remarquer que les deux véhicules freinent plus ou moins de la même manière, ils atteignent une valeur maximale de décélération de 6 m/s^2 . Également nous pouvons noter que l'accélération présente des oscillations amorties pour les deux véhicules, à $T \approx 36$ s pour Front et $T \approx 37$ s pour Ego. Ces oscillations amorties apparaissent une fois que les véhicules sont à l'arrêt et nous pouvons observer que ces oscillations sont de plus grandes amplitudes pour le véhicule Ego (ici ARTEMIPS). Ces oscillations sont dus aux oscillations de la caisse combinée aux suspensions des véhicules. Le fait qu'ARTEMIPS soit plus lourd fait que les amplitudes d'accélération sont plus grandes au vu des déplacements de masse.

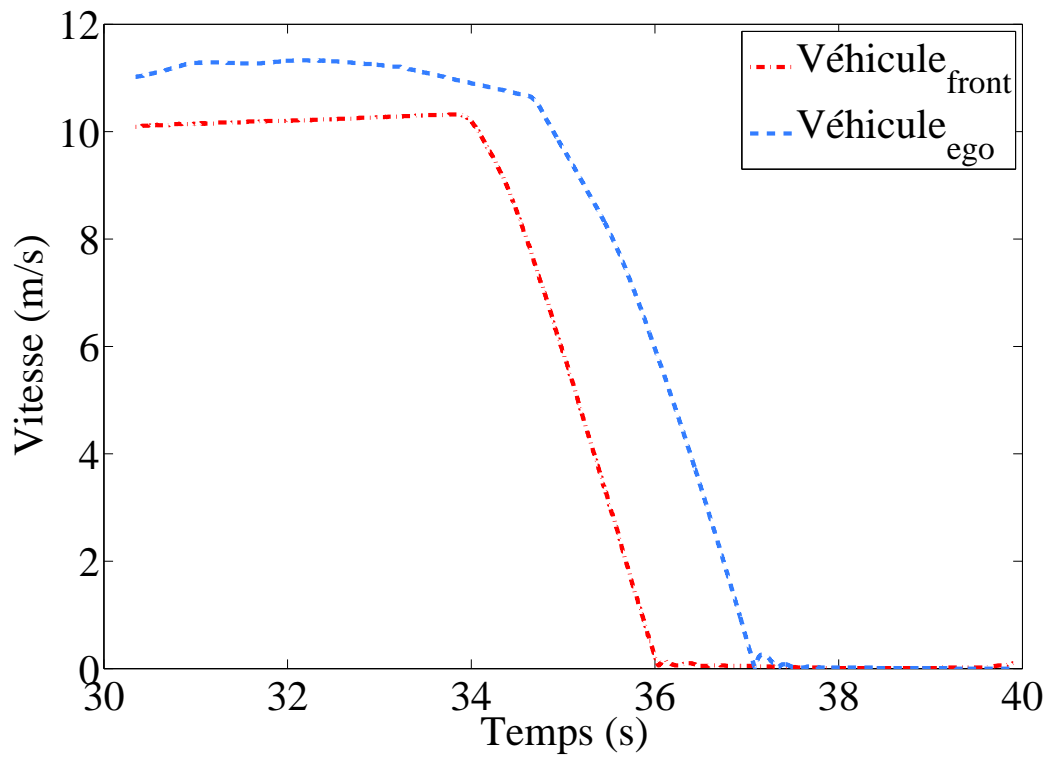
Sur la Fig. 4.12a, entre $T = 30$ s et $T \approx 32,3$ s le RB indique une probabilité de risque orange de 100 % puis il y a une baisse de la probabilité de risque orange. A l'opposé, à partir de $T \approx 32,3$ s (lorsque la courbe orange diminue) le risque rouge augmente passant de ≈ 0 % à 60 % entre $T \approx 32,3$ s et $T \approx 34,6$ s. Ceci s'explique par le fait que Front décélère à partir de $T \approx 33,9$ s et que le conducteur Ego n'a pas encore réagi. Mais dès lors qu'Ego freine à $T \approx 34,6$ s, le risque orange remonte pour atteindre 100 %, cela signifie que le véhicule Ego a une chance d'éviter l'accident de justesse. Durant ce même temps, le risque rouge chute pour atteindre 0 %. Nous pouvons donc en déduire que le RB prévoit qu'il n'y aura pas de collision dans le cas où Ego maintient son freinage d'urgence.

Au-delà de $T = 36$ s, le risque est 100 % vert ce qui signifie que la probabilité de collision est encore plus faible car la distance de sécurité est respectée. Donc le RB prédit qu'il n'y aura toujours pas de collision après $T = 36$ s. Ces informations peuvent être vérifiées sur la Fig. 4.12b, les deux véhicules se rapprochent de plus en plus sans jamais entrer en collision.

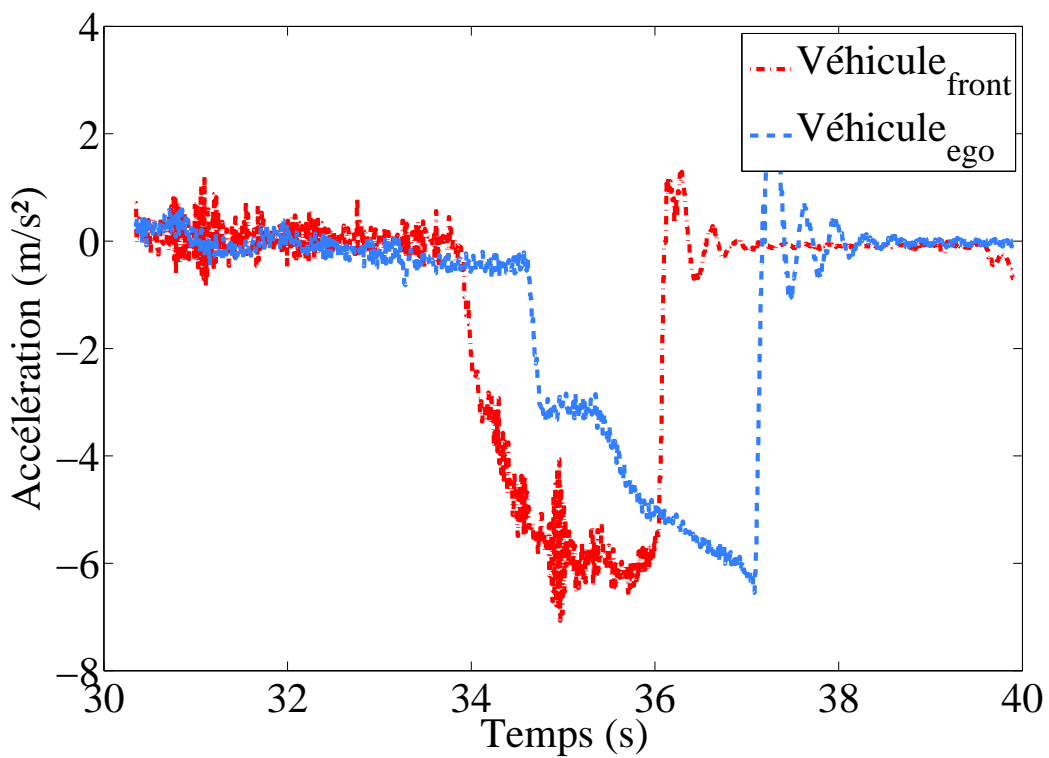
En résumé, avant $T = 36$ s, l'inter-distance n'est pas suffisante pour être dans le respect du code de la route d'où un risque orange qui signale que le conducteur peut éviter l'accident s'il est attentif et réagit correctement. Par contre le risque rouge signale que le conducteur ne réagit pas correctement à la situation. Et au-delà de $T = 36$ s, l'inter-distance est supérieure à la distance de sécurité d'où un risque vert de 100 %.

L'accident est évité car le conducteur Ego est attentif. Mais la raison principale de l'évitement de l'accident est que la distance initiale entre les deux véhicules est plus grande (environ 20 m, proche de la distance de sécurité) par rapport au premier essai où la distance initiale n'était que de 10 m (très en deçà de la distance de sécurité). Le passage du risque orange 100 % au risque vert 100 % est brutale car nous sommes proche de la limite et que le passage d'un état à l'autre est discontinu.

Comme nous avons pu le voir sur les figures précédentes, le RB a correctement prédit ce qui allait se passer. Nous pouvons donc conclure que dans le cadre de ces essais, notre RB peut prédire les risques de télescopage tout en étant précis.

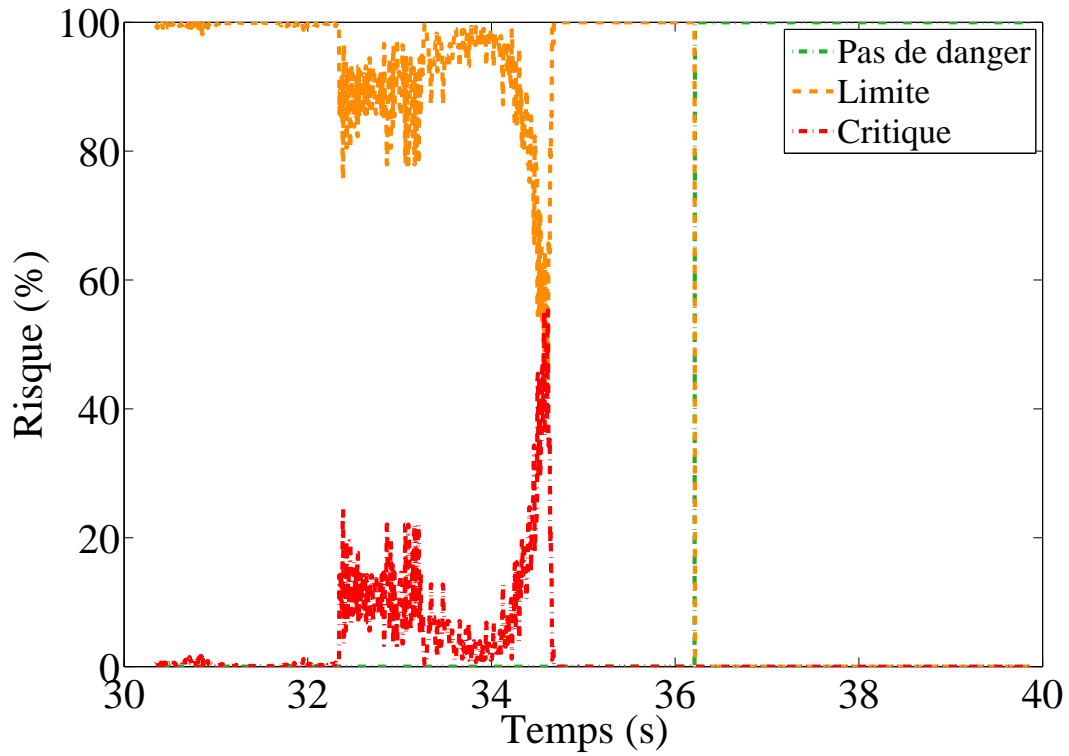


(a) Evolution des vitesses

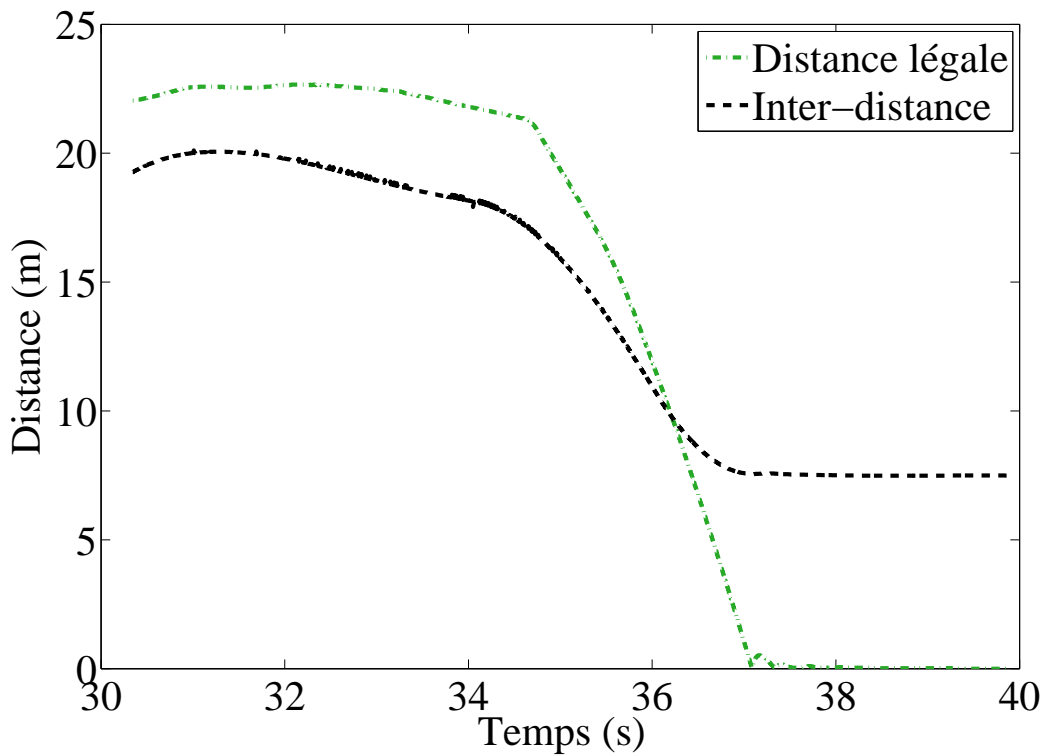


(b) Evolution des accélérations

FIGURE 4.11 – Dynamique des véhicules : essai sans collision



(a) Evolution des probabilités de télescopage du véhicule Ego



(b) Evolution de l'inter-distance

FIGURE 4.12 – Résultat de l'essai sans collision pour la détection de collision

4.3.4 Identification des freinages

Le simulateur NS3 permet la simulation de réseaux informatiques et notamment des VANET. Dans le but d'améliorer nos simulations, nous avons besoin de profils de freinage. D'où lors de nos campagnes d'essais, nous avons fait des tests de freinage en vue d'introduire des freinages réalistes dans notre simulateur NS3. Pour cela, nous avons défini trois types de freinage qui sont un freinage doux, fort et d'urgence.

Sur la Fig. 4.13, les résultats de nos essais pour le freinage fort ainsi que la courbe d'ajustement que nous avons obtenu par une méthode de régression. Pour les freinages doux et d'urgence nous vous présentons directement les courbes déduites sur la Fig. 4.14. Sur cette dernière, nous pouvons noter que pour le freinage doux la valeur maximale de décélération se situe autour de 2 m/s^2 , pour le freinage fort cette valeur se situe autour de -7 m/s^2 et pour le freinage d'urgence autour de -10 m/s^2 . Pareillement, nous pouvons remarquer que les freinages doux et fort mettent environ 2 s pour atteindre leur valeur maximale respective alors que pour le freinage d'urgence il suffit de 0,5 s. Ces trois courbes d'ajustement sont décrites dans Eq. 4.1 (normalisé sur les unités) respectivement pour le freinage doux, fort et d'urgence. Nous pouvons également remarquer que le freinage d'urgence correspond à l'étude fait par Kudarauskas [38].

