

L' ANALYSE DES TRAJECTOIRES DE VEHICULES : UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA SECURITE ROUTIERE

B. JACOB & F. PEYRET

Institut français des sciences et technologies des transport, de l'aménagement et des réseaux (IFSTARR), France

bernard.jacob@ifstarr.fr, francois.peyret@ifstarr.fr

E. VIOLETTE

Centre d'Etude Technique de l'Équipement Normandie Centre (CETE NC)

eric.violette@developpement-durable.gouv.fr

RESUME

Les accidents de la route tuent chaque année 1,3 million et blessent 50 millions de personnes dans le monde. Les chiffres sont à la hausse dans les pays émergents, mais à la baisse dans les pays développés grâce aux progrès sur les véhicules, les infrastructures et les comportements de conduite. Cependant on dénombre encore 40 000 morts par an sur les routes européennes, et l'UE vise à diviser ce chiffre par 2 d'ici 2020. A cause du faible taux de tués par km.passager et des causes multiples d'un accident, les statistiques d'accident seules deviennent insuffisantes pour les recherches visant à réduire encore la mortalité routière. Des recherches ont donc été entreprises sur la modélisation et la mesure des trajectoires de véhicules pour évaluer les interactions véhicule-infrastructure-conducteur, et identifier les "presque accidents", indicateurs de comportements de conduite inadéquats ou de zones à risque de l'infrastructure. Par trajectoire on entend la position, la vitesse, l'accélération et le jerk du véhicule, fonctions du temps. Plusieurs technologies sont disponibles pour mesurer des trajectoires, soit en bord de voie soit en embarqué. Cet article présente l'intérêt des observatoires de trajectoires, leurs limites actuelles et perspectives de développement. Il donne un aperçu des techniques de modélisation et de mesure issues de plusieurs projets du programme national PREDIT, et décrit quelques études de cas en virages, intersections, et sur routes à faible trafic.

1. ENJEUX DE L'UTILISATION DES TRAJECTOIRES DE VEHICULES POUR LA SECURITE ROUTIERE

1.1. Enjeux de la sécurité routière

Les accidents de la route tuent environ 1,3 millions de personnes par an dans le monde, soit 3500 par jour ou encore une toute les 25 secondes. 50 millions d'autres sont blessées ou handicapées chaque année, dont 90% dans les pays en développement. Les enfants, piétons, cyclistes et personnes âgées sont les usagers les plus vulnérables. Le coût total des accidents est estimé entre 65 et 100 milliards de US\$ par an dans le monde, soit 0,5 à 3% du PNB selon le niveau de motorisation du pays.

Le tableau 1 donne les chiffres de la mortalité routière dans la plupart des pays développés et BIC (Brésil, Inde, Chine), selon l'OMS, et l'OCDE en cas d'écart. Le nombre total de morts annuels rapportés dans ce tableau dépasse juste 400 000, soit moins du tiers du total mondial. Sans les pays BIC, il tombe à 182 000, et même à 120 000 pour les pays de l'OCDE, soit moins de 10% du total mondial.

Les différences entre les chiffres de l'OMS et de l'OCDE soulignent la difficulté d'obtenir des données fiables, même sur les tués (à 30 jours), tandis que d'autres organisations comme la Fédération routière internationale (IRF), la banque mondiale ou le Transport

Research Laboratory (TRL) au Royaume-Uni donnent encore d'autres chiffres [1]. Dans beaucoup de pays les statistiques de la police sous-estiment largement les tués, jusqu'à 40 ou 50% au Brésil et en Chine, par comparaison avec d'autres sources d'information [1].

Tableau 1 – Tués sur les routes par pays (OMS/OCDE, 2004)

Pays	Taux de tués par h.	Population (millions)	Nombre de tués	Pays	Taux de tués par h.	Population (millions)	Nombre de tués
Pays-Bas	4,93	16,3	804	Hongrie	12,96	10	1 296
Suède	5,33	9	480	Turquie	13,0/8,0	68,9	8 957
Royaume-Uni	5,34/5,7	60,3	3 220	Rép. Tchèque	13,55	10,2	1 382
Japon	5,76/7,5	127,7	7 356	Belgique	14,2/10,9	10,3	1 463
Suisse	6,85	7,45	510	Ukraine	14,51	48	6 965
Allemagne	7,09	82,4	5 842	États-Unis	14,53	293,5	42 646
Australie	7,94/8,6	20,1	1 596	Corée du sud	14,7	48,1	7 071
Inde	8,33	1,080,3	89 989	Pologne	14,8	38,6	5 713
Canada	8,56	31,9	2731	Grèce	15,27/13,5	10,6	1 619
France	8,67/9,2	60,4	5 237	Roumanie	17,42	22,4	3 902
Portugal	10,81/12,4	10,5	1 135	Malaisie	21,04	23,9	5 029
Italie	11,5/10,3	58	6 670	Russie	24,1	143,7	34 631
Espagne	11,79	40,3	4 751	Iran	38,7	68	26 316
Brésil	12,8	180	23 040	Chine *	(8,26)	1,296,5	(107 091)

N.B. Pays classés par taux de tués par habitants croissant, exprimé pour 100 000 habitants.

Le second chiffre est celui de l'OCDE s'il diffère significativement de celui de l'OMS.

* Il est admis que le taux de tués par habitant en Chine est très supérieur au chiffre officiel, d'où la position de ce pays en fin de liste.

Les différences entre les taux de tués sont importantes, avec des chiffres allant de 4,5 à plus de 30 pour 100 000 habitants, selon les régions, type de pays et autres facteurs. En outre les décès augmentent avec la croissance du trafic dans les pays émergents, jusqu'à 20 ou 25% sur dix ans, tandis que les progrès rapides de la sécurité passive et active des véhicules, et de la qualité des infrastructures, et l'amélioration des comportements de conduite résultant d'une meilleure éducation et des sanctions, ont réduit la mortalité de 20 à 40% sur la même période dans les pays développés et de l'OCDE. Pourtant 40 000 morts sont encore à déplorer chaque année sur les routes européennes, et l'UE vise à diviser ce chiffre par deux à l'échéance 2020.

1.2. Trajectoires de véhicules et prévention des accidents de la route

Du fait du faible taux de tués par km.passager ou par km de route, surtout dans les pays développés où les causes les plus évidentes d'accident ont déjà été traitées, mais aussi par la complexité et la multiplicité de ces causes, les seules statistiques d'accident sont très insuffisantes pour les recherches visant à réduire encore la mortalité et les blessés. Le LCPC (devenu IFSTTAR depuis la fusion avec l'INRETS le 1/1/2011), a donc entrepris depuis 2003 des recherches sur la modélisation et la mesure des trajectoires de véhicules, et sur la détection des "presque accidents" ou accidents évités, comme indicateurs de risque accru, de comportements de conduite inadéquats vis à vis des conditions d'environnement et de l'infrastructure, ou de zones à risque de l'infrastructure.

L'idée de base est de développer un nouveau concept de "trajectoire étendue" de véhicule, non limitée à la trace sur la route, mais incluant la position en 3-D, les vitesses, accélérations et jerk si besoin, comme fonctions du temps, ou encore les coordonnées du véhicule et ses dérivées par rapport au temps jusqu'au 2^e ou 3^e ordre. Des modèles

déterministes et probabilistes de ces trajectoires ont été développés et mis en œuvre, pour analyser finement le résultat de l'interaction véhicule-infrastructure-conducteur, donc la trajectoire, et la relier aux paramètres d'environnement et de contexte, comme le comportement de conduite, la géométrie ou les performances de l'infrastructure (par ex. rayon de courbure, pente, adhérence, etc.) et du véhicule.

