

Spécification de systèmes automobiles de sécurité active De l'accidentologie à l'expérimentation

Thierry Perron

DANS **LES CAHIERS DU NUMÉRIQUE 2001/1 Vol. 2** , PAGES 133 À 155
ÉDITIONS **JLE**

ISSN 1622-1494

Date de mise en ligne : 01/10/2010

Article disponible en ligne à l'adresse

<https://shs.cairn.info/revue-les-cahiers-du-numerique-2001-1-page-133?lang=fr>



Découvrir le sommaire de ce numéro, suivre la revue par email, s'abonner...
Scannez ce QR Code pour accéder à la page de ce numéro sur Cairn.info.



Distribution électronique Cairn.info pour JLE.

Vous avez l'autorisation de reproduire cet article dans les limites des conditions d'utilisation de Cairn.info ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Détails et conditions sur cairn.info/copyright.

Sauf dispositions légales contraires, les usages numériques à des fins pédagogiques des présentes ressources sont soumises à l'autorisation de l'Éditeur ou, le cas échéant, de l'organisme de gestion collective habilité à cet effet. Il en est ainsi notamment en France avec le CFC qui est l'organisme agréé en la matière.

Spécification de systèmes automobiles de sécurité active

De l'accidentologie à l'expérimentation

Thierry Perron

Les accidents de la route font chaque année en France plus de 8 000 tués et 180 000 blessés. Le nombre total d'accidents est évalué à 2,4 millions par an pour un coût global de 120 milliards de francs [ONI 99]. Le nombre annuel de tués sur les routes est de l'ordre de 50 000 dans l'Union Européenne et de plus de 500 000 à l'échelle mondiale. De récentes études en sécurité automobile ont montré qu'environ la moitié des automobilistes tués ne peuvent être épargnés par des dispositifs de sécurité passive (c'est-à-dire de protection) techniquement et économiquement envisageables, et ce malgré les améliorations significatives des structures et des systèmes de retenue [THO 90].

La technologie permet désormais d'envisager des systèmes de sécurité active visant à éviter les accidents ou à réduire leur sévérité : assistance au freinage d'urgence, contrôle de stabilité, alarmes anti-collision... Or ces systèmes doivent intervenir lorsque les conducteurs en ont effectivement besoin, et uniquement dans ce cas. Il est nécessaire d'éviter les déclenchements intempestifs nuisant à l'acceptabilité de ces systèmes et donc à leur efficacité globale pour réduire le nombre d'accidents. Cependant, ceci ne doit pas être fait au détriment du nombre de personnes effectivement aidées en situation d'urgence. De plus, une fois le système activé, son fonctionnement doit tenir compte du comportement habituel des

conducteurs afin de ne pas aller à leur encontre, tout en limitant les réactions inadaptées (ou leurs effets), et en optimisant les réactions positives (mais éventuellement insuffisantes).



Figure 1. Le premier accident de l'histoire de l'automobile
(Gravure du livre de Figuié Merveilles de la science)

La conception d'un système de sécurité active nécessite l'identification des situations accidentogènes, la définition des critères de déclenchement du système et la détermination des stratégies d'évitement à mettre en œuvre. Elle requiert donc des données sur les scénarios de pré-collision des accidents réels, d'une part, et d'autre part sur le comportement des conducteurs en situations accidentogènes. Pour ce faire, les constructeurs automobiles français ont mis en place des programmes de recherche pour l'étude détaillée d'accidents, et pour l'analyse du comportement des conducteurs par des expérimentations réalisées en simulateur de conduite ou sur piste d'essais.

Les concepts de la sécurité active

L'accident automobile, tout au moins l'accident matériel, est un événement dont chacun a déjà pu faire l'expérience directe ou indirecte. Cependant l'étude des accidents requiert une définition rigoureuse des notions qui y sont liées (pour plus de détails, voir [PER 96, PER 97]). L'accident étant le résultat d'un dysfonctionnement, il est aussi nécessaire de définir le cadre du « fonctionnement normal ».

Définitions

L'ensemble de l'approche décrite ci-après est fondée sur les définitions suivantes :

- *Accident* : événement occasionnant des dommages ou des pertes de biens, des blessures de personnes, ou la mort ;
- *Danger* : situation pouvant aboutir à un accident matériel ou corporel ;
- *Risque* : mesure associée de la probabilité et de la gravité d'un accident ;
- *Sécurité* : état d'absence de danger, aptitude d'un système à éviter un accident, disposition visant à réduire le risque d'accident, discipline étudiant ces états, aptitudes et dispositions et les mettant en œuvre.