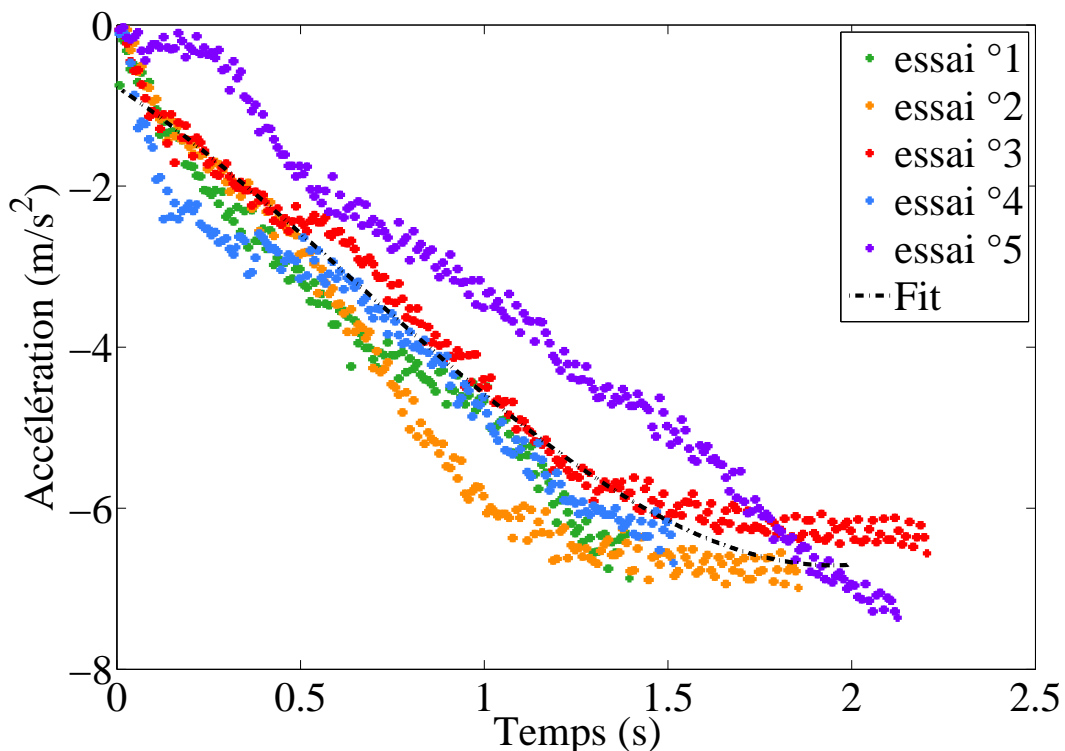


FIGURE 4.13 – Courbes de freinage fort et d'ajustement

$$\begin{aligned}
 \text{Doux} &= & 0,0003 \cdot x^2 & & -0,0858 \cdot x - 1,0459 \\
 \text{Fort} &= & 0,0008 \cdot x^3 - 0,0155 \cdot x^2 & & -0,3067 \cdot x - 0,7666 \\
 \text{Urgence} &= & 0,3285 \cdot x^2 & & -3,5624 \cdot x - 0,2187
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

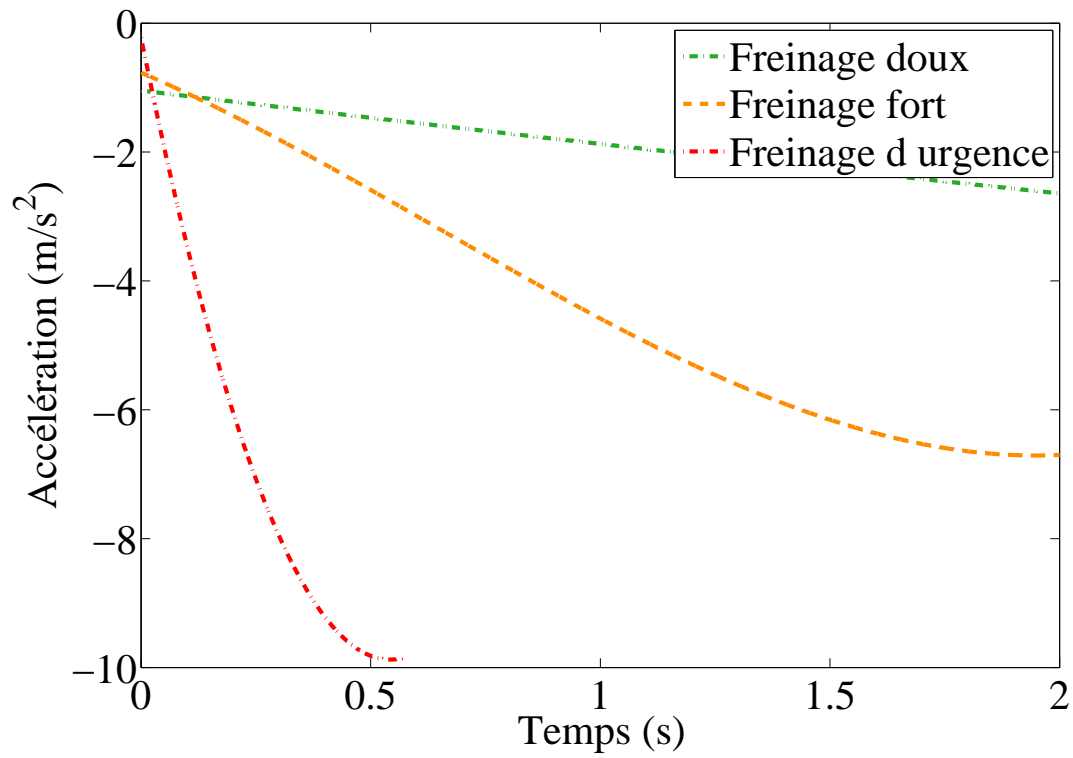


FIGURE 4.14 – Courbes d’ajustement pour les trois types de freinage

4.4 Simulation sous NS3

Dans cette thèse, centrée sur l'évaluation du risque de télescopage au travers d'un **RB** combiné au **VANET**, nous avons montré dans la section précédente au travers de nos essais le fonctionnement de notre **RB** et sa validation. Néanmoins, nous n'avons que deux véhicules donc le potentiel de la communication véhiculaire n'a pas pu être testé complètement.

Les **VANET** permet d'élargir l'horizon de surveillance, de voir au-delà du véhicule Front. Grâce à un tel système, nous pouvons détecter et anticiper un risque plus lointain par rapport à une situation sans **VANET**. Pour illustrer cela, nous avons besoin de trois véhicules afin de montrer la répercussion de la communication véhiculaire et les éventuels avantages soit en évitant la collision soit en limitant le choc lors de l'impact. Pour montrer cela, nous allons donc faire des essais en simulation sur NS3.

Ces simulations vont nous permettre de montrer l'utilité que peut apporter l'évaluation du risque automobile, ici l'évaluation du risque de télescopage. Pour cela, nous allons l'illustrer avec des scénarios sans et avec système d'affichage du risque pour des situations quotidiennes.

Selon les études de l'ONISR⁴ [52] et de Nouvelière [43] : dans un trafic non congestionné $\approx 30\%$ des automobilistes roulent en-dessous des deux secondes de temps inter-véhiculaire, $\approx 5\%$ laissent moins d'une seconde de temps inter-véhiculaire. Dans le cas d'un trafic congestionné qui se traduit par une augmentation du flux routier qui provoque un ralentissement global selon [36] et [22], le constat est plus alarmant car $\approx 60\%$ des automobilistes roulent en-dessous des deux secondes de temps inter-véhiculaire et $\approx 20\%$ des automobilistes laissent moins d'une seconde voir Fig. 4.15⁵.

4. Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière

5. image provenant de la thèse de Nouvelière [43]

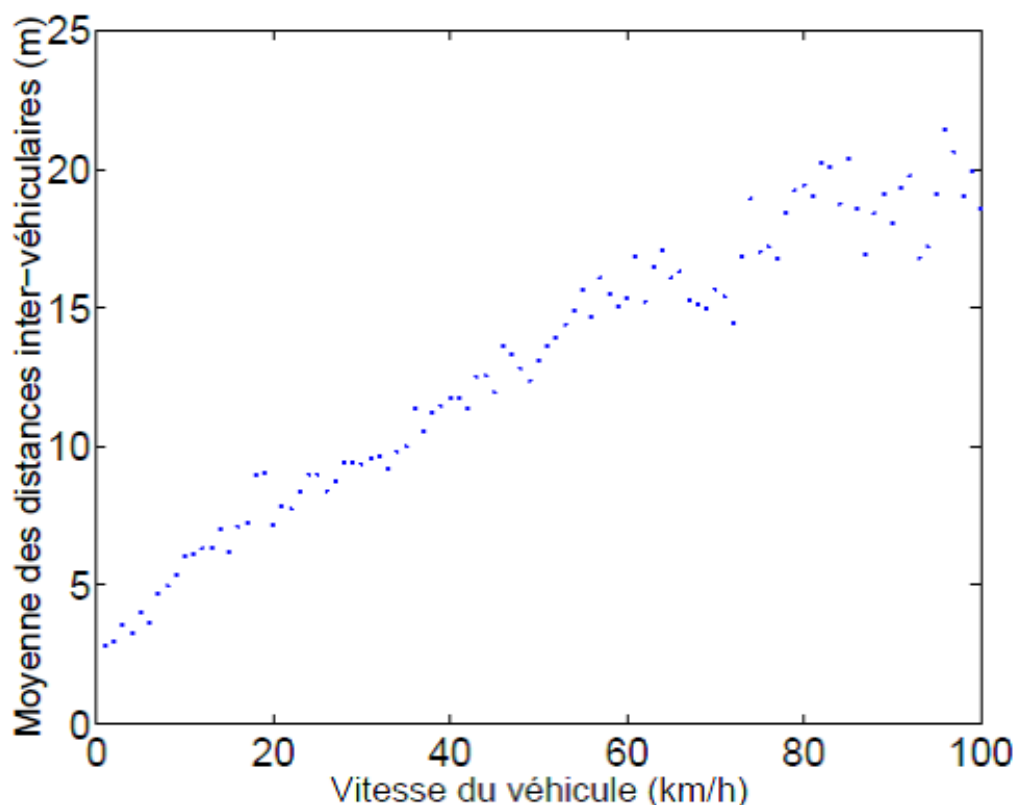


FIGURE 4.15 – Moyenne des distances inter-véhiculaires en fonction d’une vitesse donnée [43]

En situation urbaine, comme nous pouvons le voir dans ces deux études [52] et [43], peu d’automobilistes respectent le code de la route car les distances de sécurité exigées sont considérées trop importante pour un trafic urbain. Si ces distances étaient appliquées en ville par un véhicule alors il verrait les autres véhicules s’insérer dans cette espace (changement de file, sortie de parking). De plus, comme expliqué dans le Chapitre 2, il y a très peu de d’accident car les véhicules pilent rarement. Par la suite les conducteurs prennent cette mauvaise habitude⁶ de ne pas respecter les distances de sécurité.

Par conséquent, dans cette partie nous allons montrer ce que peut apporter les VANET pour la prédiction du comportement du véhicule suivi et donc de l’évaluation du risque. Cela permet par exemple de tenir compte de l’environnement (également nommé contexte), en fonction du lieu (à l’approche des écoles, des lieux de vie, etc.) il serait plus prudent d’augmenter la distance de sécurité car le risque que le véhicule suivi freine augmente donc le conducteur suiveur sera prévenu des potentiels dangers.

Nous rappelons que le risque a trois états : vert, orange et rouge. Ces états vont permettre l’acceptabilité du système d’évaluation de la conduite grâce à la zone orange, une distance plus petite que la distance de sécurité mais garantissant un niveau de sécurité élevé, par exemple grâce à un système d’alerte. Cependant cela ne signifie pas qu’il n’y a pas de risque, il faut qu’en cas de nécessité l’automobiliste agisse correctement.

Pour illustrer l’utilisation de notre RB combiné au VANET, nous allons les utiliser sous la forme d’une aide à la conduite⁷. Cette aide à la conduite est un système d’affichage du risque pour la situation de télescopage.

6. le negative learning

7. Advanced Driver-Assistance Systems

4.4.1 Protocole des simulations

4.4.1.1 Stratégie de communication

Comme vu dans le Chapitre 3, les véhicules n'ont pas de difficultés à communiquer : ils sont à portée de communication, les temps de réception se font quasiment de manière instantanée et il n'y a pas de perte du signal. Pour les simulations sous NS3, nous avons choisi de faire communiquer Obstacle avec Front et Front avec Ego. Il n'y a donc pas de communication entre Obstacle et Ego. Néanmoins, il est possible de faire communiquer tous les véhicules entre eux. Cependant, il faudrait tenir compte des interférences (qui sont proportionnels au nombre de véhicules). Dans notre cas d'étude, il n'est pas nécessaire car nous tenons compte des informations du véhicule Obstacle au travers du risque du véhicule Front. Donc les agissements d'Obstacle se répercuteront sur Front et ainsi ces informations seront empaquetées dans le risque de Front. Pour rappel, la disposition des véhicules est montré sur la Fig. 4.16.

Dans la suite, nous montrons que nous tenons compte des véhicules N+2 et au-delà. Concernant la communication du risque, nous transmettons le risque le plus alarmant (c'est-à-dire dans l'ordre de priorité rouge > orange > vert) dès lors que celui-ci a atteint une valeur supérieure ou égale à 10 %. Par exemple, si le risque vert est à 85 %, orange à 10 % et rouge à 5 % alors le véhicule transmettra un risque orange. Un autre exemple où le risque vert vaut 15 %, orange 73 % et rouge 12 % alors le risque transmis est rouge. La valeur seuil de 10 % correspond à la valeur pour laquelle le véhicule peut éviter l'accident s'il freine de manière adéquate. Cette valeur provient de simulation pour laquelle nous avons vérifié que le véhicule pouvait éviter la collision. Ces simulations ont été menées pour différentes valeurs seuils.

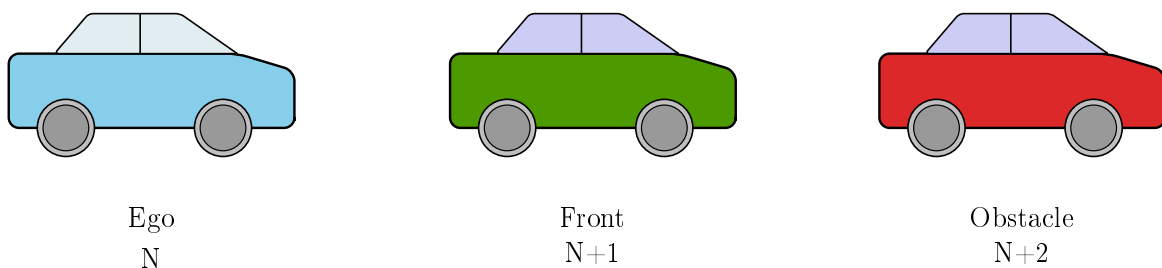


FIGURE 4.16 – Schéma de la disposition des véhicules

4.4.1.2 Stratégie de freinage humain

Lorsqu'une situation exige un freinage d'urgence, la plupart des conducteurs n'apprécient pas immédiatement cette nécessité. Par conséquent, ils commencent par un freinage modéré puis ils essaient de se rattraper en freinant beaucoup plus fortement. Cela s'est également vu lors de nos campagnes d'essais où naturellement les pilotes freinaient soit fortement, soit ils passaient d'abord par une phase de freinage doux puis fort malgré la consigne d'éviter l'accident. De ce fait, nous avons reproduit ce comportement dans nos simulations.

Lors de l'utilisation du système d'affichage du risque, nous avons choisi pour le temps de réaction une seconde, ce qui implique que les véhicules débiteront leur freinage une seconde après qu'ils aient remarqué la situation à risque soit du fait du freinage du véhicule suivi, soit un risque trop élevé. Le choix du temps de réaction d'une seconde cor-

respond à la moyenne du temps de réaction des conducteurs selon les études de la prévention routière, l'Observatoire national interministériel de la sécurité routière et celle utilisée dans la littérature (bien sûr ce paramètre est facilement ajustable dans notre simulateur NS3 et pourrait être réduit à ≈ 0 s dans le véhicule autonome).

Ce que nous appelons risque trop élevé est l'existence d'un risque rouge. Si le véhicule se trouve en risque rouge alors nous supposons naturellement que les automobilistes essaieront de revenir vers un risque orange ou vert selon leur sensibilité. Cette situation de risque rouge apparaît pour deux raisons : la première, il y a des individus qui ont conscience du risque qu'ils prennent mais jugent que le gain apporter par ce risque (par exemple gain de temps de trajet, plaisir de conduire à vitesse élevée) est plus important [3] ; la seconde situation concerne des individus qui n'ont pas conscience du risque qu'ils prennent, ils n'ont pas conscience de la distance de sécurité à respecter, des distances de freinage [3]. Par conséquent, pour cette dernière catégorie d'automobiliste un système d'affichage du risque leur permettrait d'en avoir conscience et nous supposons que ces automobilistes auront pour volonté de revenir vers une moins dangereuse zone comme la zone orange.