Les trajectoires défectueuses ou défailtantes sont définies par rapport à des états limites prédéfinis ou des modes de défaillance, pour estimer le niveau de sécurité ou le risque de situations et scénarii. On ne considère pas seulement les accidents graves ou avérés, mais aussi des situations d'insécurité fréquemment rencontrées comme indicateur de risque. Par ex. une roue mordant sur une bande d'arrêt d'urgence, une voie adjacente ou un accotement, sera considérée comme un "presque accident" ou accident évité, résultant d'une perte de contrôle partielle du véhicule, et donc d'une vitesse ou d'une action de conduite inadéquate, vis-à-vis des performances de la route et du véhicule et des conditions d'environnement. De tels événements ne sont pas rares, et donc accessibles aux statistiques courantes, permettant de prédire et prévenir des défaillances plus graves comme les accidents. Ces outils et méthodes permettent de passer d'un traitement curatif de l'insécurité routière, comme celui des points noirs après une série de tués et blessés, à des mesures de prévention, comme des alertes aux conducteurs, une route lisible, une information routière dynamique, des systèmes d'assistance avancée à la conduite (ADAS), etc. L'évaluation de telles mesures se fait en analysant leur impact sur le taux de presque accidents, ou sur la probabilité de défaillance vis-à-vis de tels états limites. Outre l'économie de nombreux morts et blessés, l'évaluation est bien plus fiable en se basant sur la réduction d'une probabilité significative de défaillance, par ex. de 10^{-1} à 10^{-3} , qu'en travaillant avec des probabilités très faibles de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-6} .

Ensuite, les observatoires de trajectoires sont destinés à fournir, traiter et stocker des mesures et données objectives et nombreuses sur les trajectoires étendues de véhicules. L'analyse de ces trajectoires permet de construire des indicateurs sur la dangerosité de l'usage des infrastructures routières. Plusieurs projets de recherche ont utilisé cette approche pour les virages, intersections, et routes à faible trafic, dont le programme SARI du PREDIT 3 et ses projets : RADARR, VIZIR, IRCAD, etc. [2].

2. OBSERVATOIRES DE TRAJECTOIRES ET LEURS APPLICATIONS

1.1. Mesures et observatoires de trajectoires

L'ensemble des outils matériels et logiciels nécessaires à l'acquisition, au traitement et à l'analyse des données, comme ceux décrits aux paragraphes 3.3 à 3.6, sont appelés « Observatoires de trajectoires », ainsi que les bases de données qu'ils produisent, par extension. Suivant l'application et les ressources financières disponibles, différents outils de mesure peuvent être utilisés. Dans la plupart des cas, l'observation des trajectoires requiert de combiner plusieurs capteurs, qui peuvent aussi dépendre du type de véhicule et des conditions de trafic. Les véhicules légers et les poids lourds se comportent différemment et par conséquent produisent des trajectoires différentes. Un véhicule peut être « isolé », « libre », appartenant à un « convoi » ou contraint par les autres véhicules (Figure 1), suivant les définitions proposées par le glossaire développé dans cette recherche [3].

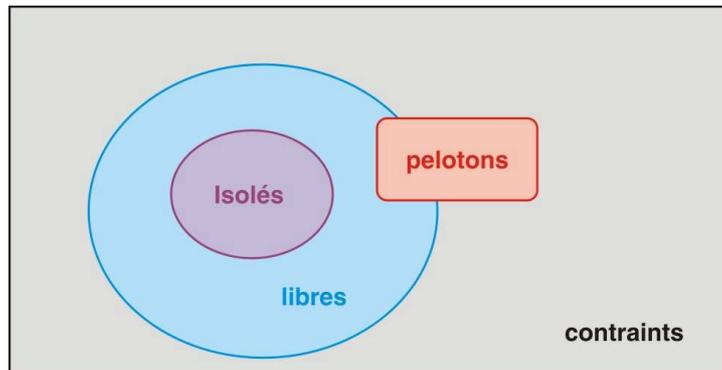


Figure 1 – Diverses situations de véhicule dans un trafic (CETE Normandie-Centre)

L'analyse de la trajectoire d'un véhicule nécessite de connaître les conditions limites, c-a-d les trajectoires des véhicules précédents, et les paramètres d'environnement qui peuvent être enregistrés par une caméra vidéo.

2.1. Différents types d'observatoires de trajectoires

Quatre catégories d'observatoires ont été définies (Tableau 2), en fonction de la localisation de l'équipement de mesure (à bord du véhicule ou à l'extérieur), et de l'échelle de la mesure de trajectoire (locale ou globale). Les mesures embarquées (internes) sont réalisées par des véhicules instrumentés alors que les mesures externes le sont par des dispositifs en bord de voie. Les deux types de systèmes sont complémentaires :

- MITL/MITG : véhicules instrumentés dédiés qui fournissent en général des données détaillées (en termes de résolution et de précision) pour un nombre limité de trajectoires d'un petit échantillon de conducteurs,
- METL/METG : outils de bord de voie qui fournissent des données de qualité moindre, mais pour toute la population d'un échantillon important de conducteurs sur une portion donnée de la route (analyse de type micro-traffic).

Tableau 2 - Classification des observatoires de trajectoires

	Moyens internes	Moyens externes
Trajectoires "locales" sur des zones limitées < 100m	(1) Mesure Interne des Trajectoires Locales (MITL)	(2) Mesure Externe des Trajectoires Locales (METL)
Trajectoires "globales" sur des itinéraires > 100 m	(3) Mesure Interne des Trajectoires Globales (MITG)	(4) Mesure Externe des Trajectoires Globales (METG)
Trajectoires "de référence"	(5) Mesure de référence des trajectoires (MRT)	

2.2. Véhicules instrumentés (Observatoires embarqués)

Ces véhicules peuvent être de différent type selon l'objectif, depuis les véhicules lourdement équipés, dédiés aux études nécessitant de la précision et de la richesse d'information, généralement uniques étant donné leur coût, jusqu'aux véhicules très légèrement équipés, qui peuvent être produits en grand nombre, comme dans le cadre de projets européens de type Field Operational Test (FOT). On peut citer :

- les systèmes de mesure de référence des trajectoires (MRT), qui peuvent être installés dans des véhicules différents moyennant des adaptations légères et qui sont conçus pour obtenir de très bonnes performances,
- les véhicules lourdement instrumentés, qui sont utilisés, en conjonction avec des logiciels de simulation de dynamique des véhicules, pour produire des trajectoires correspondantes à des situations « limite » sur des zones particulières,
- les véhicules modérément équipés qui mesurent des trajectoires en situation courante de conduite, généralement globales, mais pouvant être éventuellement locales,

- les véhicules légèrement équipés et le plus discrètement possible, utilisés sous forme de flottes pour des études de type « conduite en situation naturelle », surtout pour des trajectoires globales.

Les deux premiers types de véhicules sont généralement uniques à l'échelle d'un organisme de recherche et sont conduits par des conducteurs spécialisés. Les véhicules du 3^{ème} type peuvent être dupliqués à quelques exemplaires et sont conduits par un échantillon représentatif de conducteurs sélectionnés tandis que ceux du 4^{ème} type peuvent être plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines, et peuvent être conduits par des conducteurs quelconques.

2.3. Observatoires de bord de voie

Il existe également plusieurs types de systèmes de bord de voie, tels que : (i) les systèmes d'analyse du micro-traffic, (ii), les systèmes de détection de conflits de trafic et (iii) les systèmes de mesure de trajectoires locales.