Les dispositions de sécurité peuvent intervenir au niveau de chacune des trois phases de l'accident, à savoir la pré-collision, la collision et la post-collision, d'où des notions de :

- *Sécurité primaire* : dispositions relatives à la phase de pré-collision consistant en la réduction des accidents (diminution de la probabilité et de la sévérité) par leur prévention, leur évitement et la réduction de leur violence ;
- *Sécurité secondaire* : dispositions en relation avec la collision ayant pour objectif la protection des occupants (limitation de la gravité) ;
- *Sécurité tertiaire* : dispositions en rapport avec la phase de post-collision visant à améliorer le secours aux impliqués (réduction de la gravité).

Les terminologies usuelles de *sécurité active* et *sécurité passive* désignent respectivement les domaines de sécurité primaire et secondaire, mais ce du point de vue du véhicule. Le comportement routier et les systèmes embarqués d'assistance au conducteur tels que l'ABS (*Anti-lock Brake System*), l'ESP (*Electronic Stability Program*) et l'AFU (*Assistance au freinage d'urgence*) sont du ressort de la sécurité active. Les caractéristiques de tenue au choc des structures du véhicule et les systèmes de retenue des occupants sont du ressort de la sécurité passive.

Approche systémique de la conduite

La conduite automobile se traduit par les interactions du conducteur avec son véhicule et l'environnement routier. Elle s'articule autour de trois tâches principales que le conducteur doit mener à bien en continu et simultanément :

- le *contrôle*, au niveau opérationnel, consiste à réguler les paramètres dynamiques (maintien de la position latérale, du cap, régulation de la vitesse...); c'est l'activité de régulation sensori-motrice, caractérisée par un grand degré d'automatisme ;

- la *guidance*, au niveau tactique, consiste à élaborer les manœuvres pour adapter la trajectoire aux contraintes de l'infrastructure et du trafic (changements de trajectoire ou de direction, choix de vitesse et de distance, dépassement, évitement d'obstacles...); cette activité a une forte composante d'anticipation; elle peut être décomposée en *guidance par rapport à l'infrastructure* et *guidance par rapport au trafic* ;

- la *navigation*, au niveau stratégique, consiste à planifier et suivre l'itinéraire; c'est une activité cognitive (prévisionnelle et décisionnelle); cette tâche n'est pas critique pour la sécurité dans la mesure où une erreur de navigation n'est pas susceptible d'entraîner directement un accident.

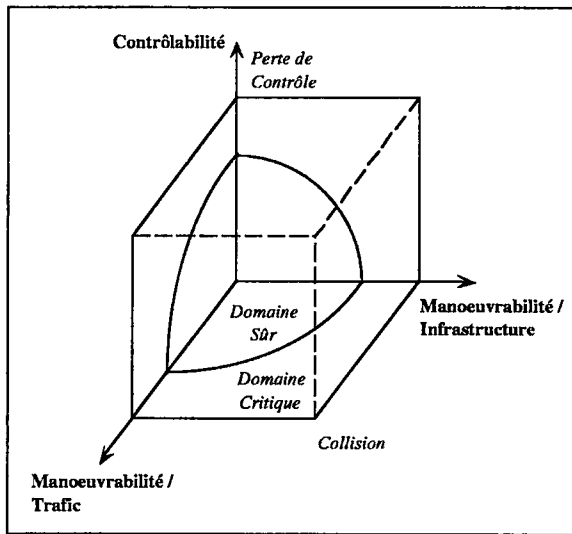


Figure 2. Domaine de fonctionnement

Dans la réalisation de ces tâches, le conducteur doit respecter le domaine de fonctionnement de son véhicule (figure 2), défini par :

- les *critères de contrôlabilité* intervenant au niveau des paramètres de contrôle, définis par les limites admissibles des sollicitations dynamiques du véhicule compatibles avec l'habileté du conducteur (accélération longitudinales et transversales, dérive de caisse...);

- les *critères de manœuvrabilité* intervenant au niveau des paramètres de guidance, relatifs à la trajectoire du véhicule dans son environnement *par rapport à l'infrastructure* (positionnement latéral dans la voie...) et *par rapport au trafic* (distance au véhicule qui précède...).