4.4.2 Simulation sans affichage du risque

Dans cette partie, nous décrivons une situation typique en termes de distance, vitesse et comportement lorsqu'un véhicule freine et que les automobilistes ne sont pas en possession d'un système d'affichage du risque. Le scénario comprend trois véhicules roulant à 40 km/h et espacés de 10 m (distance inférieure à la distance parcourue en une seconde), situation type selon Nouvelière [43] pour une vitesse de 40 km/h. $A T = 3$ s, Obstacle freine fortement afin d'éviter un obstacle non prévu.

Ici le véhicule Front freine une seconde après qu'Obstacle entame son freinage et Ego freine une seconde après que Front freine. Ces deux véhicules vont tout d'abord freiner doucement puis voyant que cela ne suffit pas ils freinent fortement une seconde après le freinage doux. Il en résulte que Front entre en collision avec Obstacle à $T = 5,6$ s. Front entre en collision car il a un temps inter-véhiculaire inférieur à la seconde et freine de manière non approprié.

De la même façon, le véhicule Ego ne peut éviter la collision voir Fig. 4.17 (les distances négatives ont été ramenées à 0). Ce dernier entre en collision avec Front à $T = 8,3$ s. Cette collision se produit car Ego est également trop proche de Front. Tout comme le véhicule Front, Ego possède un temps inter-véhiculaire inférieur à la seconde et a un freinage non adapté à la situation.

Ils auraient pu éviter la collision s'ils avaient augmentées les distances de sécurité. Ce mauvais comportement existe car malgré des distances trop courtes, il y a peu de risque que les véhicules freinent subitement et fortement. Mais en cas de freinage comme nous pouvons le voir, les véhicules ne peuvent éviter la collision.

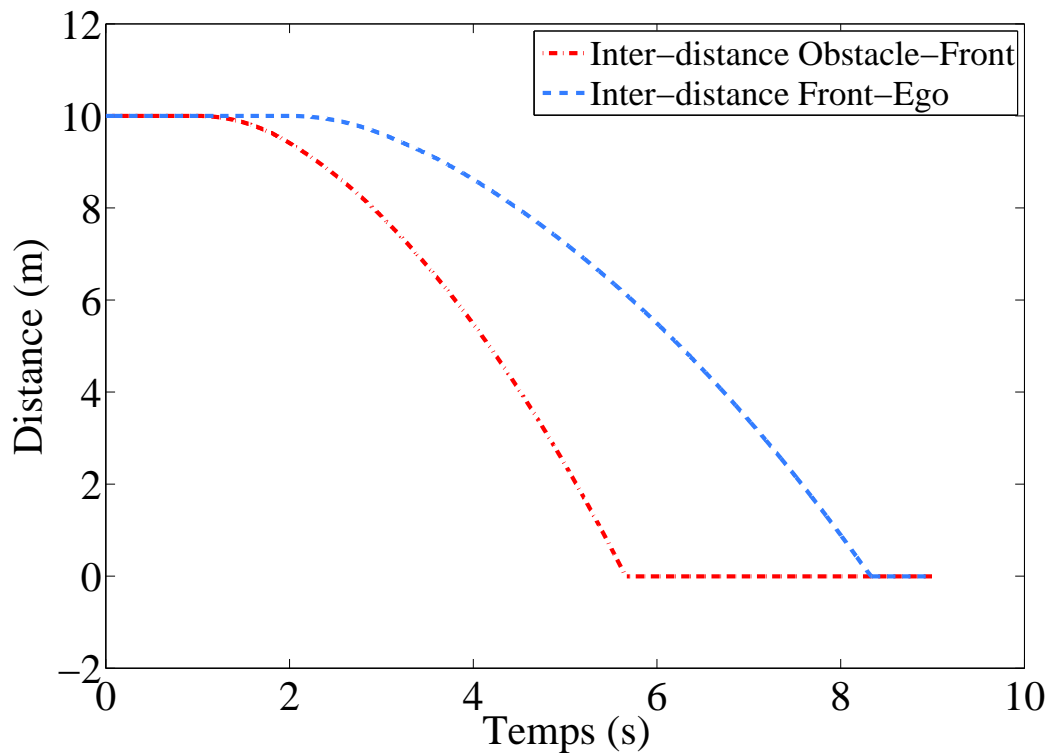


FIGURE 4.17 – Inter-distances Obstacle-Front et Front-Ego

4.4.3 Simulations avec affichage du risque

Le but de cette partie est de montrer ce que peut apporter un système d’affichage du risque. Dans la première partie, le but est de montrer l’évolution du risque de Front et Ego en fonction des changements de zone (passage d’une zone sans danger vers des zones potentiellement dangereuses, par exemple à l’approche d’une école). Cela se fait par l’intermédiaire de la communication du véhicule Obstacle qui passe d’une zone verte, vers l’orange puis le rouge. Pour que seul le changement de zone ait un impact sur le risque, les véhicules ne freinent pas et ne changent ni vitesse, ni inter-distance. Dans la deuxième partie, le but est d’étudier l’évolution du risque et d’éviter l’accident par l’action des véhicules en fonction du risque. Le scénario est qu’Obstacle freine fortement à $T = 3$ s, du fait de l’apparition d’un danger. Pour les deux parties, les véhicules ont pour vitesse initiale 40 km/h et sont espacés de 10 m.

4.4.3.1 Évolution des risques de Front et Ego en fonction des zones de risque, sans freinage des véhicules

Les véhicules sont espacés de 10 m et roulent à la vitesse de 40 km/h. Les véhicules se rapprochent d’une zone à caractère dangereux. Toutes les deux secondes (pour des raisons de temps de simulation), les véhicules passent d’une zone verte à une zone orange puis à une zone rouge. Le risque transmis par Obstacle évolue en même temps que les changements de zone.

Sur la Fig. 4.18a, nous observons que le risque rouge de Front est nul de 0 à 2 s, puis il passe à 10 % entre 2 et 4 s pour enfin atteindre la valeur de 100 % entre 4 et 6 s. Ces évolutions du risque sont dues au changement du risque transmis par Obstacle. Nous

pouvons également noter des changements de niveau de risque pour Ego sur la Fig. 4.18b. Pour ce véhicule le risque rouge est déjà de 10 % dès le début de la simulation car Ego est trop proche de Front. Donc dès qu'Obstacle transmet de l'orange, le niveau atteint directement la valeur de 100 %.

Le but de la simulation est de montrer l'évolution du risque en fonction du risque transmis donc nous avons volontairement laissé les inter-distances fixes (pas d'action des conducteurs). Nous remarquons que les changements d'états d'Obstacle impacte Front et également Ego. Il y a donc une transmission du danger à travers le véhicule Front. Ce raisonnement par récurrence montre que le risque du véhicule Ego tient compte des véhicules en amont donc $N+1$, $N+2$ et au-delà.

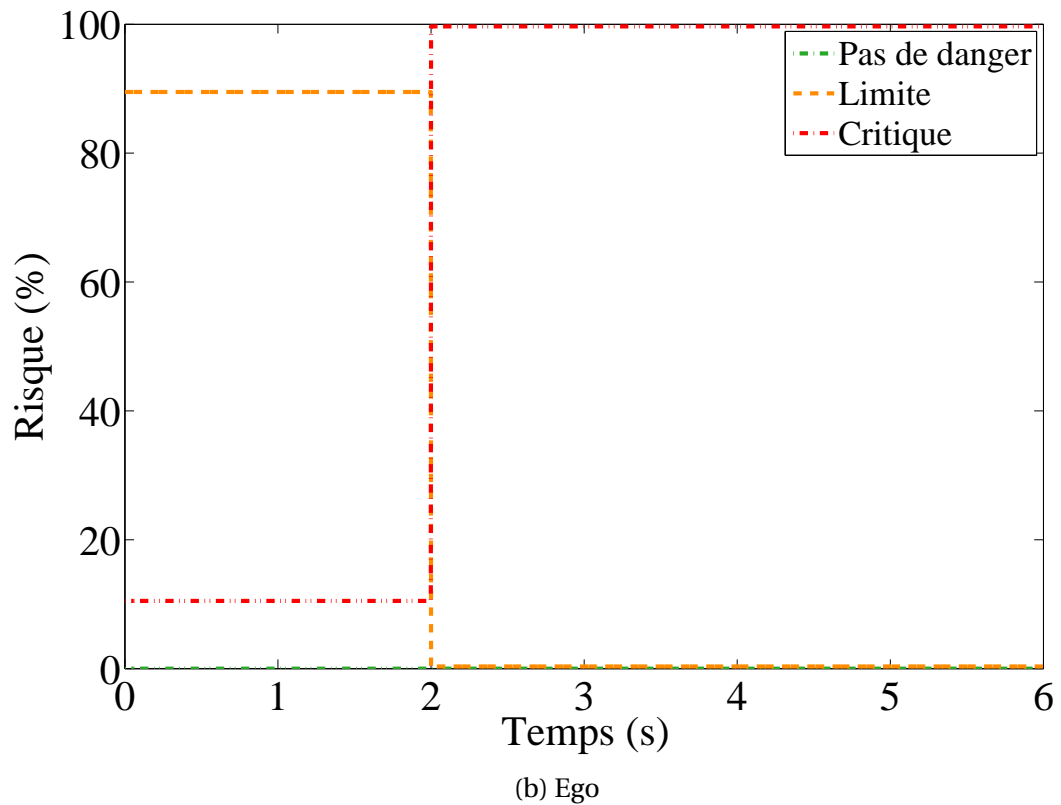
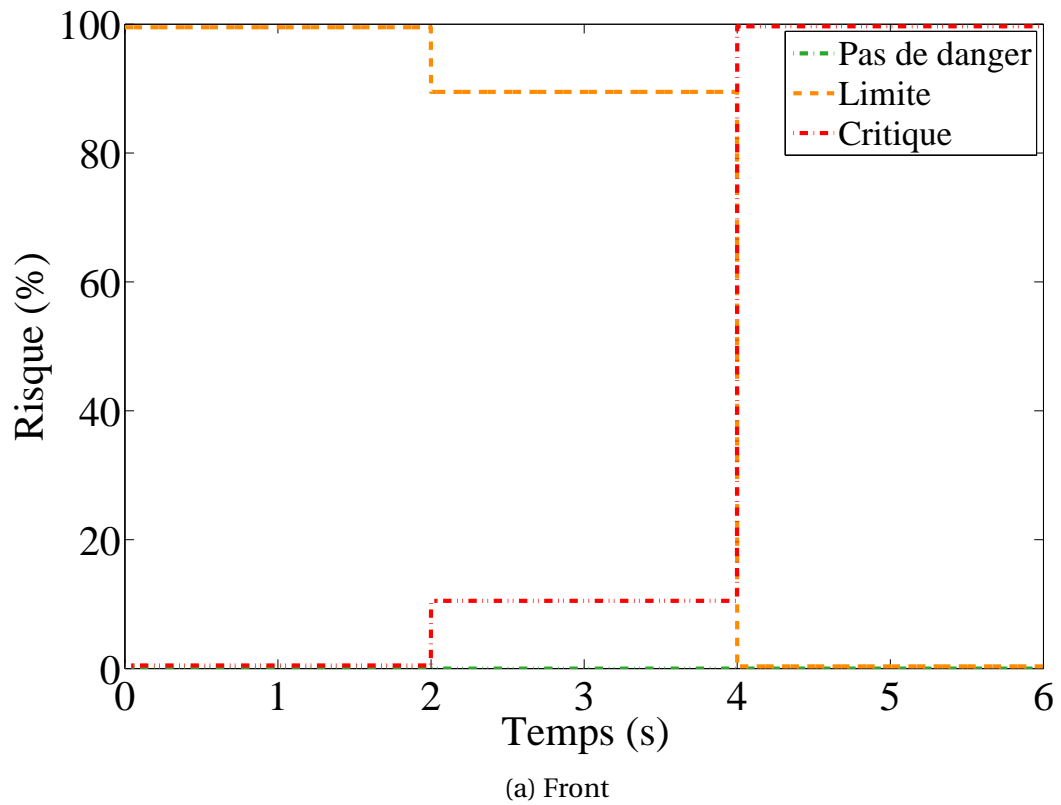


FIGURE 4.18 – Évolution du risque de Front et Ego en fonction de la communication du véhicule Obstacle

4.4.3.2 Évolution des risques en cas de freinage d'Obstacle dans une zone verte

Dans ce scénario, contrairement à précédemment les conducteurs freinent dans le but d'éviter toute collision et vont faire en sorte de rester en zone orange (la zone verte serait préférable mais elle est peu pratiquée par les conducteurs). Nous rappelons que pour les scénarios suivants les trois véhicules roulent à la vitesse de 40 km/h. Cependant, les automobilistes (Front et Ego) adaptent leur distance afin d'être en zone orange. D'où la distance Obstacle-Front de 12 m et la distance Front-Ego de 16 m (la distance Front-Ego est plus grande que celle d'Obstacle-Front car le risque de Front est déjà en orange). Les véhicules évoluent dans une zone sans danger, sans obstacle reconnu et prévisible alors Obstacle transmet un risque vert à Front. Puis Obstacle entame son freinage fort à l'instant $T = 3$ s afin d'éviter l'obstacle non attendu.

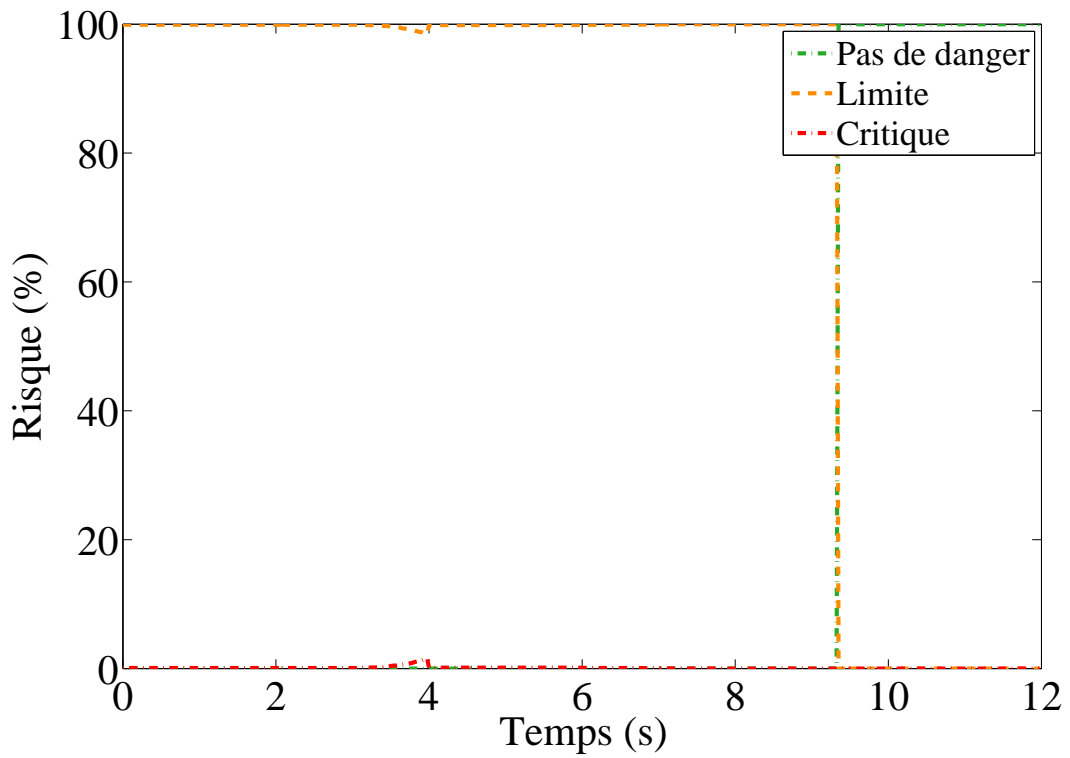
Cette partie est découpée en deux sous-parties : le premier met en scène une réaction adéquate de tous les automobilistes alors que dans le second cas les automobilistes ne réagissent pas correctement.