(i) Les systèmes d'analyse du micro-traffic

Ces systèmes sont conçus pour analyser finement le trafic. Ils sont généralement capables de mesurer pour tous les véhicules et à plusieurs endroits :

- la position latérale du véhicule, ou au moins la voie de circulation,
- la vitesse longitudinale,
- la catégorie du véhicule,
- le temps de passage et donc le temps inter-véhiculaire.

Ces systèmes, de type (2) ou (4) (tableau 2) sont généralement mis en œuvre pour une étude particulière de comportement des usagers, soit sur un segment donné du réseau routier, typiquement de quelques kilomètres, soit sur un point noir localisé.

(ii) Les systèmes de détection de conflits de trafic

Ces systèmes sont conçus pour une application très spécifique, la détection des situations conflictuelles entre les véhicules, généralement aux intersections. Ils sont capables de fournir les informations suivantes :

- vitesse des véhicules,
- temps à collision,
- indices de risque,
- enregistrements vidéo des situations dangereuses, etc.

Ces informations sont utiles au gestionnaire de la route pour bien comprendre le risque d'accidents sur un point noir et pour évaluer le bénéfice d'une modification de l'infrastructure. L'indice de risque permet l'inter-comparaison entre différentes intersections ou points noirs. Un exemple d'un tel système est donné au 4.2.

(iii) Les systèmes de mesure de trajectoires locales

Ces systèmes sont dédiés aux études de points noirs, comme les virages dangereux. Ils sont conçus pour enregistrer, aussi précisément que le permet la technologie déployée, les trajectoires complètes de tous les véhicules, afin de détecter les comportements anormaux, révélateurs d'un dysfonctionnement du système route-véhicule-conducteur. Plus de détails sur ce type d'observatoires seront donnés au paragraphe 3.5 et un exemple de réalisation sera décrit au 4.1.

3. MODELES DE TRAJECTOIRES ET OUTILS DE MESURE

3.1. Modélisation des trajectoires et les états limites

La trajectoire conventionnelle d'un véhicule est une fonction continue $\tilde{F}(t): \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^3$ (resp. \mathbb{R}^6), qui représente le vecteur de position du centre de gravité du véhicule dans l'espace 3D (resp. le centre de gravité et les angles d'Euler) à tout t . Le véhicule est représenté par un point pesant (resp. un vecteur orienté avec une masse). La trace est la projection de la trajectoire dans \mathbb{R}^3 ou \mathbb{R}^6 , sans mention au temps.

Pour aborder les questions de sécurité routière et réaliser des analyses plus détaillées de l'interaction véhicule-conducteur-infrastructure, il faut prendre les dérivées (à l'ordre 2 ou 3) de ce vecteur, soit la vitesse, l'accélération et le jerk pour le confort. La trajectoire complète ou étendue, $F(t)$, est une fonction: $\mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^9$ or \mathbb{R}^{12} (resp. \mathbb{R}^{18} ou \mathbb{R}^{24}), dont les composantes ne sont pas indépendantes, mais liées par la formule de dérivation. Ces composantes apparaissent explicitement dans les états limites de sécurité ou de confort.

Du fait de ces relations entre composantes de $F(t)$, qui doivent en outre satisfaire des équations de la cinématique et des conditions aux limites, les trajectoires dites admissibles constituent un sous-ensemble de l'espace réel multidimensionnel, soit une variété (par ex. une courbe, une surface, etc.) de \mathbb{R}^n . Il faut une métrique dans l'espace des trajectoires pour les comparer, identifier celles qui sont sûres ou dangereuses vis à vis d'états limites et de domaines de sécurité. Ceci n'est pas évident car la distance euclidienne de \mathbb{R}^n n'est pas adaptée. En effet, si on considère la trajectoire d'un premier véhicule $F_1(t)$, et celle d'un second véhicule $F_2(t)=F_1(t+h)$, où $h>0$, la distance euclidienne $\|F_2(t)-F_1(t)\| = \|F_1(t+h)-F_1(t)\| \neq 0$, tandis que les deux véhicules ont exactement le même comportement en termes de position, vitesse, accélération et jerk comme fonctions du temps, et uniquement un décalage temporel. Une distance adaptée devrait donner $\|F_2(t)-F_1(t)\|=0$ dans ce cas, tout en distinguant deux trajectoires avec la même trace (dans l'espace), mais pas la même loi horaire. Suite à des recherches bibliographiques, la distance de Mahalanobis a été retenue [4]. Elle est basée sur la corrélation entre variables, et permet de déterminer la similitude entre deux séries de données. Tandis que la distance euclidienne donne la même pondération à toutes les composantes d'un vecteur, celle-ci sous-pondère les composantes les plus bruitées (pour les variables gaussiennes).

Les états limites sont définis comme les modes de défaillance possible de la trajectoire d'un véhicule. Comme en sécurité des structures, nous avons introduit les états limites ultimes comme des situations irréversibles, par ex. un accident avec des dommages plus ou moins importants aux personnes et/ou au véhicule. Tel est le cas pour les collisions sur obstacles fixes, avec d'autres véhicules ou des piétons, ou encore des sorties de voies. Parmi ces accidents, seule une faible proportion induisent des morts ou blessés graves et sont donc rapportés dans les statistiques de sécurité routière. Comblent les lacunes de ces statistiques est un premier pas, mais ne suffit pas dans les pays développés où les politiques de sécurité routière et réglementations, avec les contrôles et sanctions, ont déjà fait chuter les taux d'accidents très bas. Il est donc nécessaire d'introduire des états limites de service, événements révélateurs de comportements dangereux comme les presque accidents ou accidents évités, totalement réversibles, qui n'induisent aucun dommage au véhicule, à l'infrastructure ni bien sûr aux personnes, et sont même indétectables sans une instrumentation dédiée. Mordre sur une bande d'arrêt d'urgence, dérapier légèrement ou encaisser une accélération transversale excessive vis-à-vis de la sécurité ou du confort font parties de ces états limites de service. Ils sont beaucoup plus fréquents que les accidents, d'un facteur 1000 à 100 000, et donc, bien enregistrés et analysés, ils peuvent

alimenter des bases de données beaucoup plus fiables et utiles pour la prévention des accidents et l'amélioration de la sécurité routière.

Le but de l'analyse des trajectoires est de relier les défaillances vis à vis des états limites de service ou ultimes aux caractéristiques de l'infrastructure, des véhicules et des commandes de conduite, ainsi qu'aux conditions d'environnement (visibilité, conditions météo, etc.). Des études de sensibilité ont été réalisées ou sont à réaliser pour mettre en évidence les mesures les plus efficaces sur les équipements et aménagements de l'infrastructure, la conception et maintenance des véhicules, et les comportements de conduite (éducation, information) pour réduire les risques de défaillance [2].

Compte tenu du caractère aléatoire de nombreux paramètres de la route des véhicules, mais surtout liés aux facteurs et comportements humains, une approche probabiliste de l'analyse des trajectoires a été proposée. Les trajectoires sont représentées par des processus stochastiques, et on utilise soit des outils de la théorie de la fiabilité [5] pour certaines variables aléatoires de contrôle avec lesquelles on peut formuler les états limites, soit des outils probabilistes avancés de la théorie des processus stochastiques et une classification de ces processus [4], pour estimer les probabilités de défaillance, puis les risques, en tenant compte des conséquences de ces défaillances.

Pour caler, valider et alimenter ces modèles de trajectoires, des mesures nombreuses et fiables sont requises (voir section 3.3). Les modèles sont alors utilisés simuler des scénarii variés impossible à observer ou enregistrer sur route, voire même sur pistes d'essai, notamment près des états limites ultimes, ce qui est très utile pour estimer des très faibles probabilités de défaillance.