Approche systémique de l'accident

Un accident est un mécanisme de dysfonctionnement aboutissant à une dérive du point de fonctionnement hors du domaine de fonctionnement. De manière générale, ce mécanisme (figure 3) fait passer d'un état nominal à une collision suite à :

- des *défauts* (éléments prédisposant, au sens factuel) des conducteurs (problèmes visuels...), des véhicules (sous-gonflage...) ou de l'infrastructure (mauvaise adhérence...);

- une *défaillance* (événement initiateur, au sens événementiel) des conducteurs (non perception d'un véhicule du trafic...), des véhicules (éclatement de pneumatiques...) ou de l'infrastructure (défaillance de feux tricolores...), provenant éventuellement d'un défaut;

- un *dysfonctionnement* (conflit indésirable, au sens spatio-temporel), incursion dans le domaine de fonctionnement critique (mauvais positionnement dans la voie, perte de contrôle...).

Les accidents peuvent ainsi être classés suivant la défaillance impliquée dans le mécanisme (figure 4, adaptation d'une classification utilisée dans le domaine aéronautique [WAN 1981]). Cette première *typologie relative à la défaillance* différencie :

- les accidents de *pilotabilité* pour lesquels la manœuvre entreprise par le conducteur fait sortir le système de son domaine de fonctionnement, alors qu'une autre manœuvre aurait permis d'éviter une telle déviation (accidents imputables à une erreur humaine, refus de priorité, survitesse...);

- les accidents de *manœuvrabilité* pour lesquels aucune manœuvre n'aurait permis de maintenir le système dans son domaine de fonctionnement (accident contre un véhicule tardivement visible...);

- les accidents de *sensibilité aux perturbations avec projection* du système hors de son domaine de fonctionnement (éclatement de pneumatiques, vent

latéral...) ou *réduction* du domaine de fonctionnement (crevaison lente, réduction de l'adhérence...).

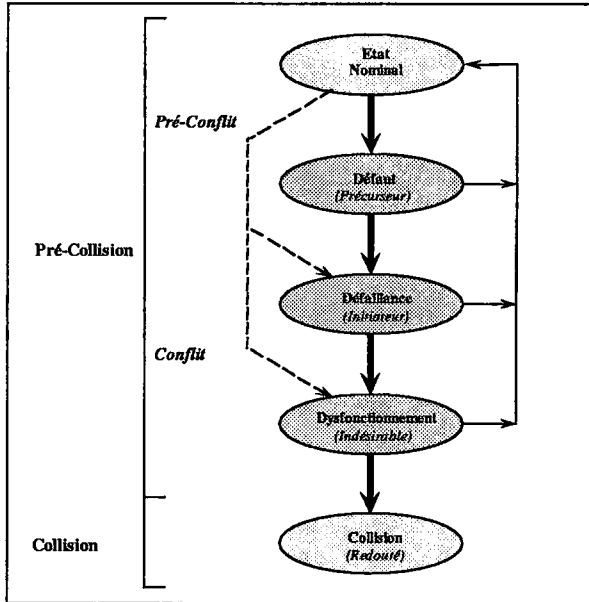


Figure 3. Modèle général d'accident

Les accidents peuvent aussi être classés suivant le dysfonctionnement, c'est-à-dire la façon dont le système a quitté son domaine de fonctionnement (figure 5). Il s'agit de décrire si le système est sorti du domaine de contrôlabilité avant de sortir du domaine de manœuvrabilité. Ceci revient à préciser laquelle des tâches de contrôle ou de guidance n'a pas été ou n'a pu être menée à bien. Cette *typologie relative au dysfonctionnement* distingue :

- les *accidents de contrôle* pour lesquels la défaillance résulte initialement en une perte de contrôle, conduisant par la suite à une sortie de voie ou à une collision (accidents dus à une vitesse trop élevée en virage, entraînant une perte de contrôle, puis une sortie de route) ;

- les *accidents de guidance* pour lesquels la défaillance engendre d'abord une mauvaise trajectoire *par rapport à l'infrastructure* (sorties de route liées à l'hypovigilance), ou *par rapport au trafic* (accidents fronto-arrière), même si la tentative de récupération entraîne ensuite une perte de contrôle.