4.4.3.2.1 Cas d'un freinage adapté

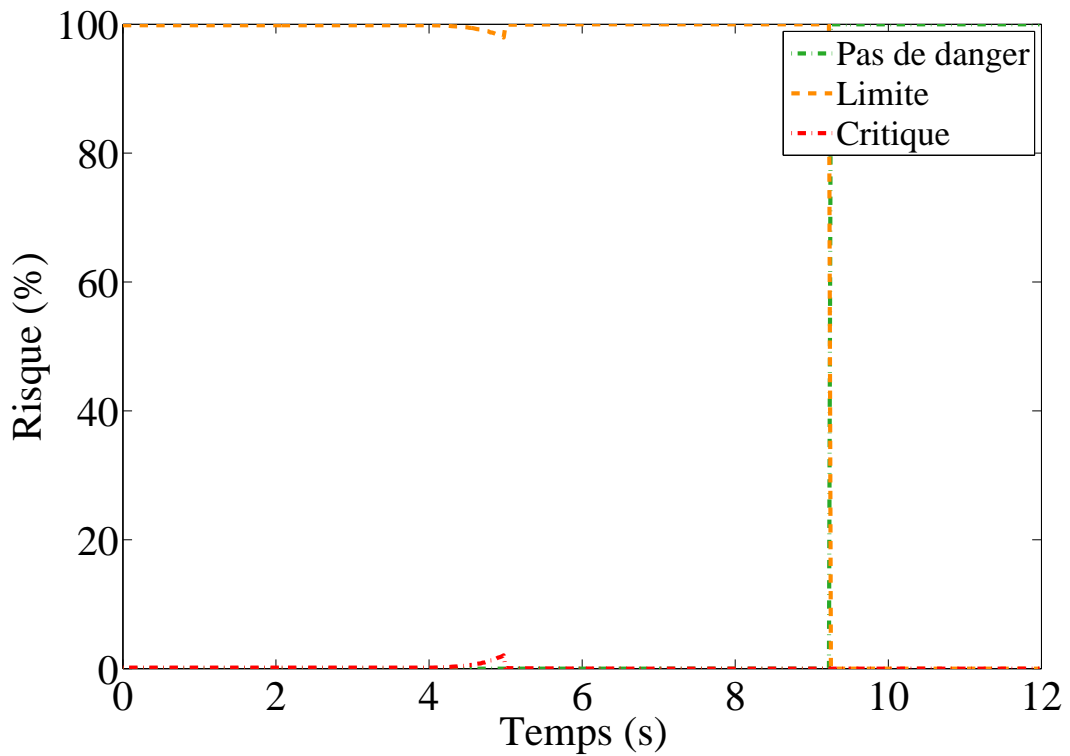
Comme le montre la Fig. 4.19a, le risque rouge de Front est nul. A $T = 4$ s, Front freine fortement voir Fig. 4.20a jusqu'à l'arrêt complet du véhicule car Obstacle a freiné à $T = 3$ s. Comme nous pouvons l'observer sur la Fig. 4.20b Front évite l'accident car il a agi de manière appropriée à la situation. En outre, grâce à son freinage, il se trouve en zone verte dès $T \approx 9,3$ s voir la Fig. 4.19a.

Quant au véhicule Ego, il évite l'accident voir Fig. 4.20b. Dès le début de la simulation son risque rouge est nul % comme le montre la Fig. 4.19b. Sur la Fig. 4.20a, à $T = 5$ s, Ego freine fortement du fait du freinage fort de Front. Comme nous pouvons le remarquer sur la Fig. 4.19b, le risque est vert à partir de $T \approx 9,2$ s.

Dans ce scénario, les conducteurs réagissent correctement. De ce fait, les véhicules évitent les collisions.

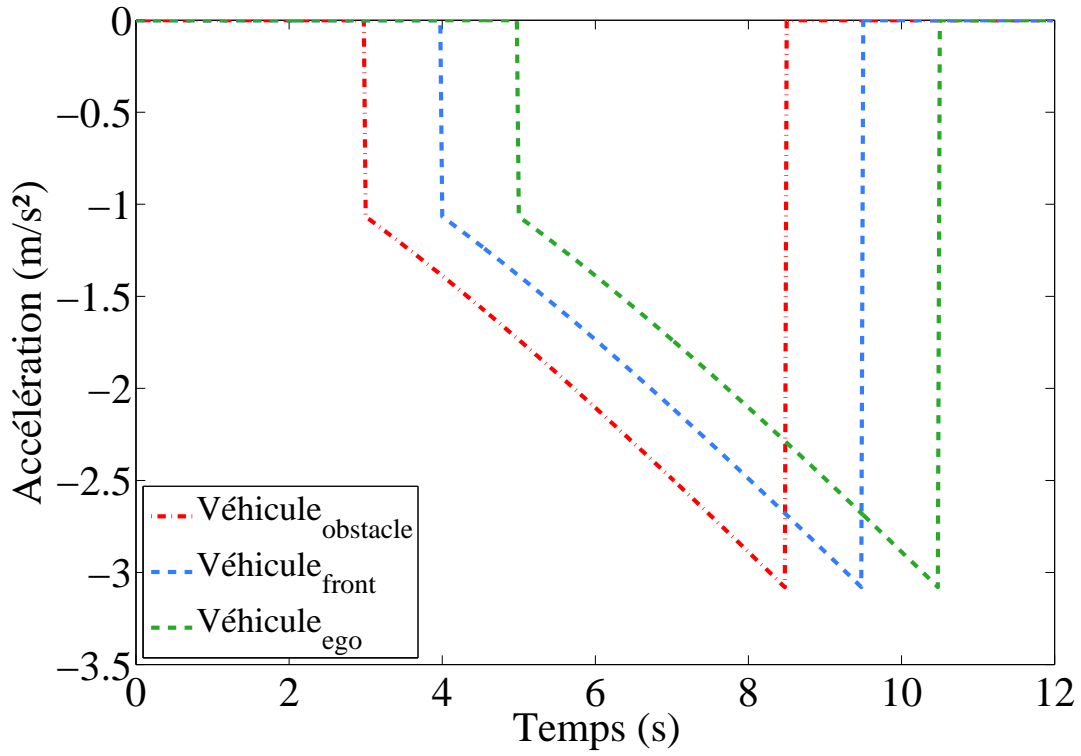


(a) Probabilité de risque pour Front

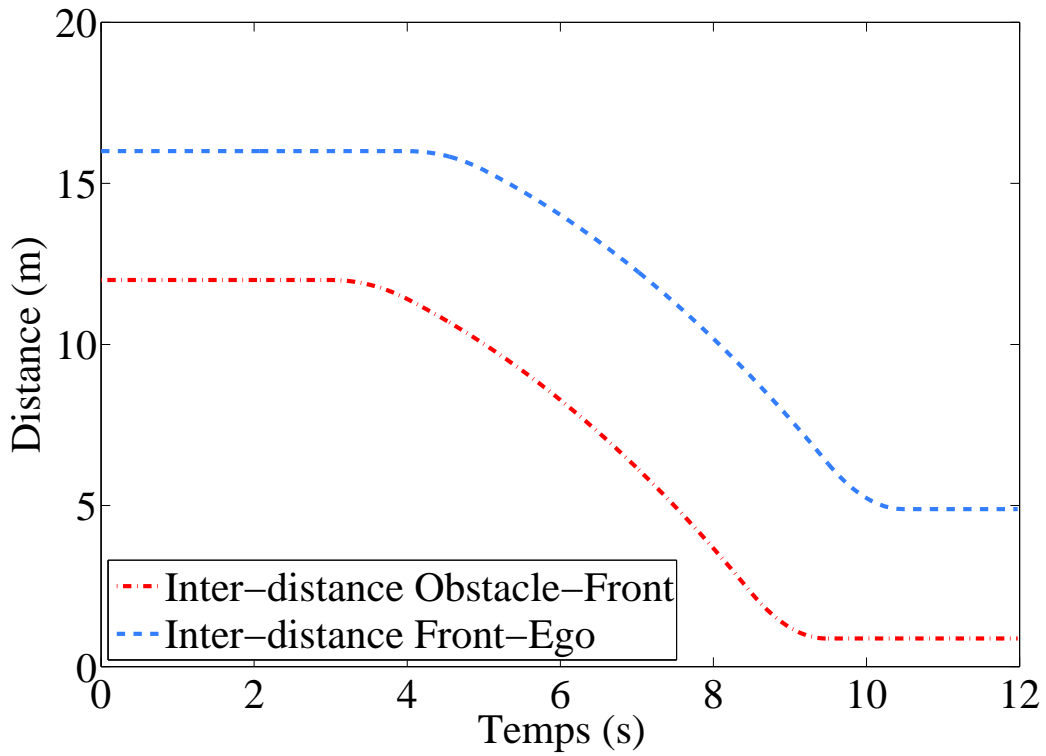


(b) Probabilité de risque pour Ego

FIGURE 4.19 – Graphe des risques pour le scénario communication d'un risque vert avec système d'alerte



(a) Accélérations



(b) Inter-distances

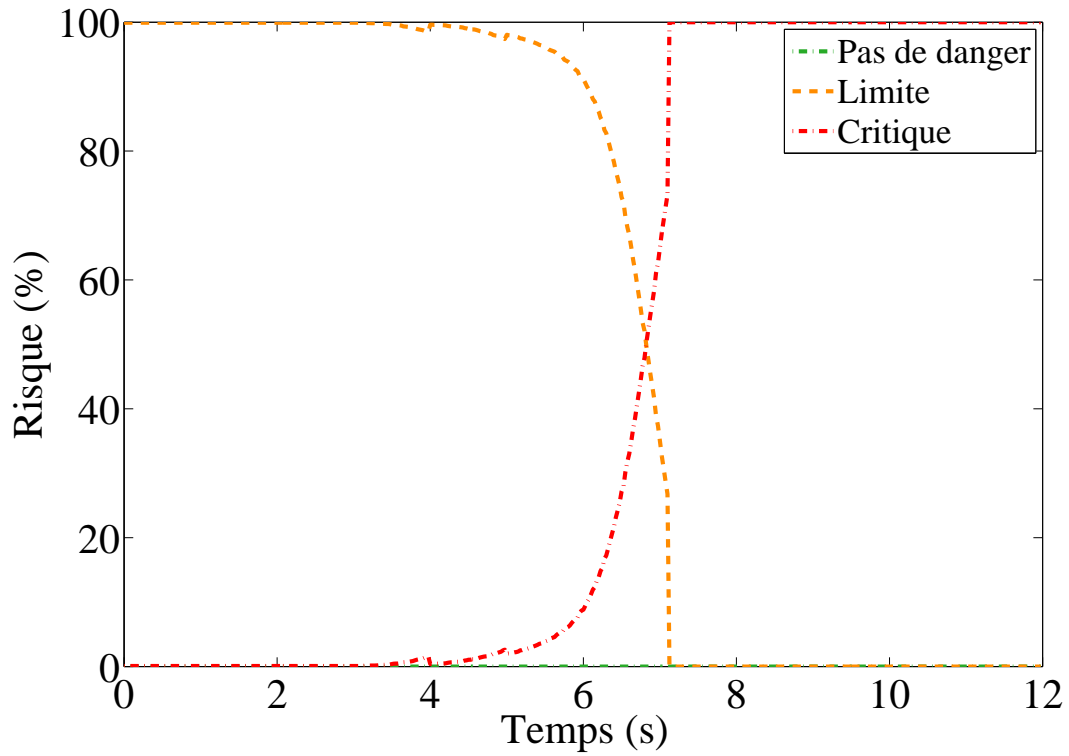
FIGURE 4.20 – Accélérations et inter-distances pour le scénario communication d'un risque vert avec système d'alerte

4.4.3.2.2 Cas d'un freinage non adapté

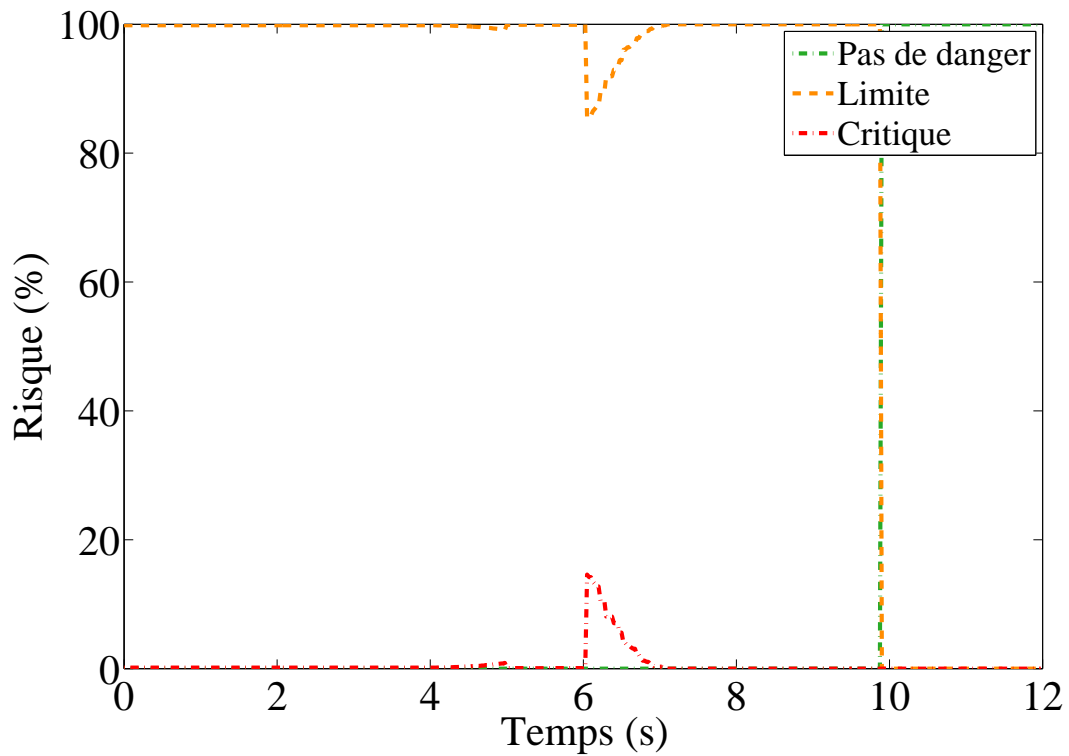
Comme le montre la Fig. 4.21a, le risque rouge de Front est nul. Contrairement au scénario précédent, à $T = 4$ s, Front freine doucement (conformément à nos observations durant nos essais sur piste) car Obstacle a freiné à $T = 3$ s et le risque rouge est monté jusqu'à 1,5 %. Puis à $T = 5$ s, Front freine plus fortement (changement de pente de l'accélération sur la Fig. 4.22a) car malgré son freinage celui-ci se rapproche d'Obstacle voir Fig. 4.22b (la distance finale a été ramenée à 0). Finalement, Front ne peut éviter la collision voir Fig. 4.22b d'où un risque rouge qui atteint les 100 % dès $T \approx 7,1$ s. Front n'a pas pu éviter la collision même s'il était en zone orange (en début de simulation) car il n'a pas réagi correctement (un freinage initial trop modéré).

Sur la Fig. 4.22b, le véhicule Ego évite l'accident. Dès le début de la simulation son risque rouge est nul comme le montre la Fig. 4.21b. A $T = 5$ s, Ego freine également doucement car 1 s auparavant Front a débuté son freinage. Puis à $T = 6$ s, Ego freine fortement car il se rapproche de Front. A partir de $T \approx 9,8$ s son risque est 100 % vert et Ego évite la collision. Contrairement à Front, Ego évite la collision car sa distance initiale est de 4 m plus grande. Celle-ci est plus grande car le risque reçu par Ego est un risque orange de la part de Front alors que Front reçoit un risque vert d'Obstacle.

Grâce au modèle de risque et à la communication véhiculaire, Ego a pu prendre les mesures nécessaires pour éviter le danger potentiel avant même qu'Obstacle ne freine et ainsi éviter l'accident probable. Cependant comme nous avons pu le voir sur la Fig. 4.21a un risque orange ne signifie pas que les véhicules vont éviter l'accident mais qu'ils peuvent éviter l'accident dans l'hypothèse qu'ils agissent correctement vis-à-vis de la situation. Dans l'exemple, Front n'a pas réagi correctement d'où la collision avec Obstacle.