3.2. Données nécessaires et méthodes de mesure

Comme expliqué au paragraphe 3.1, une trajectoire complète est composée d'une suite de positions 3D datées, et éventuellement d'angles d'attitude du véhicule, direction (ou cap), roulis et tangage. Pour les études de sécurité routière, il n'y a pas d'intérêt particulier à mesurer et analyser la composante verticale. De plus, les angles de roulis et de tangage ne sont pas traités puisque nous ne considérons pas la dynamique du véhicule ni les modes de défaillance par renversement. Par conséquent, les coordonnées X-Y du centre de gravité (et éventuellement l'angle de cap) dans le plan horizontal sont les paramètres de trajectoire suffisants pour notre objectif. Même s'il est théoriquement possible de déduire des coordonnées planes X-Y les dérivées successives : vitesses, accélérations et jerks, à condition que la fréquence d'acquisition soit suffisamment élevée et les mesures de bonne qualité, cette opération est en pratique très difficile et il est intéressant de considérer toute possibilité de mesurer ces dérivées directement.

Finalement, les paramètres de trajectoire intéressants à mesurer sont :

- la position 2D du véhicule sur la route, c'est-à-dire son abscisse curviligne le long de la route et sa position transversale par rapport à l'axe central de la voie,
- l'angle de direction (ou de cap),
- la vitesse longitudinale,
- les accélérations longitudinales et transversales.

L'ensemble minimum de paramètres à considérer, de même que la qualité de leur mesure, dépendent grandement de l'objectif de l'étude. Différentes technologies peuvent être utilisées, suivant l'application, le type d'observatoire (embarqué ou en bord de voie) et les moyens financiers disponibles. Le tableau 3 indique l'adéquation des principales

technologies disponibles vis-à-vis des paramètres de trajectoire. Les paragraphes suivants introduisent différents systèmes de mesure pour différentes applications.

Table 3 – Intérêt des technologies de mesure vis-à-vis des paramètres de trajectoire

Paramètre	Technologie	GPS	IMU*	Traitement d'image	Radar	Lidar
Position plane	Embarqué	xxx	xx	xx	x	x
	Bord de voie			xx	x	xx
Angle de cap	Embarqué	x	xxx	x		
	Bord de voie			x	x	x
Vitesse longitudinale	Embarqué	xx	xxx		x	x
	Bord de voie			x	xx	x
Accélération	Embarqué		xxx			
	Bord de voie				x	

Légende : x = intérêt faible, xx = intérêt moyen, xxx = intérêt fort, autrement = pas d'intérêt

* *Inertial Measurement Unit* = centrale inertielle

3.3. Outil de référence et de calibration

Pour calibrer et valider les modèles de trajectoires évoqués au 3.1, nous avons besoin d'échantillons de trajectoires mesurées avec précision, avec une grande résolution temporelle, un faible niveau de bruit et sans biais significatif. De tels échantillons de trajectoires de grande qualité sont également nécessaires pour calibrer les observatoires de trajectoires opérationnels, généralement de moindre qualité métrologique. Pour cette raison, un système de référence, appelé MRT (Mesure de Référence des Trajectoires) a été développé par l'IFSTTAR. Les composants métrologiques de ce système, principalement un récepteur GPS bi-fréquence *cinématique** et une centrale inertielle, ont été embarqués sur un véhicule spécifiquement dédié. Le GPS cinématique permet la précision absolue centimétrique alors que la centrale inertielle apporte la capacité de filtrage, assure la continuité en cas de masques GPS ainsi que la cadence élevée (100 Hz) des informations de sortie.

Table 4 - Principales performances du système de référence MRT

Paramètre de trajectoire	Précision (erreur RMS)	
	Quand GPS disponible	Après 2 mn de masque GPS
Angles d'attitude	0.01°	
Position plane	3.5 cm	15 to 30 cm *
Position verticale	5 cm	10 to 20 cm *
Vitesse (dans toutes les directions)	2 cm/s (0.07 km/h)	

* en post-traitement ou en temps réel

L'outil MRT de l'IFSTTAR a été utilisé dans de nombreux projets de recherche depuis fin 2008. Les sorties X-Y-Z du GPS cinématique bi-fréquence, les positions et angles déterminés par la centrale inertielle et les informations du codeur de distance du véhicule sont fusionnées à l'intérieur d'un logiciel dédié. La centrale à fibres optiques ®LandINS et le logiciel de fusion ont été achetés à la société française IXSEA. Le système MRT peut

* *Cinématique* se réfère au type de traitement pour lequel ce matériel est dédié, c'est-à-dire un traitement différentiel exploitant les codes et les phases des signaux sur les 2 fréquences L1 et L2 permettant d'atteindre des précisions de l'ordre de quelques centimètres sur des objets en mouvement

être utilisé en temps réel ou en traitement différé, ce dernier mode permettant des précisions finales 2 fois meilleures pendant les périodes de masquage GPS grâce à la possibilité offerte en temps différé de traiter les données dans le sens aller et le sens retour (temps décroissant). Le système est décrit dans [6] et ses performances principales sont indiquées au tableau 4.



Figure 2 - Le système MRT embarqué dans le véhicule d'essai VERT de l'IFSTTAR



Figure 3 – Logiciel de post-traitement de l'observatoire de trajectoires pour le diagnostic des points noirs

3.4. Véhicule instrumenté pour estimer les situations de conduite extrêmes

Le véhicule Renault Laguna instrumentée par CETE de Lyon est un outil de diagnostic de l'infrastructure, enregistrant le comportement dynamique d'un véhicule léger (position, vitesses, accélérations) et les commandes réelles appliquées par le conducteur sur différents itinéraires. Il est couplé à un modèle numérique avancé (Callas) simulant des situations de conduite « limites ». L'usage simultané de ces deux outils (véhicule instrumenté et modèle numérique) permet de déterminer les trajectoires limites sur différentes zones de l'infrastructure.

Ce véhicule permet de réaliser un ou plusieurs passages sur l'itinéraire à ausculter au cours desquels toutes les données traduisant le comportement du véhicule sont enregistrées. Ces données sont ensuite injectées dans le modèle numérique en même temps que le relevé des caractéristiques de l'infrastructure effectué par un appareil à grand rendement comme le VANI (Véhicule d'ANalyse d'Itinéraires). Les simulations numériques conduisent à tracer des profils de « vitesses limites » afin d'évaluer le risque pour l'usager en comparant ces vitesses avec les vitesses pratiquées ou les vitesses prescrites (signalisation). Les simulations permettent aussi de « rejouer » les situations de conduite en modifiant les caractéristiques de l'infrastructure routière, par exemple le dévers dans un virage ou bien les conditions de circulation, par exemple en réduisant les capacités d'adhérence de la route pour simuler des conditions météorologiques dégradées.

3.5. Outils de diagnostic de points noirs

Si l'objectif de l'observatoire de trajectoire est d'analyser les trajectoires de tous les véhicules passant sur un point supposé dangereux à diagnostiquer, typiquement un virage ou une intersection, l'observatoire doit dans ce cas être attaché à l'infrastructure et appartient à la classe 2 des observatoires présentés dans le Tableau 2. La technologie de

positionnement GNSS est inintéressante dans ce cas, le système doit utiliser des technologies de localisation à distance.

Quelques radars militaires très sophistiqués sont capables de suivre plusieurs objets en parallèle tout en déterminant leur trajectoire, mais ne sont pas accessibles aux applications civiles à cause de leur coût élevé. Les technologies accessibles de ce point de vue sont : les caméras vidéo associés au traitement d'images et les télémètres laser à balayage (encore appelés lidars), les deux étant complémentaires. Par exemple dans un virage, le lidar est mieux adapté à la trajectographie des véhicules dans la partie centrale du virage alors que les caméras vidéo apportent de meilleures informations à l'entrée et à la sortie du virage. Un logiciel de post-traitement doit fusionner les données pour estimer les trajectoires.