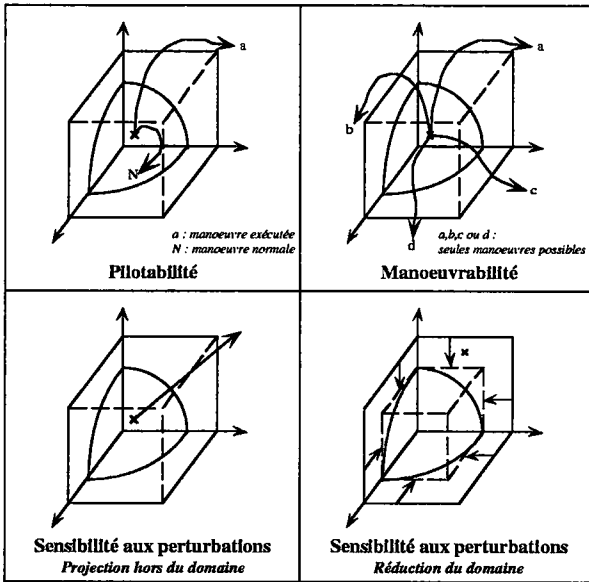


Figure 4. Typologie relative à la défaillance

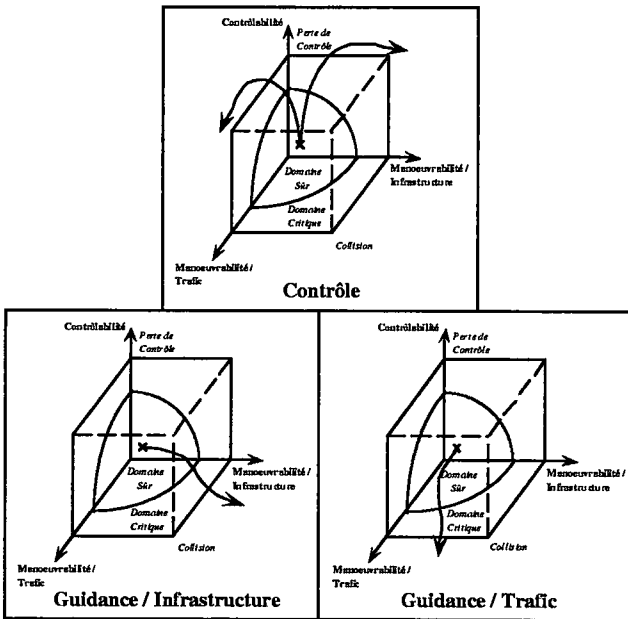


Figure 5. Typologie relative au dysfonctionnement

Systèmes de sécurité active

Ces approches systémiques de la conduite et de l'accident permettent de dégager une typologie pertinente des systèmes de sécurité active suivant leur degré d'interventionnisme dans la conduite. Sont ainsi distingués :

- les *aides informatives* qui conseillent ou avertissent le conducteur (contrôle de sous-gonflage, système d'amélioration de la vision, alarme d'hypovigilance, alarme anti-collision...);
- les *assistances dynamiques* qui accroissent le domaine de fonctionnement véhicule (ABS, ESP, Assistance au freinage d'urgence...);
- les *systèmes d'intervention* qui prennent en charge certaines tâches de conduite (mise à vitesse en approche de virage, systèmes anti-collisions...).

Il est aussi possible de classer ces systèmes suivant le positionnement de leur action par rapport au dysfonctionnement (figure 6) :

- les *systèmes proactifs* limitent la survenue d'un dysfonctionnement, c'est-à-dire les incursions dans le domaine de fonctionnement critique (contrôle de sous-gonflage, mise à vitesse en approche de virage...);
- les *systèmes réactifs* sont conçus pour améliorer les réactions lors d'un dysfonctionnement, c'est-à-dire faciliter le retour dans le domaine sûr lors d'une incursion dans le domaine de fonctionnement critique (ABS, ESP, anti-collision...).