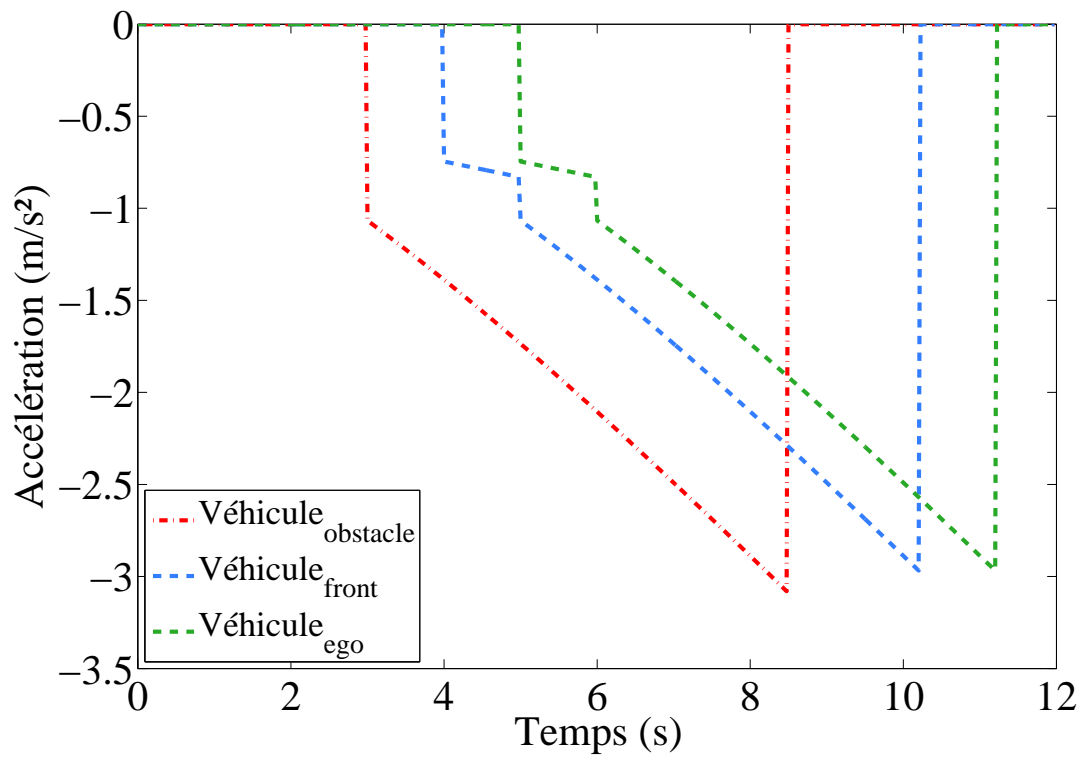


(a) Probabilité de risque pour Front

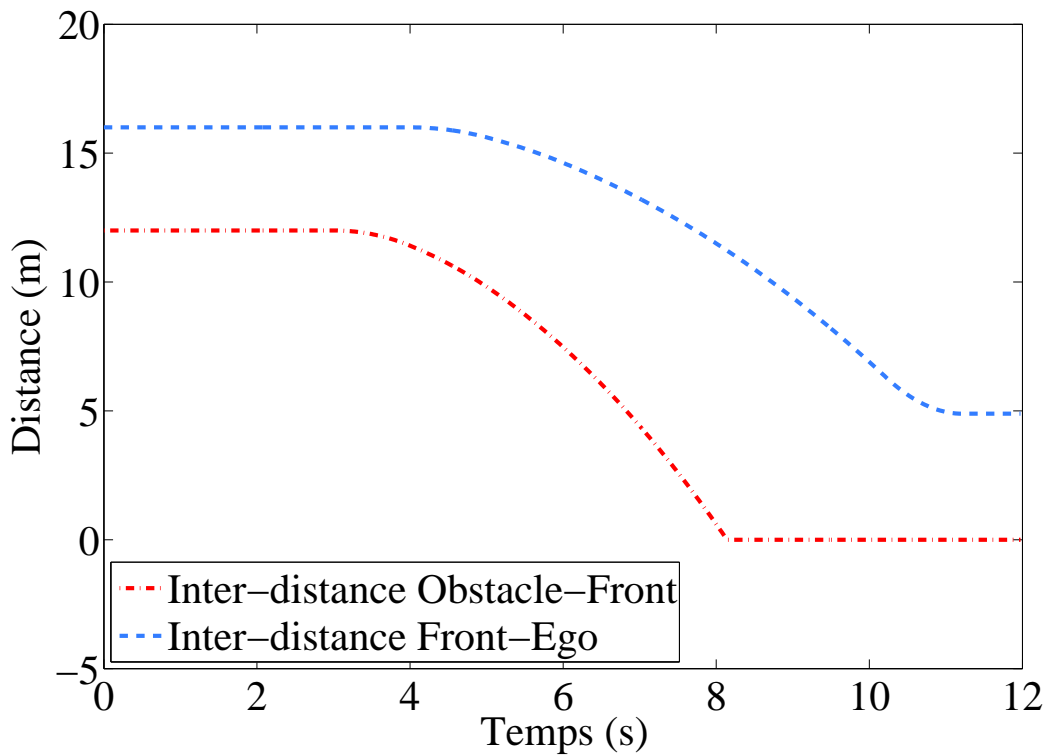


(b) Probabilité de risque pour Ego

FIGURE 4.21 – Graphe des risques pour le scénario communication d'un risque vert avec système d'alerte



(a) Accélérations



(b) Inter-distances

FIGURE 4.22 – Accélérations et inter-distances pour le scénario communication d'un risque vert avec système d'alerte

4.4.3.3 Évolution des risques en cas de freinage d'Obstacle dans une zone orange

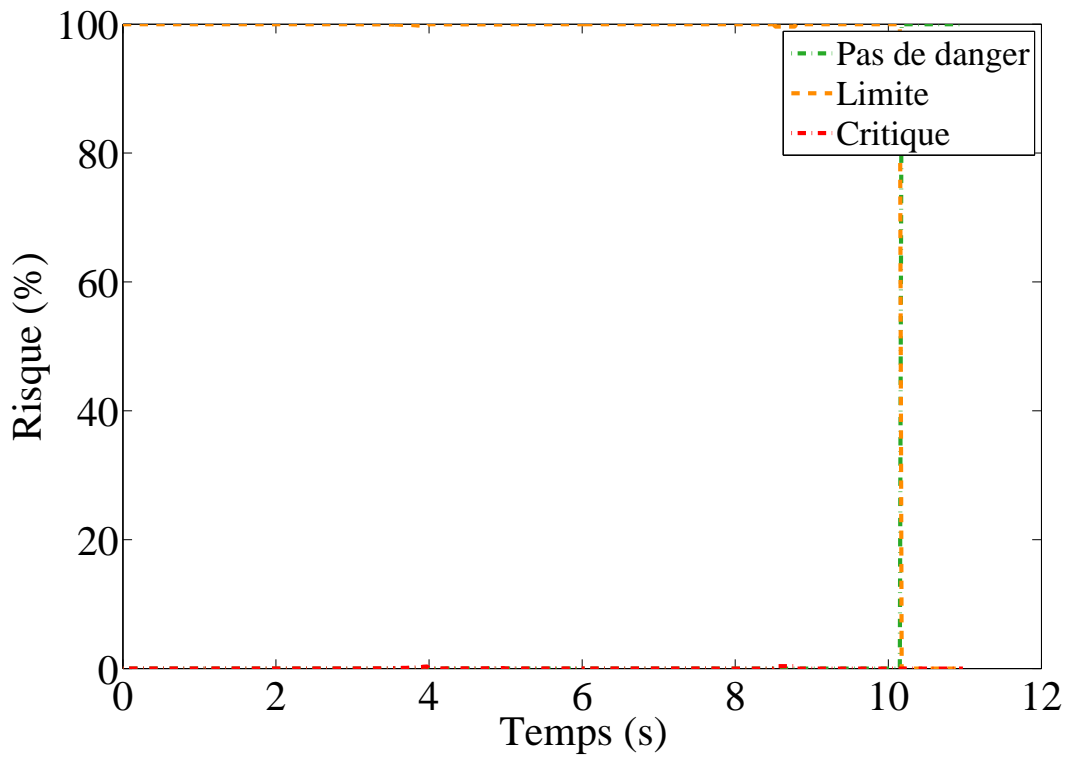
Dans cette simulation, les véhicules sont arrivés dans une zone orange donc potentiellement dangereuse. De ce fait le risque est jugé plus important. Nous supposons que les véhicules ont réagi et se sont adaptés à la situation pour rester en zone orange. Ainsi les distances initiales sont plus grandes comme le montre la Fig. 4.24b comparées aux scénarios précédents (inter-distance Obstacle-Front de 18 m et Front-Ego de 20 m). Les véhicules sont toujours équipés de la technologie VANET et du RB permettant l'évaluation du risque de télescopage. Obstacle freine fortement à $T = 3$ s dans le but d'éviter la collision en raison de l'apparition d'un obstacle dont la survenue a été jugée plus probable en raison de l'environnement.

Comme le montre la Fig. 4.23a, le risque rouge de Front est nul et il a 100 % de risque orange. A $T = 1$, Obstacle débute un freinage d'où à $T = 4$ s, Front décélère doucement (selon les observations fait lors de nos essais). Puis à $T = 5$ s, Front freine fortement du fait du rapprochement entre les deux véhicules. Il en résulte que Front évite la collision comme nous pouvons le voir sur la Fig. 4.24b. Ceci a été prédit par l'algorithme car à $T \approx 10,1$ s, le risque est 100 % vert. Cela nous indique que Front n'aura pas de collision. Cependant, Front aurait pu éviter la collision avec une plus grande marge de sécurité si initialement il avait une inter-distance plus grande ou s'il avait appliqué un freinage plus conséquent (comme une décélération forte ou d'urgence).

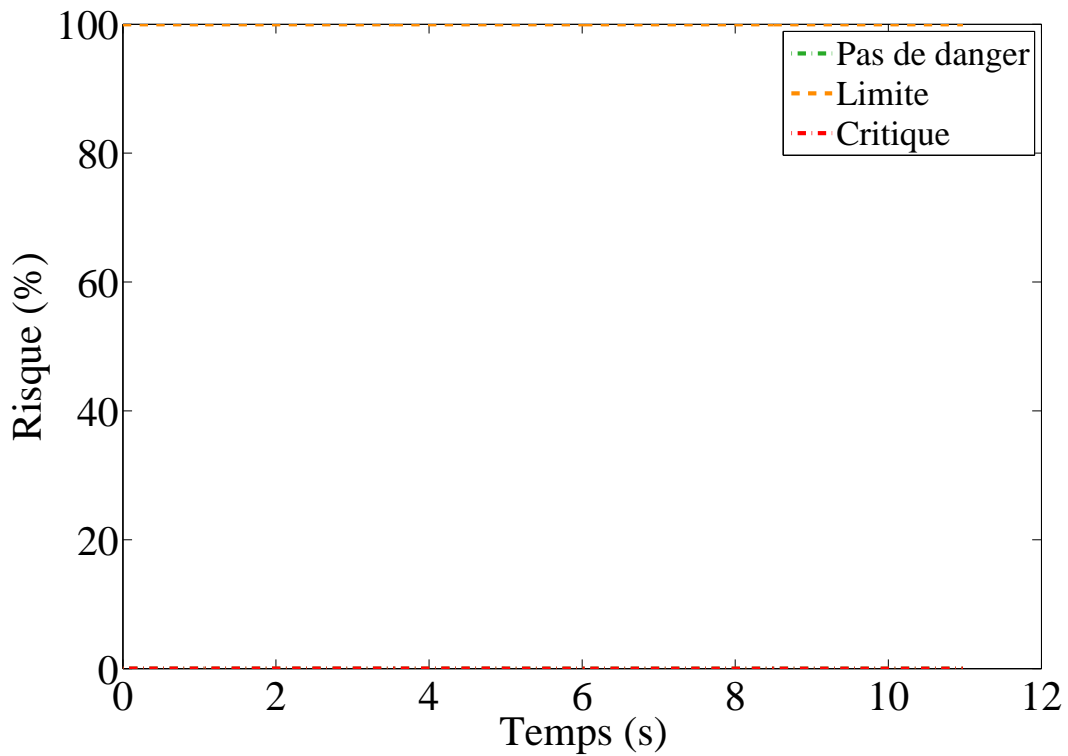
Pour le cas d'Ego, son risque est de 100 % orange du début à la fin de la simulation voir la Fig. 4.23b car Ego a moins bien réagi que Front. Dans cette simulation, Ego freine doucement durant deux secondes mais il évite tout de même l'accident. Celui-ci freine doucement à $T = 5$ s, c'est-à-dire 1 s après que Front est débuté son freinage. Puis comme le montre la Fig. 4.24a, Ego freine fortement à $T = 7$ s. Même s'il freine fortement 2 s après avoir freiné doucement cela suffit pour éviter la collision. Cela est possible car sa distance initiale est adaptée à la situation, de plus Front débute par un freinage doux.

Les deux véhicules évitent les accidents comme nous pouvons le constater sur la Fig. 4.24b. Ceci est possible car ils ont été prévenus par le système d'affichage et qu'ils sont restés zone orange. En outre, cela signifie qu'ils acceptent un certain risque car nous rappelons qu'un risque orange signifie que nous pouvons éviter l'accident que si le véhicule réagit correctement à la situation.

En conclusion, nous pouvons dire que le risque de chaque véhicule dépend également du risque communiqué. De plus, nous pouvons remarquer que le risque d'Ego ne dépend pas que de Front mais dépend également d'Obstacle donc du véhicule N+2 et ainsi de suite. Ce système apporte deux choses si les automobilistes en tiennent compte : premièrement il permet de prévenir de danger que les conducteurs n'auraient pu prévoir et deuxièmement grâce à cette zone orange le système (dans le cas d'une commercialisation) serait beaucoup plus accepté par les automobilistes car il permet d'assurer une sécurité tout en octroyant quelques mètres de distance. C'est un compromis entre le non-respect du code de la route (la zone verte) par les automobilistes et la minimisation du danger. Idéalement, il faudrait que les véhicules respectent le code de la route.