L'observatoire de trajectoires locales développé par l'IFSTTAR en collaboration avec l'Université de Clermont-Ferrand (laboratoire LASMEA), dans le cadre du projet national SARI/RADDAR [7] utilise pour la fusion de données une méthode de filtrage particulière et un modèle d'évolution de type « bicyclette ». Les particules représentent les positions possibles du véhicule et sont mises à jour par modification de leurs poids respectifs, à chaque fois qu'une mesure est disponible, par une méthode probabiliste de type « maximum de vraisemblance ». La meilleure estimée de la position du véhicule s'obtient par une moyenne pondérée des particules. Un écran du logiciel de post-traitement de l'observatoire est présenté sur la figure 3. En faisant l'hypothèse que les véhicules observés appartiennent à certaines classes types de véhicules prédéfinies, les performances de l'observatoire, établies en utilisant le système de référence MRT, sont présentées dans le tableau 5.

Table 5 - Main performances of the IFSTTAR local trajectory observatory for black spots

Paramètre de trajectoire	Performance mesurée	
Portée	> 100 m	
Position transversale	Erreur moyenne: 20 – 30 cm *	Ecart-type: 10 cm - 20 cm *
Vitesse longitudinale	Erreur moyenne: 1.3 km/h	Ecart-type: 1.9 km/h

* dépend du type de virage

3.6. Outils de diagnostic d'itinéraire

Pour effectuer le diagnostic d'un itinéraire complet ou sur une grande longueur de route en se basant sur les variétés de comportements des conducteurs, il n'est pas possible d'équiper la route tout au long de l'itinéraire. L'appareillage de mesure doit être à bord des véhicules. Afin d'évaluer la sécurité d'un itinéraire, d'identifier les sections les plus dangereuses et d'en tirer un indicateur de sécurité, les trajectoires doivent être enregistrées et analysées pour un échantillon suffisamment grand de conducteurs, représentatif de la population dans son ensemble. Par conséquent, une flotte de véhicules circulant fréquemment sur l'itinéraire, doivent être équipés et les données de trajectoire recueillies dans le cadre de «conduite en situation naturelle», pour éviter tout biais dans le comportement des conducteurs, qui pourrait être introduit dans le cas de conducteurs recrutés.

En plus des paramètres de la trajectoire, une telle approche requiert des informations supplémentaires sur le comportement du conducteur et l'environnement. Par exemple, un ralentissement soudain ou discontinuité de la trajectoire peut être causé soit par un défaut

de la route soit par un autre véhicule ou un obstacle mobile que le chauffeur a du éviter. Ainsi, le contexte doit être connu afin d'éviter des interprétations erronées.

Les paramètres de la trajectoire sont mesurés avec des outils similaires à ceux décrits dans la section 3.3, mais de manière plus simple et moins coûteuse. Le GPS et les technologies inertielles sont incontournables, mais le système développé à IFSTTAR utilise en plus une caméra vidéo et un logiciel de traitement d'image pour améliorer la précision lorsque l'on dispose d'une cartographie précise de la route et de sa signalisation horizontale. Ainsi, ce système est basé sur la fusion des données du multicateur et ses composants, matériels et logiciels, sont les suivants:

- un récepteur GPS mono-fréquence faible coût, produisant le code et la phase sur la fréquence L1, permettant un fonctionnement du GPS en mode cinématique afin d'obtenir une meilleure précision de la localisation par rapport au fonctionnement du GPS en mode naturel,
- un gyromètre à fibre optique ainsi que le codeur de distance du véhicule,
- une caméra N&B associée à un logiciel de traitement d'images détectant les bandes de marquage horizontal et calculant la distance latérale par rapport à celles-ci,
- un logiciel de fusion globale basé sur un filtre de Kalman étendu, utilisant un modèle d'évolution de type «bicyclette» alimenté par les mesures odométriques et gyrométriques, des corrections apportées par le GPS (fréquence d'échantillonnage 1 Hz) et par la distance latérale sur la voie calculée par le logiciel de traitement d'image (images disponibles tous les 5 m).

L'algorithme de fusion de données est décrit dans [8]. Les performances du système prototype, établies en utilisant le système de référence MRT, sont données dans le tableau 6.

Table 6 - Principales performances de l'observatoire d'itinéraire IFSTTAR

Paramètre de trajectoire	Performance mesurée
Portée	Pas de limite
Position latérale	10-20 cm RMS* (avec signalisation horizontale)
Vitesse longitudinale	1.5 km/h RMS

* Selon le profil de la route (ligne droite ou virage)

4. ETUDES DE CAS

4.1. Alerte en virages

Sur les routes de rase campagne françaises, en 2009, les accidents en virage ont représenté 32% des accidents et 36% des tués. Ils constituent un important enjeu de sécurité routière pour les gestionnaires routiers. Récemment deux projets de recherche [9, 10] du programme SARI ont concerné l'amélioration de la sécurité des virages en proposant de nouveaux dispositifs de signalisation (figure 4). Des observatoires de trajectoires ont été déployés pour étudier les trajectoires pratiquées par les usagers dans un virage et pour évaluer l'impact de la signalisation d'alerte. La trajectoire est utilisée pour qualifier le comportement des usagers à l'aide de paramètres observables et mesurables, tels que : positions sur la voie de circulation, vitesses en approche et en franchissement du virage, accélérations subies. On cherche à quantifier et à qualifier des trajectoires à risque à partir des états limite suivants définis par des travaux sur les liens statistiques entre accidents et conduite automobile :

- décélération > 40 km/h pour franchir le virage,

- accélération transversale $> 5\text{m/s}^2$,
- accélération longitudinale $> 5\text{m/s}^2$,
- brusque variation de l'accélération transversale,
- position du véhicule en dehors de la voie de circulation.

Dans la première phase du projet RADARR [9], les trajectoires ont été mesurées pour définir le principe de fonctionnement de la signalisation d'alerte. Un véhicule instrumenté (MITL) a été utilisé pour estimer les limites de franchissement du virage et proposer un seuil de déclenchement de la signalisation d'alerte. Des passages à vitesse croissante ont été réalisés par un conducteur expert. L'analyse des trajectoires obtenues (vitesses, accélérations transversales et positions) a permis de préciser le meilleur point de mesure de vitesse pour déclencher l'alerte lumineuse en virage afin que les conducteurs trop rapides puissent décélérer en toute sécurité, et le seuil de vitesse pour déclencher la signalisation lumineuse afin que l'accélération transversale ne dépasse pas 5 m/s^2 dans le virage (figure 5).



Figure 4 – Signalisation d'alerte IRCAD

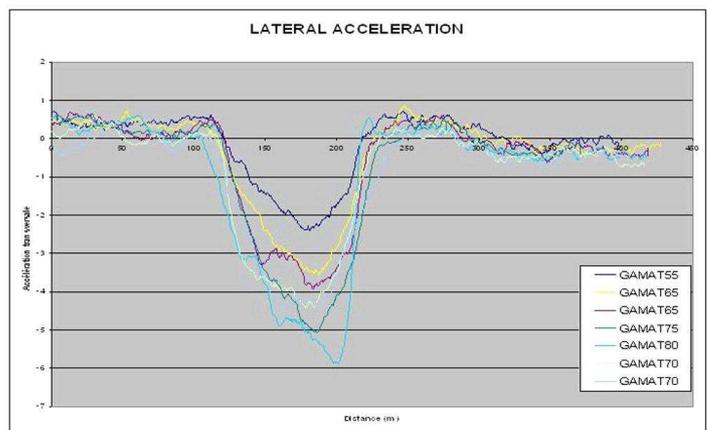


Figure 5 - Accélération latérale en fonction de la vitesse de franchissement

Les mesures ont été comparées avec celles collectées pour l'ensemble des usagers circulant sur le site. L'observatoire optique des trajectoires (METL, section 3.5) a été installé pour recueillir des familles de trajectoires pratiquées (figure 6) par les usagers, et les confronter avec les mesures du véhicule instrumenté pour ajuster le seuil d'alerte de la signalisation. Ces deux approches complémentaires ont conduit à n'alerter qu'environ 15% des usagers sur ce site. Seuls les usagers qui circulent avec une vitesse d'approche supérieure à V_{85} sont alertés.

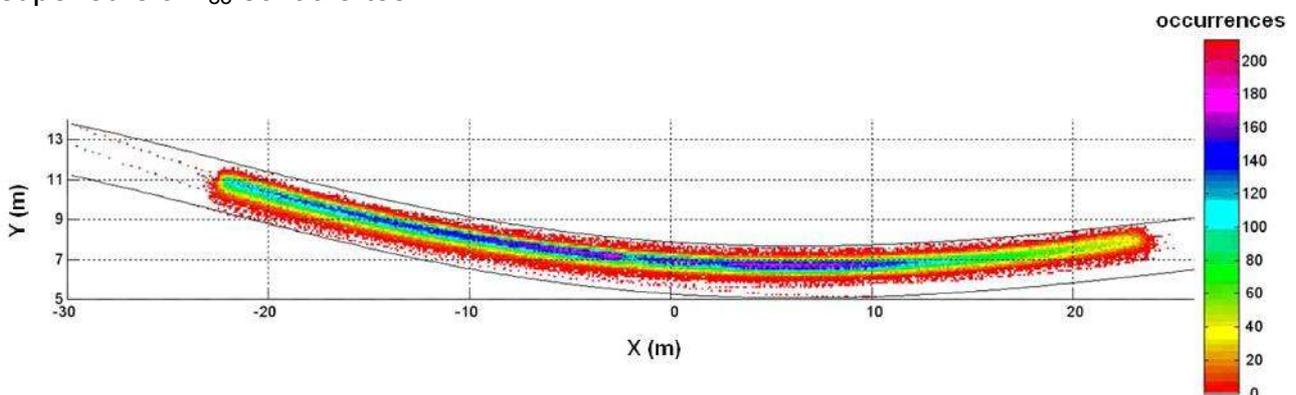


Figure 6 – Faisceau de trajectoires des véhicules en virage

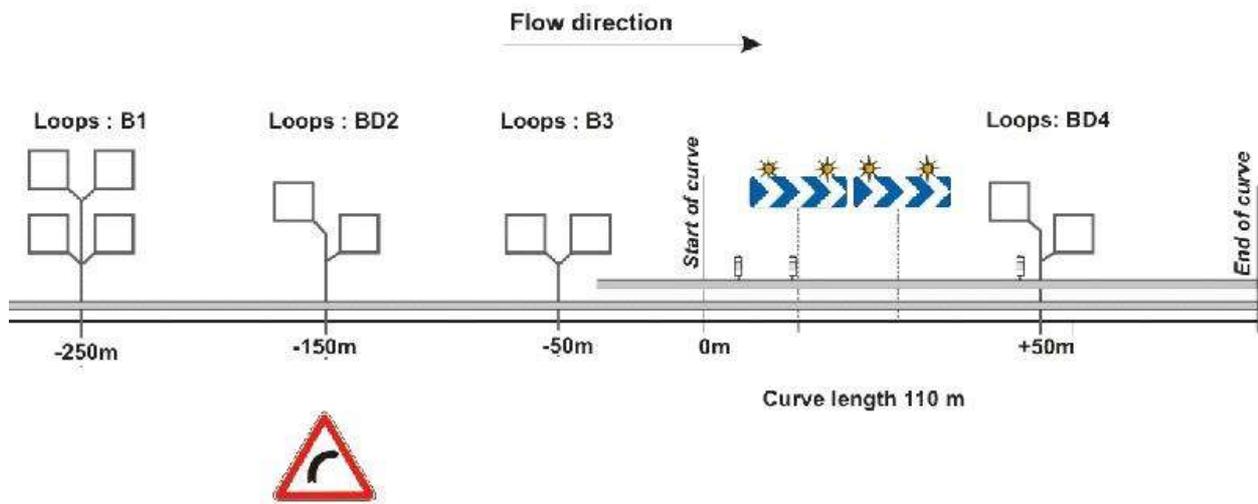


Figure 7 – Implantation de la signalisation et de l’observatoire dans le virage

Durant les deux phases du projet (avant et après installation de la signalisation d’alerte), les trajectoires ont été recueillies par un dispositif de mesure microscopique du trafic (voir § 2.4 (i)) utilisant des capteurs à boucles électromagnétiques installés comme l’indique la figure 7, notamment pour les vitesses et positions des usagers libres. Les quatre point de mesures permettent d’identifier le passage de chacun des véhicules et de reconstituer les trajectoires individuelles (figure 8). Leur analyse a permis de quantifier l’impact de la signalisation sur la population alertée. La comparaison des trajectoires avant/après a montré une réduction des vitesses de franchissement du virage pour la population alertée (figure 9). Cette diminution des vitesses entraîne une réduction du risque d’accident mortel estimée à 25%.

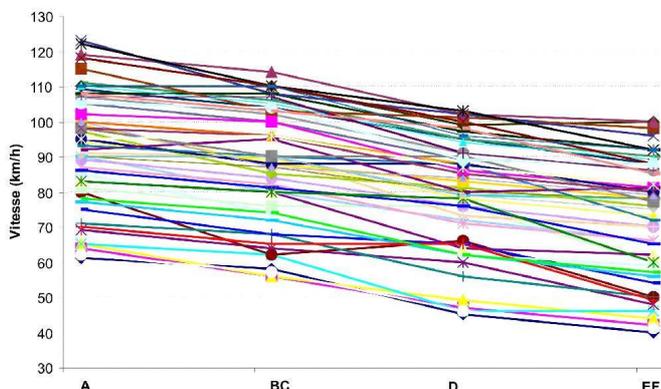


Figure 8 – Faisceau de trajectoires individuelles

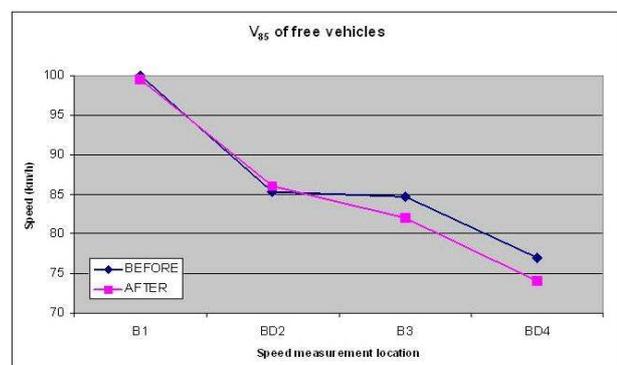


Figure 9 – impact de la signalisation d’alerte sur les vitesses pratiquées V_{85}

4.2. Prévention des risques en intersections

En France, les intersections représentent moins de 1% de la distance parcourue par les conducteurs, mais elles sont impliquées dans 10% des accidents et représentent 13% des tués. Le risque d’accidents, en rase campagne, est multiplié par 10 au franchissement des intersections. Pour les gestionnaires routiers, c’est un enjeu important de sécurité routière au même titre que les virages.