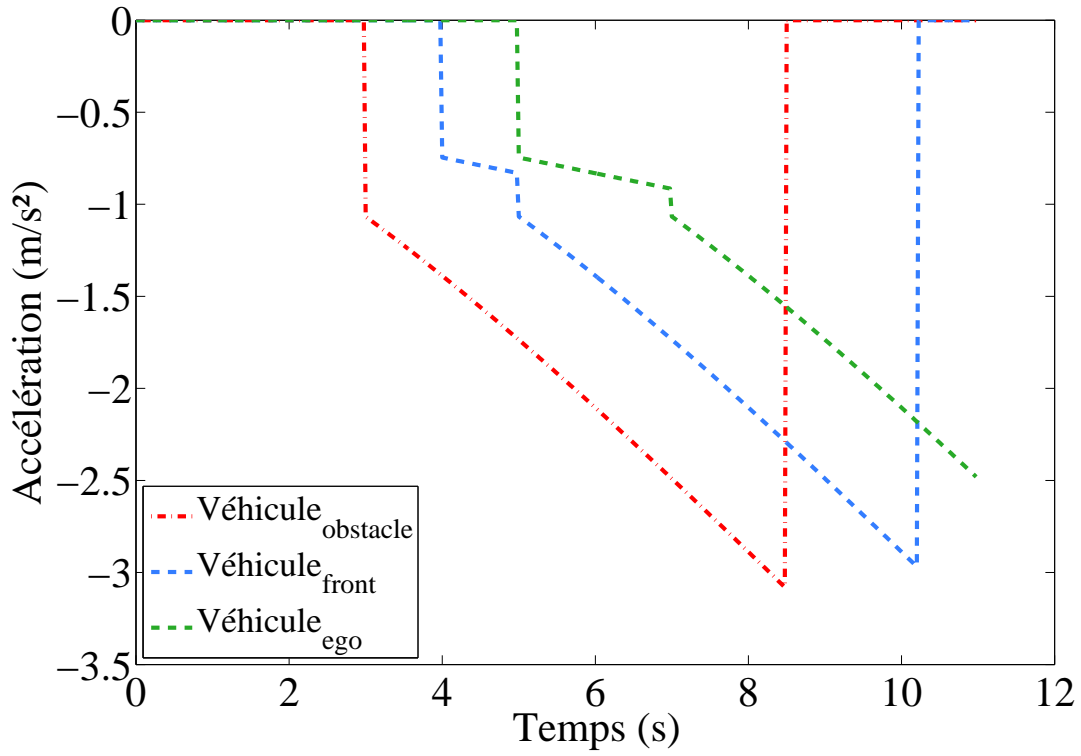


(a) Probabilité de risque pour Front

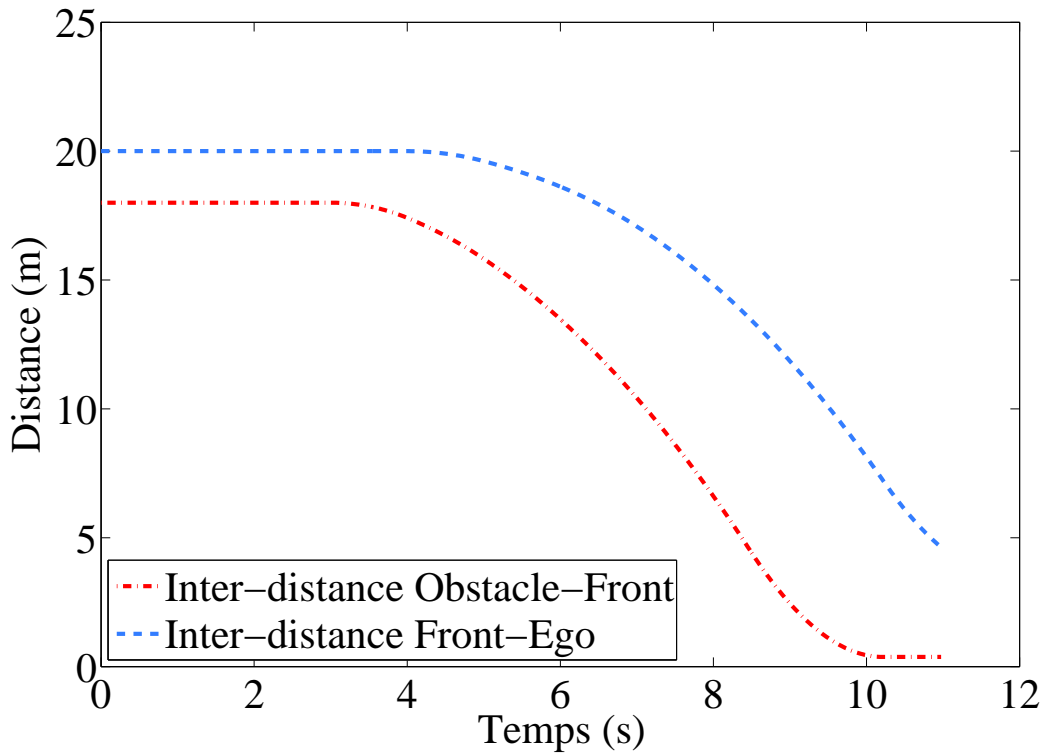


(b) Probabilité de risque pour Ego

FIGURE 4.23 – Graphe des risques pour le scénario communication d'un risque rouge avec système d'alerte



(a) Accélérations



(b) Inter-distances

FIGURE 4.24 – Accélérations et inter-distances pour le scénario communication d'un risque rouge avec système d'alerte

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté nos véhicules d'essais ARTEMIPS et POCHETTE qui sont respectivement une Renault Scénic et une Renault Twizy. Les deux sont équipés avec des capteurs de position et de localisation, plus particulièrement nous utilisons un d-GPS qui nous permet d'avoir une précision centimétrique. De plus, chaque véhicule est équipé d'un ordinateur et du logiciel RT-Maps qui nous permet de recueillir les informations fournies par les différents capteurs. Les deux véhicules sont également équipés d'antennes Wifi qui leur permettent de communiquer, ici nous les utilisons afin qu'ils puissent échanger les données telles que la vitesse, la position GPS, l'accélération, le risque, etc. Grâce à ces données nous avons montré que notre [réseau Bayésien \(RB\)](#), ou *Bayesian Network* combiné à la [communication véhiculaire \(VANET\)](#), ou *Vehicular Adhoc Network* permet l'évaluation du risque.

En raison de nos essais sur piste, nous avons confronté notre modèle de risque à quelques situations d'accidents potentiels. Pour cela nous avons lancés nos deux véhicules à différentes vitesse et distance. Le véhicule de tête avait pour consigne de freiner fortement comme s'il évitait un obstacle et le véhicule suiveur d'éviter l'accident. Puis en post-traitement, nous avons comparé la prédiction de l'algorithme au fait. Il en résulte que le [RB](#) prédit les collisions et en cas de non accident les valeurs du risque restent faibles (c'est-à-dire le [RB](#) signale qu'il n'y a aucun danger). De plus, nos essais sur piste, nous ont permis d'identifier différents types de freinage que nous avons nommé freinage doux, fort et d'urgence. Ainsi nous avons programmé sous NS3 ces trois freinages types nécessaires pour que les véhicules évoluant dans le simulateur puissent appliquer des freinages réalistes. Ces essais ont aussi montré que nos pilotes n'ont pas freiné avec le potentiel maximum du véhicule même s'ils étaient persuadés de le faire. Ils avaient tendance à soit freiner doucement puis augmenter la pression pour appliquer un freinage fort, soit engager un freinage fort.

Par l'intermédiaire de nos simulations, nous avons montré, pour une situation typique en milieu urbain (véhicules roulant à 40 km/h et espacés de 10 m), l'incapacité des conducteurs à éviter un accident. Le scénario comprend trois véhicules et à instant donné le véhicule de tête freine fortement. Ensuite les deux autres véhicules suiveurs freinent mais ils ne peuvent éviter la collision.

Les dernières simulations concernent l'évaluation du risque et l'évitement d'obstacle par un freinage. Nous reprenons la situation typique en milieu urbain mais cette fois les véhicules suiveurs possèdent un système d'affichage du risque basé sur notre modèle [RB](#) et des [VANET](#). Le but de chaque véhicule qui possède le [RB](#) est de rester au moins en zone orange et essayer d'éviter toute collision. Nous avons fait cette étude sur trois simulations. La première où le véhicule de tête (Obstacle) freine fortement dans le but d'éviter un obstacle suffisamment peu probable pour qu'il transmet un risque vert. Dans cette simulation les véhicules suiveurs (Front et Ego) ont un freinage adapté à la situation ce qui leur permet d'éviter l'accident. La seconde simulation est identique à la précédente sauf que les freinages n'étaient pas suffisamment engagés et de ce fait Front et Ego ne peuvent éviter la collision. Donc lors d'un maintien d'un risque orange il est possible d'éviter la collision si les automobilistes réagissent correctement mais la contrepartie est qu'ils acceptent une forte possibilité d'un accident en cas de freinage non adapté. Dans le dernier scénario, Obstacle freine fortement mais cette fois le risque transmis est orange car la probabilité d'un obstacle est plus grande. Ainsi les distances inter-véhiculaires sont plus grandes et les véhicules ont pu éviter l'accident.

Le fait de maintenir au minimum un risque orange permet à chaque véhicule d'allon-

ger l'inter-distance et potentiellement d'éviter la collision (en cas de décélération adaptée). Ainsi un système d'affichage du risque basé sur les VANET et notre modèle de risque avec les RBs permettrait d'éviter un certain nombre d'accident et dans une moindre mesure réduire le choc s'il y a collision. Pour aller plus loin, il serait intéressant d'introduire une stratégie d'utilisation du risque de télescopage avec freinage automatisé. Cet aspect pourrait être étudié au travers de notre simulateur réseau NS3 permettant d'effectuer des simulations réalistes de conduites et de mesurer les effets de notre modèle. NS3 peut simuler des véhicules évoluant dans une ville et vérifier que les situations de collisions pourraient être évitées par une conduite appropriée (respect d'un niveau de risque par les conducteurs) ou par des véhicules autonomes.

Chapitre 5

Conclusion et perspective

Sommaire

5.1	Conclusion générale	116
5.2	Perspectives	118
5.2.1	Aide à la conduite	118
5.2.2	Assurance et police	118
5.2.3	Benchmark	119
5.2.4	Évolution et travaux restants pour l'amélioration	119

5.1 Conclusion générale

Ce travail de thèse au sein du laboratoire IRIMAS (anciennement MIPS), s'inscrit dans la thématique des voitures autonomes, plus particulièrement le domaine de l'évaluation du risque automobile. La thèse s'est focalisée sur un algorithme d'évaluation du risque de télescopage (ou collision par l'arrière) par la méthode des [réseaux Bayésiens \(RB\)](#), ou *Bayesian Network* combiné à la [communication véhiculaire \(VANET\)](#), ou *Vehicular Adhoc Network*. Elle a permis le développement de deux simulateurs l'un sous Matlab et l'autre sur NS3.

Le premier chapitre a montré des cas d'utilisation des [RBs](#) et des [VANET](#). Puis nous avons fait un rappel sur la théorie des [RBs](#) comme les types de raisonnement possible (la prédiction, le diagnostic et l'intercausal). Nous avons exposé la méthode utilisée afin de construire un modèle type [RB](#). Cela passe par plusieurs étapes qui sont le choix des nœuds (quelle variable est pertinente et que nous pouvons exploiter), les liens de causes à effets ou de corrélations entre les différents nœuds, la nature discrète ou continue du nœud, le nombre d'états des nœuds discrets et les paramètres composants le nœud (tableau de probabilités a priori ou conditionnel). Lors de ces choix, il est important de retenir que le nombre de nœuds, d'états et de liens déterminent le temps de calcul, ainsi que la précision et la quantité de données à renseigner pour le modèle probabiliste. Plus le nœud possède d'états plus il faut être précis sur les valeurs entrées. Une erreur communément répandue est de penser que plus il y a d'états plus le modèle probabiliste est précis. Ceci n'est vrai que si le modèle probabiliste l'est. Il y a donc un compromis à trouver entre ce que nous voulons modéliser et ce que nous pouvons modéliser. Dans le cas d'un travail en temps réel, il faudra également tenir compte de la complexité du réseau c'est-à-dire le temps de traitement nécessaire pour évaluer une probabilité.

A la suite de cette méthodologie, nous avons donné la structure de notre [RB](#). Celui-ci dépend de trois entités le conducteur, le véhicule et l'environnement. Le conducteur peut être défini au travers de sa fatigue, sa concentration, son regard, son caractère, son état psychologique. Ainsi ces critères influencent les choix et actions du conducteur. Quant au véhicule, il est défini par sa mécanique (les amortisseurs, le type de roue, le poids du véhicule, etc.), ses aides à la conduite telles que l'ABS, l'ESP, alerte par rapport à l'angle mort, etc. La dernière entité : l'environnement concerne les aspects routiers, météorologique et les autres usagers de la route. La route est définie par la géométrie, le type de route, l'équipement routier, le revêtement quant à lui influence la tenue de route et la visibilité. Les autres usagers vont également agir sur les choix du conducteur, par exemple selon la densité de véhicules le conducteur pourra adapter sa vitesse.

Ces entités ont été exprimées en graphe causal ce qui donne trente-six nœuds que nous pouvons regrouper en quatre blocs. Le premier est le bloc lié à l'évaluation du comportement du conducteur résumé par le temps de réaction (nœud de sortie du bloc). Le second nœud de sortie est la décélération maximale que peut fournir le véhicule tout en tenant compte des capacités mécaniques du véhicule et des aspects routiers (le type de revêtement, la météorologie). Le troisième bloc est celui de l'intention de freinage du conducteur Front (le véhicule suivi), il dépend des actions de Front, du lieu de conduite (par exemple à l'approche d'une école, la probabilité de freinage est plus importante) et du risque de Front par rapport au véhicule qu'il suit. Le dernier bloc regroupe les autres blocs afin de déterminer le risque.

Après avoir réalisée la description du [RB](#), nous avons implémenté notre modèle sous Matlab en utilisant la toolbox développée par Murphy. Par la suite, nous avons rajouté la couche communication véhiculaire avec le simulateur NS3 dans le but de tenir compte

des phénomènes physiques liés au VANET et aux différents problèmes que cela pourraient causer. Cependant, le développement d'une interface Matlab et NS3 est un élément complexe afin de synchroniser l'ensemble. Nous avons donc opté pour une solution tierce en utilisant la librairie Netica développée par Norsys Corp. Celle-ci fut intégrée au simulateur NS3, ce qui nous permet de créer des simulations où chaque véhicule évolue avec son propre RB et obtient son propre risque mais elle a pour inconvénient de limiter la taille du réseau compte tenu de la mémoire nécessaire à la librairie Netica.

A la suite du développement du simulateur réseau, nous avons fait un rappel sur la communication véhiculaire et nous avons donné un aperçu de comment utiliser les différentes toolbox et librairie que nous avons utilisées pour programmer le RB.

Notre modèle de risque fut testé pour différentes situations sur nos véhicules d'essais, les Renault Scénic et Twizy équipés de capteurs (position, vitesse, accélération), d'un ordinateur pour gérer les acquisitions de données, d'une antenne Wifi pour la communication véhiculaire. Nous avons fait des tests de collision par l'arrière sur la piste de la Cité de l'Automobile de Mulhouse. Puis en post-traitement, nous avons vérifié que l'algorithme d'évaluation du risque a bien prédit la collision ou la non collision selon les scénarios (respectivement un risque rouge atteignant les 100 % et en deçà de cette valeur). Il en ressort que le modèle de risque que nous avons développé réagit correctement aux différentes situations. Avec d'autres essais sur piste, nous avons identifié trois types de freinage que nous avons implémentés dans notre simulateur NS3.

Afin de tester pleinement les possibilités qu'offre la communication véhiculaire, c'est-à-dire la détection et l'anticipation de situation dangereuse, nous avons besoin d'au minimum trois véhicules. Or nous n'en possédons que deux, d'où la nécessité de procéder par simulation. Nous obtenons comme résultat que si les conducteurs restent en zone orange (car peu d'automobilistes respectent le code de la route donc la zone verte) alors ils peuvent éviter l'accident moyennant une décélération adaptée. Dans le cas d'une décélération non adaptée ou un risque rouge, les véhicules ne pourront éviter l'accident mais le fait de prévenir le conducteur pourra engendrer des dégâts moindres pour celui-ci et ses passagers. Le fait de rester en zone verte ou orange fait que les véhicules ont augmenté les inter-distances et potentiellement réduit le risque de collision. L'augmentation de la distance est personnalisée à chaque conducteur selon son temps de réaction, son état de vigilance, etc.

A travers cet exposé, nous avons montré notre modèle de risque pour la situation de collision par l'arrière (ou télescopage) qui a été testé sur des essais sur piste. De plus nos simulateurs permettent d'évaluer des risques pour des situations variées et à plus grandes échelles. Par exemple, étudier la mixité du flux routier, entre véhicules autonome et non autonome.

5.2 Perspectives

5.2.1 Aide à la conduite

Comme évoqué précédemment, une partie des automobilistes ont adopté de mauvaises habitudes de conduite voire certains automobilistes ne sont pas conscients de leur prise de risque qui résulte d'une distance de sécurité trop faible, d'une vitesse inadaptée, etc. Il existe des systèmes d'avertissement comme le Front Assist¹ proposé par Volkswagen et pour certains modèles ce système est couplé à un freinage d'urgence. Par contre, pour un système d'avertissement, il est important d'étudier les questions concernant l'interface homme-machine² : comment l'avertissement va impacter la conduite, est-ce que ne va pas surprendre le conducteur et donc augmenter le temps de réaction de celui-ci.

Dans le cas d'un système totalement imbriqué dans le véhicule (par exemple chez Peugeot³), il ne ferait pas que conseiller ou alerter le conducteur mais le système essaierait d'éviter l'accident en freinant automatiquement. Un système actif sur lequel le conducteur peut s'appuyer soulève d'autres interrogations : est-ce que cela ne va pas avoir un effet néfaste sur le long terme comme réduire la vigilance de l'automobiliste qui par habitude va se dire qu'il peut compter sur la machine et qu'il n'a plus besoin d'avoir une conduite prudente.