Le principal type d’accident avéré est le cisaillement : un véhicule non prioritaire s’engage dans l’intersection et est percuté par un véhicule arrivant sur la voie prioritaire (figure 10). Les principales causes des ces accidents sont :

- la vitesse excessive des véhicules sur la route prioritaire,
- une visibilité insuffisante pour les véhicules sur la route secondaire et prioritaire.

4.2.1. *Pour améliorer la sécurité des intersections, l'analyse des accidents est difficile et peu représentative car ces accidents sont rares. Dans ce cas, l'analyse des trajectoires relatives des véhicules circulant dans les intersections et des quasi-accidents est une approche complémentaire pour estimer les risques potentiels d'une intersection.*

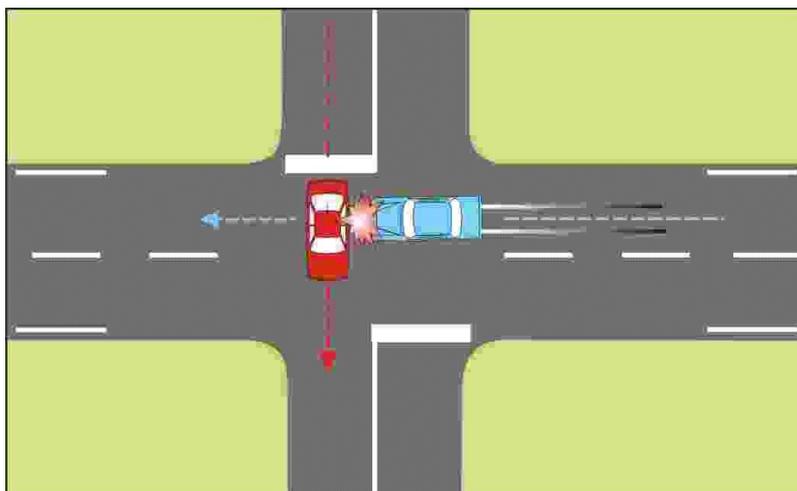


Figure 10 – Cisaillement premier axe

4.2.2.

La détection des conflits de trafic – situation lors de laquelle deux véhicules s'approchent dans le temps et l'espace jusqu'à un point avec risque d'accident si leurs mouvements restent inchangés - constitue une application particulière des observatoires de trajectoires bord de voie (METL). Dans ce cas précis, on cherche à identifier des situations potentiellement risquées à partir de trajectoires prédéfinies. La figure 11 illustre le principe de la détection des conflits de trafic.

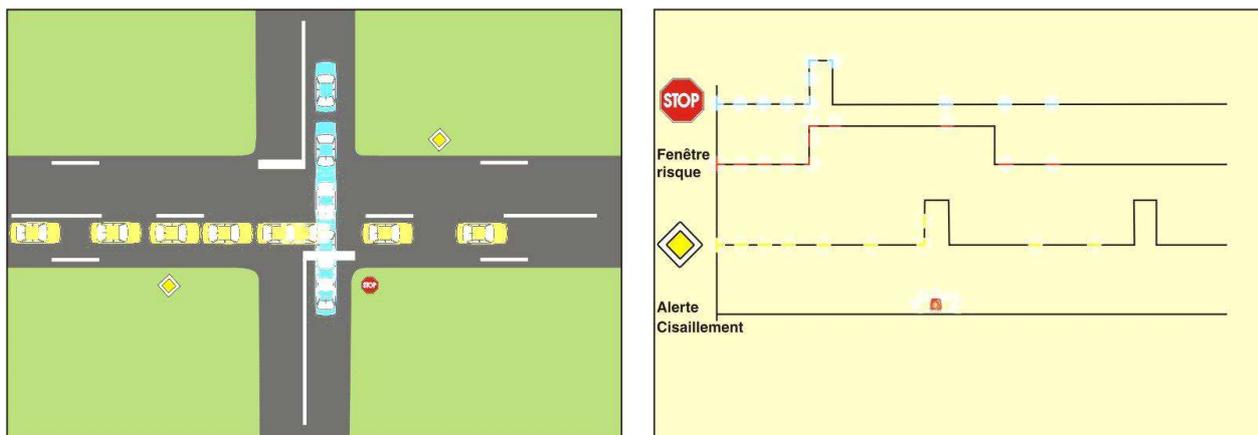


Figure 11 - Conflit de cisaillement en intersection

Un système [12] a été développé pour détecter et enregistrer les conflits liés aux usagers venant de la route non prioritaire et coupant la route de l'utilisateur prioritaire. Le système utilise des capteurs de trafic standard (radar doppler, détecteurs de passage), s'installe sur le bord de la route et délivre des informations relatives aux événements détectés : horodatage de passages et vitesses des véhicules. A partir de ces informations, un temps à

collision est calculé et comparé à un seuil. Le temps critique correspond au temps de traversée de la route principale qui doit être supérieur à 6 secondes pour une route à 2 voies. En cas de détection d'une situation de conflit, un indice de risque est élaboré et une séquence vidéo de 30 s avant et 15 s après la détection est mémorisée (figure 12).



Figure 12 – Illustration d'un conflit de cisaillement (source CETE Normandie-Centre)

Ces informations de trajectoires permettent aux gestionnaires de :

- comparer les indices de risque de plusieurs carrefours pour définir des priorités,
- estimer le nombre d'accidents prévisibles pour chaque intersection,
- évaluer l'impact d'une modification ou d'un aménagement d'un carrefour.

4.3. Impact du contrôle-sanction sur les vitesses pratiquées

Des travaux internationaux [13, 14] ont montré le lien entre vitesses pratiquées et accidents. La maîtrise de la vitesse constitue un enjeu de sécurité essentiel pour les pouvoirs public et les gestionnaires routiers. Fin 2003, la France a déployé un système de contrôle automatisé des vitesses, accompagné d'une large communication médiatique. Ce déploiement a conduit à une forte réduction globale de l'insécurité routière. Des évaluations sur les modifications de comportement de conduite des usagers ont été réalisées [15] en considérant les 3 niveaux suivants :

- globalement : l'ensemble du territoire à l'aide d'enquêtes nationales
- localement : les régions à partir des mesures de trafic
- individuellement : les radars par l'analyse microscopique du trafic.

Les impacts locaux ont été étudiés en analysant les trajectoires pratiquées, notamment les vitesses (dépassement de la vitesse réglementaire) et les temps inter-véhiculaires (TIV courts) à l'aide de dispositifs du type METL / METG.

4.3.1. Observatoire régional des vitesses pratiquées : La Normandie

Les routes de Normandie sont équipées de stations de mesures pour la connaissance statistique des trafics. Ces stations délivrent aussi des mesures des vitesses pratiquées (distribution des vitesses). Ainsi, chaque jour environ 60 stations de mesure fournissent la vitesse de plus de 400 000 véhicules, utilisées pour exprimer le pourcentage de véhicules au-dessus de la vitesse réglementaire. Cet indicateur est utilisé pour évaluer l'impact du contrôle automatisé des vitesses.

L'analyse de l'évolution des dépassements de la vitesse réglementaire a été réalisée sur une période de 5 années avant et après le déploiement des radars automatiques. La figure 13 illustre l'évolution des vitesses et des accidents durant cette période et montre :

- une réduction importante des infractions à la vitesse limite et des accidents,

- un impact du contrôle automatisé dès son annonce (fin 2002), puis renforcé lors du déploiement (fin 2003).

4.3.2. Impact local d'un radar de contrôle automatisé

L'impact local d'un radar automatisé a été évalué à partir de l'analyse microscopique du trafic en utilisant un observatoire des trajectoires de type METL/METG sur une zone de plusieurs kilomètres autour du radar. La vitesse et le temps inter-véhiculaire ont été analysés. Chaque radar (figure 14) est implanté avec un panneau d'avertissement des usagers (figure 15).

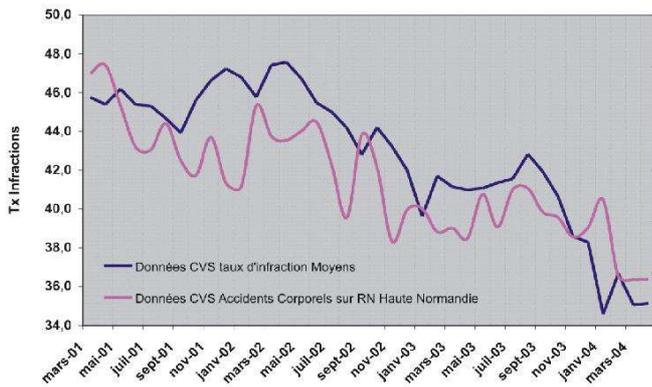


Figure 13 – Évolution des vitesses et des accidents entre 2000 et 2005



Figure 14 - Radar de contrôle vitesse



Figure 15 - Panneau d'avertissement de radar

10 analyseurs de trafic ont été implantés pour évaluer l'impact du radar, sur une zone de 13 km, depuis le panneau d'avertissement (1 km avant le radar) jusqu'à 12 km après. Le recueil des mesures s'est étalé une année avant et après la mise en service du radar. L'impact du radar a été évalué à partir des taux d'infraction en analysant :

- la transition lors de l'installation du radar,
- la baisse significative des infractions.

La zone d'influence locale d'un radar mise en évidence est d'environ 1 km. Cependant une prise de conscience globale du rôle de la réduction de la vitesse sur la sécurité est apportée par des campagnes de communication. Ceci est quantifié par une réduction des vitesses moyennes aux niveaux régional et national.

5. CONCLUSIONS

Durant la dernière décennie, IFSTTAR (ex LCPC) a introduit et développé l'étude des trajectoires au sens large du terme pour améliorer les connaissances en sécurité routière. Des concepts, des méthodes, des outils et des technologies ont fait l'objet de travaux de recherche et des premières applications ont été réalisées en mettant en œuvre des observatoires de trajectoire.

L'approche développée se propose d'analyser précisément les interactions entre les véhicules, les conducteurs et les infrastructures routières en s'appuyant les situations de conduite qui ne sont pas des situations d'accident à partir des trajectoires observables et mesurables pour des conditions de circulation identifiées et un environnement donné (performance du véhicules et caractéristiques de l'infrastructure routière). Dans ces travaux, il a été introduit la notion d'états limites de service qui correspondent à des situations de conduite particulières et plus fréquentes que les accidents et les quasi-

accidents. L'identification de ces situations et leur description est révélatrice de possibles dysfonctionnements du système dans son ensemble et de l'infrastructure routière notamment.

Les informations de trajectoire peuvent être recueillies en situation de conduite naturelle ou à partir de panel de conducteurs à l'aide de véhicules plus ou moins instrumentés ou bien de manière complémentaire par des dispositifs bord de voie pour tout ou partie de la population des usagers qui circulent. Cela ouvre de nouvelles perspectives alternatives et complémentaires à l'étude habituelle des accidents. L'intérêt essentiel est de proposer une approche préventive puisqu'elle ne repose pas exclusivement sur une accidentologie avérée.

Cette approche sera d'un intérêt particulier dans les pays développés et partout, quand les mesures classiques (par exemple, contrôle de la vitesse, l'éducation des conducteurs, des véhicules plus sûrs, l'amélioration des infrastructures) sont déjà mises en œuvre. Une telle approche peut également être très rentable, en évitant un nombre important d'accidents avec des moyens abordables, mais aussi respectueux de l'environnement et en évitant certains travaux routiers lourds par un traitement préventif.

De nouvelles perspectives sont intéressantes et leur développement est encourageant à acquérir de nouvelles connaissances.

En ce qui concerne les systèmes embarqués, la mise en œuvre de flottes de véhicules instrumentés à faible coût pour des investigations dites en « conduite naturelle » est actuellement portée par des projets de développement des constructeurs automobiles (projets européens FOT). Une approche similaire pourrait être menée par les organismes de recherche européens (comme le projet SHRP2 aux Etats-Unis) et fournirai à la communauté des chercheurs un volume important des données à traiter par des techniques de data mining. Un nouveau projet est initié en France (SVRAI) pour recueillir des données sur les quasi-accidents et sur les situations proches des états limites en utilisant des enregistreurs de données d'événements (en partenariat avec des gestionnaires routiers). L'instrumentation de grands parcs de véhicules constitue un nouveau défi pour l'amélioration des connaissances de la conduite en relation avec la sécurité routière.

En ce qui concerne les dispositifs bord de voie, les observatoires de trajectoire qui permettent de recueillir la trajectoire des véhicules sur une distance de 100m constituent une avancée significative qu'il convient de consolider.

Enfin, le conducteur ne doit pas être oublié. Il est l'acteur clé de l'ensemble du système qu'il faut toujours garder dans la boucle. Cela signifie que les sciences humaines sont nécessaires pour enrichir et compléter l'étude des trajectoires et traiter les problèmes de sécurité routière dans leur globalité : véhicule / conducteur / infrastructure.

REFERENCES

1. Jacobs, G.D. & Aeron-Thomas, A. (2000). A Review of Global Road Accident Fatalities. http://www.transport-links.org/transport_links/filearea/publications/1_771_Pa3568.pdf
2. PRAC2010 (2010). Actes de la conférence nationale « Prévention des Risques et Aides à la Conduite ». 4-5 mai. Eds. Jacob, B. & Gallenne, M-L.. LCPC, Paris. 485 pages: http://prac2010.free.fr/lib/actes_prac_fin.pdf
3. Olivero, P. & Jacob, B. (2006). Glossaire Métrologie du trafic et des trajectoires. Version 5.4. LCPC.

4. Koita, A. (2011). Evaluation probabiliste des trajectoires en virage. PhD thesis. University Blaise Pascal Clermont-Ferrand II. IFSTTAR, Paris.
5. Rey, Guillaume (2010). Approche probabiliste de la sécurité des véhicules légers en zones accidentogènes. PhD thesis. University Blaise Pascal Clermont-Ferrand II.
6. Duchâteau, G. , Nouvel, O. , Vigneau, W. , Bétaille, D. , Peyret, F. & Secrétan, H. (2009). How to assess and improve satellite positioning performances in urban environments. ITS World Congress. Stockholm, September.
7. Goyat, Y., Chateau, T. , Malaterre, L. & Trassoudaine, L. (2007). Estimation précise de la trajectoire d'un véhicule par vision monoculaire. XXIII World Road Congress. AIPCR, Paris.
8. Bétaille, D. (2008). Gyrolis : logiciel de localisation de véhicule en post-traitement par couplage GPS - gyromètre – odometer. Revue BLPC. n° 272.
9. Projet RADARR (2008). Rapport final. LCPC. Novembre.
10. Projet IRCAD (2008). Rapport final, LCPC. Juin.
11. Amundson, F. & Hyden, C. (1977). Proceeding of 1st Workshop on Traffic Conflicts Institute of Transport Economics. Oslo, Norway.
12. Subirats, P., Dupuis, Y., Violette, E., Doucet, D., Dupré, G. (2010). A new tool to evaluate safety of crossroad. 4th International Symposium on Highway Geometric Design. Valence. 2-5 juin.
13. Swov (2009). The relation between speed and crashes, Swov fact sheets.
14. OCDE (2006). Speed management. Octobre.
15. ONISR (2006). Impact du contrôle sanction automatisé sur la sécurité routière (2003-5). Mars.