Nos travaux pourraient apporter une connaissance plus approfondie, peaufiner les paramètres et obtenir un système adapté à chaque conducteur (selon ses habitudes, son temps de réaction). De plus, il permettrait d'être fonctionnel sur une longue portée grâce au VANET.

Le développement des systèmes d'aide à la conduite permet de compenser les erreurs de manœuvres et de jugements des conducteurs. Ainsi l'impact des écarts de conduite est réduit. Pour aller plus loin, les constructeurs développent des véhicules autonomes en combinant les différents systèmes de prévention dans le but d'offrir une plus grande sécurité aux usagers, un meilleur confort et d'améliorer la densité routière.

5.2.2 Assurance et police

Certains organismes publics et privés tels que les assurances s'intéressent à la conduite du conducteur (c'est-à-dire les causes dans le cas d'un accident) et non plus seulement à l'accident (ce qui correspond aux faits). Pouvoir évaluer et surveiller le conducteur permet de proposer une offre adéquate pour chaque conducteur comme l'assureur YouDrive⁴ ou Allianz⁵ (système n'évaluant que les vitesses et les accélérations). Une facture qui s'adapte selon la conduite de ce dernier. Ce type de surveillance peut également être intéressant dans le cas d'un accident afin d'évaluer le rôle de chaque participant. Cependant ces systèmes sont limités, ils ne tiennent compte que de peu de paramètres, ils pourraient être enrichie par notre modèle avec l'aspect intention de freinage et des paramètres conducteurs tels que son état de vigilance ou son temps de réaction. A plus forte raison, si le système devait se généraliser ou devenir obligatoire.

1. <https://www.volkswagen.fr/fr/volkswagen-innovations/systemes-d-assistance.html#home>

2. Human Computer Interface

3. <http://www.peugeot.fr/gamme/nos-vehicules/suv-2008/securite.html>

4. <https://www.youdrive.fr/>

5. <https://www.allianz.fr/assurance-auto/conduite-connectee/>

5.2.3 Benchmark

A l'avenir, à l'image d'EURO NCAP, notre modèle de risque pourrait être utilisé pour évaluer les systèmes d'aide à la conduite de type commande des véhicules. Pour cela il faudrait améliorer notre modèle probabiliste (par exemple grâce à des données constructeurs) et tenir compte des dégâts encourus (selon la définition du risque). Ainsi les véhicules autonomes devront respecter un niveau de risque maximum à ne pas dépasser afin de garantir une sécurité aux passagers voire des autres usagers de la route qu'ils soient motorisés ou non. Ce qui signifie que dans une situation critique comme une collision arrière le véhicule pourra éviter l'accident ou minimiser les dégâts.

Nos travaux pourraient également être utilisés afin d'évaluer les futurs automobilistes lors de l'examen du permis de conduire.

5.2.4 Évolution et travaux restants pour l'amélioration

Tout d'abord, il faut rappeler que nos travaux ne portent que sur l'estimation de l'exposition à un danger ou à un certain type de situations tels qu'une collision frontale ou latérale. Pour définir pleinement le risque (comme défini par la norme ISO), il faut également tenir compte de la gravité que peut subir le véhicule et les passagers, en d'autres termes les conséquences matérielles et humaines d'un accident sur des aspects économiques et juridiques.

De plus dans notre étude, nous nous sommes focalisés principalement sur la collision arrière (la situation de télescopage), il faudrait pour avoir un système complet définir tous les risques possibles et ensuite les valider par des tests sur piste.

Une fois ce risque évalué, un nouveau pan d'étude s'ouvre et cela concerne la stratégie d'évitement de collision que cela soit par un braquage du véhicule ou freinage de ce dernier. L'étude sur la stratégie portera sur les aspects juridique, économique et humain. L'une des questions qu'il faudra se poser est faut-il répartir le risque. Par conséquent distribuer les dégâts parmi l'ensemble des véhicules du trafic ou privilégier un impact important qui n'implique que peu de participants. Cette interrogation ne tient compte que de l'aspect humain mais il se peut que juridiquement ou économiquement une autre solution s'offre.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes mis dans un cas idéal où nous obtenons toutes les informations qui nous intéressent, il n'y aucun défaut aux seins de nos capteurs. De plus, les informations fournies par les sources à fusionner peuvent souvent être : imprécises, incertaines, conflictuelles et ambiguës. Il va falloir se poser les questions des conséquences de ces difficultés sur l'évaluation du risque. Par exemple l'impact du manque d'information ou de la priorisation de l'information lors de la fusion de données, c'est-à-dire quelle capteur aura un poids plus important qu'un autre pour la même information. Cette priorisation pourra également dépendre de l'environnement. Dans le cas d'une information conflictuelle des capteurs que pourrons-nous en déduire.

Pour conclure, cette thèse est un début dans l'évaluation du risque, elle est donc encore amenée à évoluer car elle devra tenir compte des aspects légaux, juridique et de mixité du flux routier entre véhicules conduit par des conducteurs, véhicules semi-autonomes et véhicules autonomes.

Bibliographie

- [1] Taimoor ABBAS et al. "A Measurement Based Shadow Fading Model for Vehicle-to-Vehicle Network Simulations". en. In : *International Journal of Antennas and Propagation* (2015). DOI: 10.1155/2015/190607, p. 12. DOI : DOI:10.1155/2015/190607. URL : <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2015/190607/cta/>.
- [2] ANDREAS AUSTILAT. "Fahrverbot im alten Rom". Allemand. In : *Der Tagesspiegel* (2007). URL : <https://www.tagesspiegel.de/politik/geschichte/verkehr-fahrverbot-im-alten-rom/1129938.html>.
- [3] AURÉLIE BANET. "Conscience du risque et attitudes face aux risques chez les motocyclistes". Thèse de doct. Université Lumière Lyon 2, 2010. URL : <http://www.theses.fr/2010LY020108>.
- [4] Hervé BOEGLIN, Benoit HILT et Frédéric DROUHIN. "Emulating a Realistic VANET Channel in Ns-3". en. In : *Networking Simulation for Intelligent Transportation Systems*. Sous la dir. de Benoit HILT et al. DOI: 10.1002/9781119407447.ch6. John Wiley & Sons, Inc., 2017, p. 107-131. ISBN : 978-1-119-40744-7. URL : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119407447.ch6/summary> (visité le 09/02/2018).
- [5] Marianne BONDAZ et al. *Evaluation de la politique de sécurité routière*. French. Rapp. tech. 14-074/14-016/01. Inspection Générale de l'Administration, 2014. URL : http://www.modernisation.gouv.fr/sites/default/files/epp/epp_securite_routiere_rapport.pdf.
- [6] Thierry BRENAC et al. "Influence of Travelling Speed on the Risk of Injury Accident: a Matched Case-Control Study". In : 43 (jan. 2015). DOI : 10.3311/PPtr.7520.
- [7] BRICE GRUET. *La rue à Rome, miroir de la ville. Entre l'émotion et la norme*. Presses de l'Université Paris-Sorbonne, 2006. ISBN : 978-2840504160. DOI : 10.7202/1019177ar. URL : <https://www.erudit.org/fr/revues/uhr/2008-v36-n2-uhr0876/1019177ar/>.
- [8] CANADIAN CENTRE FOR OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY GOVERNMENT OF CANADA. *Fatigue : OSH Answers*. Anglais. Sept. 2015. URL : <http://www.ccohs.ca/oshanswers/psychosocial/fatigue.html> (visité le 29/09/2015).
- [9] C. PERKINS, E. BELDING-ROYER et S. DAS. *RFC 3561 Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*. Anglais. 2003. DOI : 10.17487/RFC3561. URL : <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3561.txt>.
- [10] Gregory F. COOPER et Edward HERSKOVITS. "A Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data". Anglais. In : *Machine Learning* 9.4 (oct. 1992), p. 309-347. ISSN : 0885-6125, 1573-0565. DOI : 10.1007/BF00994110. URL : <http://link.springer.com/10.1007/BF00994110> (visité le 31/10/2017).

- [11] S. CORSON et J. MACKER. "Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations". Anglais. In : *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* (jan. 1999). URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=RFC2501> (visité le 18/12/2017).
- [12] CYRILLE PIATECKI. *Pourquoi conduit-on à droite ? Une investigation historique dans la genèse d'un conflit de normes*. Rapp. tech. 2014. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00945783/document>.
- [13] DANIELLE GOUREVITCH. "Accidents de voiture dans l'Empire romain : recourir au médecin ou au dieu ? Traffic accidents during the Roman empire: to go to the doctor or to the god?" In : *Histoire des sciences médicales* 46.2 (2012), p. 125-132. URL : <http://www.biusante.parisdescartes.fr/sfhm/hsm/HSMx2012x046x002/HSMx2012x046x002x0125.pdf>.
- [14] Didier DELIGNIÈRES. "Risque préférentiel, risque perçu et prise de risque". In : 1 (1993). Sous la dir. de J.P. FAMOSE, p. 79-102. URL : https://www.researchgate.net/publication/251294871_RISQUE_PREFERENTIEL_RISQUE_PERCU_ET_PRISE_DE_RISQUE1.
- [15] Thomas A. DINGUS et al. "Driver crash risk factors and prevalence evaluation using naturalistic driving data". In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113.10 (2016), p. 2636-2641. ISSN : 0027-8424. DOI : [10.1073/pnas.1513271113](https://doi.org/10.1073/pnas.1513271113). eprint : <http://www.pnas.org/content/113/10/2636.full.pdf>. URL : <http://www.pnas.org/content/113/10/2636>.
- [16] A. P. DEMPSTER, N. M. LAIRD et D. B. RUBIN. "Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm". Anglais. In : *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 39.1 (1977), p. 1-38. ISSN : 0035-9246. URL : <http://www.jstor.org/stable/2984875> (visité le 25/09/2017).
- [17] EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. *The framework for the deployment of Intelligent Transport Systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport*. Anglais. Directive 2010/40/EU. European Parliament et of the Council, 2010.
- [18] Cunha FELIPE et al. "Data Communication in VANETs: A Survey, Challenges and Applications". Anglais. In : *Ad Hoc Networks* (mar. 2014). DOI : [10.1016/j.adhoc.2016.02.017](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.02.017).
- [19] Olivier FRANCOIS et Philippe LERAY. "BNT Structure Learning Package: Documentation and Experiments". Anglais. In : *Journal of Machine Learning Research* (jan. 2008).
- [20] J.-A. FONDARAI et al. "Evolution du temps de réaction visuel en fonction de l'âge: méta-analyse sur un total de 1 222 individus". In : *les cahiers de l'année gérontologique* 1.1 (mar. 2009), p. 3-9. ISSN : 1760-5342, 1760-5350. DOI : [10.1007/s12612-009-0001-4](https://doi.org/10.1007/s12612-009-0001-4). URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/s12612-009-0001-4> (visité le 19/12/2017).
- [21] FRANCK SAMSON. "La Convention européenne de sauvegarde des droits de l'homme et des libertés fondamentales et l'exercice des pouvoirs publics à l'égard de l'automobiliste ou Les droits de l'homme au quotidien." Thèse de doct. Université de Brest, 1998. URL : <http://www.theses.fr/1998BRES5001>.

- [22] GAËLE LESTEVEN. “Analyse des stratégies d’adaptation à la congestion automobile dans les grandes métropoles. Les cas de Paris, São Paulo et Mumbai”. Thèse de doct. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2012. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00981240/>.
- [23] Alain GALOIN. “Les embarras de la circulation”. In : *Histoire par l’image* (2005). URL : <http://www.histoire-image.org/etudes/embarras-circulation>.
- [24] GUILLAUME CHALLOUATTE. “Evolutions du comportement des consommateurs français dans l’e-commerce B to C”. Mém. de mast. Université de Lille (France) et de Swinburne (Australie), 2004. URL : <https://www.memoireonline.com/12/05/20/ecommerce-b2c-france.html>.
- [25] GUY ARBELLOT. “Les problèmes de la route française à l’entrée du XIXe siècle”. In : *Histoire, économie et société. Les transports* (1990). URL : https://www.persee.fr/doc/hes_0752-5702_1990_num_9_1_1564.
- [26] Jean-Michel HOC et Rene AMALBERTI. “Diagnosis: Some theoretical questions raised by applied research”. In : 14 (fév. 1995), p. 73-101.
- [27] Hedi HAMDANE et al. “Relevant factors for active pedestrian safety based on 100 real accident reconstructions”. In : 21 (nov. 2015), p. 1-12. DOI : [10.1080/13588265.2015.1113618](https://doi.org/10.1080/13588265.2015.1113618).
- [28] HANENE GABTENI. “Prédiction de rupture de lien dans les VANETs basée sur une modélisation réaliste du canal de transmission”. Thèse de doct. Université de Haute Alsace, 2016.
- [29] IEEE. *IEEE 802.11p-2010 - IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments*. Anglais. 2010. URL : <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11p-2010.html> (visité le 18/12/2017).
- [30] IEEE. *IEEE 1609.0-2013 - IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture*. Anglais. 2013. URL : <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1609.0-2013.html> (visité le 18/12/2017).
- [31] C. E. IRWIN. “The Theoretical Concept of At-Risk Adolescents”. In : *Adolescent medicine (Philadelphia, Pa.)* 1.1 (fév. 1990), p. 1-14. ISSN : 1041-3499. URL : <http://europepmc.org/abstract/MED/10350697>.
- [32] JEAN-CLAUDE CASTAGNINO. *Sécurité et prise de risque en EPS*. Rapp. tech. Université d’Amiens, 2000. URL : <http://eduka.free.fr/eps/capeps/ecrit2/Risqetsecu.pdf>.
- [33] Rémy JOSSEAUME et Jean-Baptiste LE DALL. *Contentieux de la circulation routière*. Sous la dir. de Wolters KLUWER. third. Lamy, 2016. ISBN : 978-2-7212-2029-5. URL : <https://www.lgdj.fr/contentieux-de-la-circulation-routiere-9782721220295.html>.
- [34] Nina JELLETRUP, Barbara METZ et Siegfried ROTHE. “Can talking on the phone keep the driver awake?: results of a field-study using telephoning as a countermeasure against fatigue while driving”. Anglais. In : *Sciences Engineering Medicine*, 2011, p. 1-12. URL : <https://trid.trb.org/view/1345975>.

- [35] JONATHAN LEDY. "Stratégie d'adaptation de liens sur canaux radios dynamiques pour les communications entre véhicules - Optimisation de la qualité de service". Thèse de doct. Université de Poitiers, 2012. URL : <http://theses.univ-poitiers.fr/notice/view/20622>.
- [36] JOSEPH ABDO. *Construire de nouvelles infrastructures routières*. French. Rapport. Centre d'Information sur le Ciment et ses Applications, 2011.
- [37] Uffe B. KJAERULFF et Anders L. MADSEN. *Bayesian Networks and Influence Diagrams*. Anglais. Sous la dir. de Michael JORDAN, Jon KLEINBERG et Bernhard SCHOLKOPF. Information Science and Statistics. doi: 10.1007/978-0-387-74101-7. New York, NY : Springer New York, 2008. ISBN : 978-0-387-74100-0 978-0-387-74101-7. URL : <http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-74101-7> (visité le 07/11/2017).
- [38] Nerijus KUDARAUSKAS. "Analysis of emergency braking of a vehicle". In : *Transport* 22.3 (jan. 2007), p. 154-159. ISSN : 1648-4142. DOI : 10.1080/16484142.2007.9638118. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/16484142.2007.9638118> (visité le 15/03/2018).
- [39] Damien LÉGER et al. *Somnolence et risque accidentel*. French. Rapp. tech. Conseil National de la Sécurité Routière, 2017. URL : <https://www.conseil-securite-routiere.fr/wp-content/uploads/2017/06/Focus-thematique-SR-somnolence-et-risque.pdf>.
- [40] Philippe LERAY et Olivier FRANCOIS. "Réseaux bayésiens pour la classification Méthodologie et illustration dans le cadre du diagnostic médical". In : *Revue d'Intelligence Artificielle* 18 (avr. 2004), p. 169-193. DOI : 10.3166/ria.18.169-193.
- [41] Kevin C. LEE, Uichin LEE et Mario GERLA. "Survey of Routing Protocols in Vehicular Ad Hoc Networks". Anglais. In : *IGI Global* (2010), p. 149-170. DOI : 10.4018/978-1-61520-913-2.ch008. URL : <https://www.igi-global.com/chapter/survey-routing-protocols-vehicular-hoc/43169> (visité le 18/12/2017).
- [42] LOUIS LÉPINE. *La sécurité routière en France*. French. Rapp. tech. Préfecture de Police, 1893. URL : <http://www.paris1900.fr/wp-content/uploads/2012/10/code-route-1893-louis-lepine.pdf>.
- [43] LYDIE NOUVELIÈRE. "Commandes robustes appliquées au contrôle assisté d'un véhicule à basse vitesse". Thèse de doct. Université de Versailles-Saint Quentin en Yveline, 2002. URL : <https://www.theses.fr/2002VERS0023>.
- [44] C J MANN. "Observational research methods. Research design II: cohort, cross sectional, and case-control studies". In : *Emergency Medicine Journal* 20.1 (2003), p. 54-60. ISSN : 1472-0205. DOI : 10.1136/emj.20.1.54. eprint : <http://emj.bmj.com/content/20/1/54.full.pdf>. URL : <http://emj.bmj.com/content/emered/20/1/54.full.pdf>.
- [45] MAXWELL G. LAY. *Ways of the World: A History of the World's Roads and of the Vehicles That Used Them*. Anglais. Rutgers University Press, 1992. ISBN : 9780813526911. URL : <https://www.abebooks.co.uk/9780813526911/Ways-World-History-Worlds-Roads-0813526914/plp>.
- [46] Mohamed Nidhal MEJRI, Jalel BEN-OTHTMAN et Mohamed HAMDI. "Survey on VANET security challenges and possible cryptographic solutions". Anglais. In : *Vehicular Communications* 1.2 (avr. 2014), p. 53-66. ISSN : 2214-2096. DOI : 10.1016/j.vehcom.2014.05.001. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214209614000187> (visité le 18/12/2017).

- [47] Gérard MALCUIT, Andrée POMERLEAU et Paul MAURICE. *Psychologie de l'apprentissage : termes et concepts*. Sous la dir. de MALOINE. 1995. ISBN : 2891301587.
- [48] Kevin P. MURPHY. "The Bayes Net Toolbox for MATLAB". Anglais. In : 2001. URL : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.25.1216> (visité le 02/10/2015).
- [49] Patrick NAIM et al. *Réseaux bayésiens*. 3eme. Eyrolles, nov. 2007. URL : </Informatique/Livre/reseaux-bayesiens-9782212119725> (visité le 19/07/2017).
- [50] Richard E. NEAPOLITAN. *Learning Bayesian Networks*. Anglais. Prentice-Hall, Inc., avr. 2003. ISBN : 978-0-13-012534-7. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1198020> (visité le 14/09/2015).
- [51] NORSYS SOFTWARE CORPS., éd. *Netica API Programmer's Library - Reference Manual*. 2010. URL : http://www.norsys.com/downloads/NeticaAPIMan_C.pdf.
- [52] ONISR. *La sécurité routière en France*. French. Rapp. tech. Observatoire national interministériel de la sécurité routière, 2010.
- [53] ONISR. *L'accidentalité routière en 2013*. Rapp. tech. Observatoire national interministériel de la sécurité routière, sept. 2014. URL : <http://www.securite-routiere.gouv.fr/la-securite-routiere/l-observatoire-national-interministeriel-de-la-securite-routiere/accidentalite-routiere/les-premiers-resultats> (visité le 09/09/2015).
- [54] ONISR. *L'accidentalité routière en 2009*. French. Rapp. tech. Observatoire national interministériel de la sécurité routière, 2016. URL : http://www.securite-routiere.gouv.fr/content/download/3075/26980/version/3/file/SRB09_BAT_001_316__cle73bfe5.pdf.
- [55] ONISR. *L'accidentalité routière en 2016*. French. Rapp. tech. Observatoire national interministériel de la sécurité routière, 2016. URL : <http://www.securite-routiere.gouv.fr/la-securite-routiere/l-observatoire-national-interministeriel-de-la-securite-routiere/accidentalite-routiere/bilans-annuels>.
- [56] OUSSAMA DERBEL. "Modélisation microscopique et macroscopique du trafic : Impact des véhicules automatisés sur la sécurité du conducteur". Thèse de doct. Université de Haute-Alsace, déc. 2014.
- [57] Judea PEARL. *Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference*. Anglais. Morgan Kaufmann Publishers Inc., déc. 1988. ISBN : 978-0-934613-73-6. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=52121> (visité le 18/09/2015).
- [58] PHILIPPE MARY. "Etude analytique des performances des systemes radio-mobiles en présence d'évanouissements et d'effet de masque". Thèse de doct. Université de Lyon, 2008. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00406310/document>.
- [59] PRÉVENTION ROUTIÈRE. *Statistiques d'accidents - APR*. Avr. 2016. URL : <https://www.preventionroutiere.asso.fr/2016/04/22/statistiques-daccidents/> (visité le 20/12/2017).
- [60] PRISCA STRAUB. "Erstes Todesopfer bei Autounfall". Allemand. In : *Histoire des sciences médicales* (2015). URL : <https://www.br.de/radio/bayern2/sendungen/kalenderblatt/1708-autounfall-erstes-todesopfer-100.html>.

- [61] ROBERT G. COWELL et al. *Probabilistic Networks and Expert Systems: Exact Computational Methods for Bayesian Networks*. Anglais. Springer Publishing Company, Incorporated. ISBN : 978-0-387-98767-5. DOI : [10.1007/b97670](https://doi.org/10.1007/b97670). URL : [//www.springer.com/la/book/9780387987675](http://www.springer.com/la/book/9780387987675) (visité le 24/01/2018).
- [62] Jean-Nicola RUSSO et al. "Risks Level Assessments for Automotive Application". Anglais. In : *IFAC-PapersOnLine*. 9th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles IAV 2016Leipzig, Germany, 29 June - July 2016 49.15 (2016), p. 163-168. ISSN : 2405-8963. DOI : [10.1016/j.ifacol.2016.07.726](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.726). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316310023> (visité le 04/10/2016).
- [63] Jean-Nicola RUSSO et al. "Risk Level Assessment for Rear-End Collision with Bayesian Network". In : *IFAC-PapersOnLine*. 20th IFAC World Congress 50.1 (juil. 2017), p. 12514-12519. ISSN : 2405-8963. DOI : [10.1016/j.ifacol.2017.08.2062](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2062). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896317327040> (visité le 24/01/2018).
- [64] SACHA BERNET. "Analyse du regard pour le développement d'indicateurs du risque. Application à la formation et l'évaluation des conducteurs." Thèse de doct. Université de Haute-Alsace, 2012.
- [65] J. M. SULLIVAN et M. J. FLANNAGAN. "Risk of fatal rear-end collisions: is there more to it than attention ?" English. In : 2003, p. 239-244. URL : <https://trid.trb.org/view.aspx?id=698814>.
- [66] SILAS FLINT. *The First Auto Laws in the United States*. Anglais. Silas Flint, 2014. ISBN : 2940046199086. URL : <https://www.barnesandnoble.com/w/the-first-auto-laws-in-the-united-states-silas-flint/1120422482>.
- [67] SMAIN FEMMAM. *Building Wireless Sensor Networks - 1st Edition*. Anglais. Elsevier, sept. 2017. ISBN : 978-1-78548-274-8. URL : <https://www.elsevier.com/books/building-wireless-sensor-networks/femmam/978-1-78548-274-8> (visité le 18/12/2017).
- [68] Lennart SJOBERG, Bjorg-Elin MOEN et Torbjorn RUNDMO. *Explaining risk perception: An evaluation of the psychometric paradigm in risk perception research*. Anglais. 84. Rotunde, 2004. ISBN : 82-7892-024-9. URL : http://www.svt.ntnu.no/psy/torbjorn.rundmo/psychometric_paradigm.pdf.
- [69] Heikki SUMMALA. "Brake Reaction Times and Driver Behavior Analysis". In : 2 (sept. 2000), p. 217-226.
- [70] Jacques VALLIN et Jean-Claude CHESNAIS. "Impact of Realistic Simulation on the Evaluation of Mobile Ad Hoc Routing Protocols". In : *Institut National d'Etudes Démographiques* 30.3 (1975), p. 443-478. DOI : [10.2307/1531348](https://doi.org/10.2307/1531348). URL : <http://www.jstor.org/stable/1531348>.
- [71] Marvin ZUCKERMAN et al. "Development of a sensation-seeking scale." In : *Journal of Consulting Psychology* 28.6 (1964), p. 477-482. ISSN : 0095-8891(Print). DOI : [10.1037/h0040995](https://doi.org/10.1037/h0040995).

Annexe A

Annexes

A.1 Tableaux de probabilités

Dans cette partie, nous développons les tableaux de probabilités pour le reste des embranchements : le bloc a_{\max} et l'intention de freinage du véhicule Front. Nous rappelons au lecteur que les nœuds observés non pas de tableau de probabilités a priori car ils sont directement mesurés.

A.1.1 Nœud a_{\max}

Comme le montre la Fig. 2.10, les nœuds racines sont *Température* et *Précipitation*.

Nom du nœud	Température, 23
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	4

TABLEAU A.1 – Description du nœud Température

Comme décrit dans le Chapitre 2, le nœud *Température* possède quatre états voir Tableau A.1 : pour une température $T < -3$ °C, $-3 \leq T < 1$ °C, $1 \leq T < 4$ °C et $T \geq 4$ °C.

Nom du nœud	Précipitation, 24
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	3

TABLEAU A.2 – Description du nœud Précipitation

Le nœud *Précipitation* possède trois états : un état exprimant la présence de la pluie, un deuxième état le fait qu'il ait plu il y a moins d'une heure et le dernier état indique qu'il n'a pas plu (voir Tableau A.2). Les nœuds *Température* et *Précipitation* possède un enfant *Météo*.

Le nœud *Météo* possède trois états qui correspond à un état ensoleillé, de la pluie ou de la neige (voir Tableau A.3 et Tableau A.4).

Nous avons également une information de la météo au travers du nœud communiqué (et également observé) *Météo_{front}*.

Nom du nœud	Météo, 25
Nature	Estimé
Certitude sur le nœud	Incertain
Nombre d'états	3

TABLEAU A.3 – Description du nœud Météo

Précipitation			Température (°C)				Météo		
vrai	<=1h	faux	T<-3	-3 ≤ T <1	1 ≤ T <4	T ≥ 4	Soleil	Pluie	Neige
✓			✓				0	0,01	0,99
	✓		✓				0	0,05	0,95
		✓	✓				0,9	0	0,1
✓				✓			0	0,3	0,7
	✓			✓			0,05	0,1	0,85
		✓		✓			0,95	0	0,05
✓					✓		0	0,85	0,15
	✓				✓		0,05	0,9	0,05
		✓			✓		0,99	0	0,01
✓						✓	0	0,99	0,01
	✓					✓	0,05	0,95	0
		✓				✓	1	0	0

TABLEAU A.4 – Tableau de probabilités du nœud Météo

Nom du nœud	Météo _{front} , 26
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	4

TABLEAU A.5 – Description du nœud Météo_{front}

Dans le Tableau A.3, $Météo_{front}$ est un nœud communicant qui possède quatre états dont un état exprimant le fait que le nœud ne communique pas (soit parce qu'il n'y a pas de véhicule à portée, soit à cause des interférences), un état exprimant l'ensoleillement, la pluie et la neige. Ce dernier avec $Météo$ ont pour enfant *Etat de la Route*.

Nom du nœud	Etat de la Route, 27
Nature	Estimé
Certitude sur le nœud	Incertain
Nombre d'états	3

TABLEAU A.6 – Description du nœud Etat de la Route

L'*Etat de la Route* décrit l'état d'humidification de la route soit une route sèche, mouillée ou verglacée (voir le Tableau A.6). Il dépend de ses parents de la manière suivante décrit dans le Tableau A.7.

L'avant dernier nœud du bloc est l'*Etat du Véhicule*.

L'*Etat du Véhicule* possède deux états qui sont le véhicule est en mauvais (état 1) ou bon état (état 2) voir Tableau A.8. Cette information peut être fournie par certains véhicules, dans le cas où l'information n'est pas présente nous supposons que le contrôle technique ne permet la circulation que des bons véhicules. Le dernier nœud a_{max} est décrit dans le Tableau A.9 ainsi que sa dépendance vis-à-vis de ses parents dans le Tableau A.10.

A.1.2 Nœud Intention de freinage

Le nœud *Intention de Freinage* dépend des nœuds $Risque_{front}$, a_{front} et *Contexte*. Ces trois nœuds sont mesurés, ils ne possèdent donc pas de tableau de probabilités a priori.

Dans le Tableau A.11, nous notons que le nœud $Risque_{front}$ possède trois états qui sont vert, orange et rouge. Cela correspond au risque le plus élevé du véhicule Front. Nous appelons risque plus élevé lorsqu'un état a atteint la valeur seuil de 10 % en tenant compte de la priorité suivante rouge > orange > vert.

a_{front} possède également trois états dans le but de décrire le type de décélération qui peut-être faible (ou positive), forte ou d'urgence (voir Tableau A.12).

Comme montré dans le Chapitre 2, le nœud *Contexte* possède un état 1 définissant un lieu non dangereux et un état 2 où le conducteur doit prendre beaucoup plus de précaution voir Tableau A.13 et Tableau A.14.

Météo front				Météo			Etat Route		
Pas message	Soleil	Pluie	Neige	Soleil	Pluie	Neige	Sèche	Mouillée	Verglacée
✓				✓			1	0	0
	✓			✓			1	0	0
		✓		✓			0,55	0,45	0
			✓	✓			0,55	0	0,45
✓					✓		0	1	0
	✓				✓		0,45	0,55	0
		✓			✓		0	1	0
			✓		✓		0	0,55	0,45
✓						✓	0	0	1
	✓					✓	0,45	0	0,55
		✓				✓	0	0,45	0,55
			✓			✓	0	0	1

TABLEAU A.7 – Tableau de probabilités du nœud Etat de la Route

Nom du nœud	Etat Véhicule, 28
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	2

TABLEAU A.8 – Description du nœud Etat du Véhicule

Nom du nœud	a_{\max} , 29
Nature	Estimé
Certitude sur le nœud	Incertain
Nombre d'états	3

TABLEAU A.9 – Description du nœud a_{\max}

Etat du Véhicule		Etat de la Route			a_{\max}		
1	2	Sèche	Mouillée	Verglacée	urgence	fort	faible
✓		✓			0,8	0,15	0,05
	✓	✓			0,98	0,02	0
✓			✓		0	0,75	0,25
	✓		✓		0,05	0,8	0,15
✓				✓	0	0	1
	✓			✓	0	0,01	0,99

TABLEAU A.10 – Tableau de probabilités du nœud a_{\max}

Nom du nœud	Risque _{front} , 29
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	3

TABLEAU A.11 – Description du nœud Risque_{front}

Nom du nœud	a _{front} , 29
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	3

TABLEAU A.12 – Description du nœud a_{front}

Nom du nœud	Contexte, 29
Nature	Observé
Certitude sur le nœud	Déterministe
Nombre d'états	2

TABLEAU A.13 – Description du nœud Contexte

Contexte		a front			Risque front			Intention de Freinage			
1	2	faible	fort	urgence	vert	orange	rouge	faible	fort	urgence	>urgence
✓		✓			✓			0,9	0,099	0,001	0
	✓	✓			✓			0	0,01	0,99	0
✓			✓		✓			0,001	0,9	0,099	0
	✓		✓		✓			0	0,001	0,999	0
✓				✓	✓			0	0	1	0
	✓			✓	✓			0	0	1	0
✓		✓				✓		0,001	0,9	0,099	0
	✓	✓				✓		0	0,001	0,999	0
✓			✓			✓		0	0,8	0,2	0
	✓		✓			✓		0	0,0001	0,9999	0
✓				✓		✓		0	0	1	0
	✓			✓		✓		0	0	1	0
✓		✓					✓	0	0	0	1
	✓	✓					✓	0	0	0	1
✓			✓				✓	0	0	0	1
	✓			✓			✓	0	0	0	1

TABLEAU A.14 – Tableau de probabilités du nœud Intention de Freinage