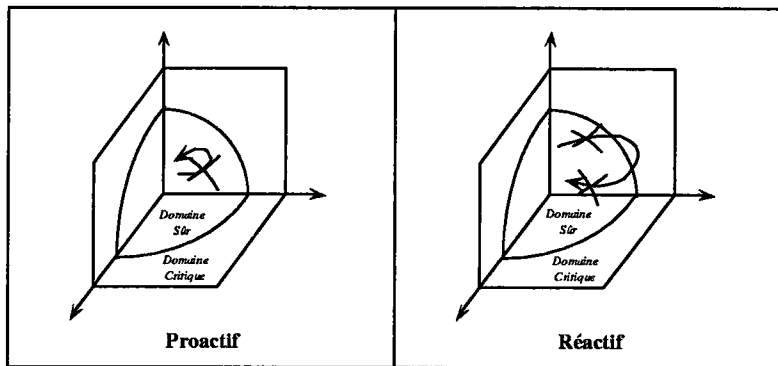


Figure 6. Systèmes pro-actifs et réactifs

Spécification fonctionnelle et évaluation prévisionnelle d'efficacité

La *spécification fonctionnelle* de systèmes de sécurité active consiste d'abord à identifier les fonctionnalités envisageables pour l'évitement des scénarios types d'accidents. Ensuite, il s'agit de déterminer les paramètres de fonctionnement du système, et notamment ses critères de déclenchement et les stratégies d'action à mettre en œuvre. Ces paramètres doivent être optimisés suivant des critères relatifs au fonctionnement du système (taux de déclenchements opportuns, taux de déclenchements intempestifs...) et à son efficacité (taux d'évitements, réduction des vitesses de collision...).

L'*évaluation prévisionnelle d'efficacité* relative de systèmes de sécurité active permet, quant à elle, de hiérarchiser des solutions techniques concurrentes en termes de rapport coût/efficacité. Très en amont dans la phase de conception (parfois avant même la réalisation de prototypes), il s'agit de simuler l'effet du système sur les scénarios accidentogènes et d'étudier comment ces scénarios se seraient déroulés si les véhicules avaient été équipés du système afin de déterminer le gain induit en termes de taux d'évitements et de réduction des vitesses de collision.

Etudes détaillées d'accidents

La première façon d'acquérir des données sur les scénarios accidentogènes est l'étude des accidents réels, discipline appelée accidentologie. Il existe de nombreuses bases de données statistiques sur les accidents. Cependant, ces données qualifiées de macro-accidentologiques ne fournissent pas d'informations sur le déroulement précis des accidents. Il s'agit principalement d'informations recueillies par les forces de l'ordre dans l'objectif premier de détermination des responsabilités et non d'analyse technique du déroulement des accidents. Elles apportent des informations relatives aux circonstances générales d'occurrences des accidents sur des populations représentatives. Mais la spécification de systèmes de sécurité active nécessite des données plus approfondies sur le déroulement cinématique et dynamique des accidents pour ce qui est des véhicules, et cognitif pour ce qui est des conducteurs. Seule une analyse approfondie de chaque accident peut fournir ce type d'informations.

Recueil de données

Pour répondre à ce besoin, les constructeurs automobiles français, au travers du Laboratoire d'Accidentologie, de Biomécanique et d'études du comportement humain (LAB), conduisent un programme d'*Études détaillées d'accidents* en coopération avec le Centre européen d'études de sécurité et

d'analyse des risques (CEESAR). Deux équipes d'accidentologues, l'une à Amiens (Picardie) et l'autre à Evreux (Eure-et-Loir) réalisent des études micro-accidentologiques « sur la scène » des accidents [DAM 97, TAR 96]. Elles interviennent immédiatement sur l'accident, en même temps que les secours. Ce délai d'intervention très court, et très contraignant vis-à-vis du mode de fonctionnement des équipes (et notamment de leur rayon d'action qui est de 30 km), est absolument nécessaire dans la mesure où toutes les traces relatives à la pré-collision sont fugaces (traces de freinage, de roulage dans l'accotement, souvenir des impliqués...). Chaque équipe est constituée :

- d'un technicien véhicule (chargé de l'analyse de l'état et des déformations du véhicule) ;
- d'un psychologue (qui réalise les entretiens avec les conducteurs) ;
- d'un technicien infrastructure et reconstruction (en charge des relevés sur la route et de la reconstruction cinématique de l'accident).

Chacune étudie de 40 à 50 accidents par an. Afin de limiter les biais d'échantillonnage et donc l'incidence sur la représentativité des accidents, les équipes fonctionnent par astreintes, de jour comme de nuit, tous les jours de la semaine. Elles réalisent :

- le recueil en temps réel des éléments temporaires, y compris par photographies et films, puis en différé des éléments permanents, relatifs :
 - aux véhicules, tant au niveau primaire (états et pressions des pneumatiques, position des sélecteurs...) que secondaire (déformations des véhicules, port de la ceinture, déploiement de coussins gonflables...),
 - à l'infrastructure (traces au point de choc et en amont, position finale de chaque véhicule, conditions ambiantes... puis géométrie et état de la chaussée, signalisation...),
 - aux conducteurs (premier entretien semi-directif enregistré sur la scène, puis second entretien quelques jours plus tard) afin de déterminer leurs perceptions, interprétations, décisions et actions, mais aussi leur profil (formation, expérience...) ;
- l'analyse des données recueillies et la reconstruction cinématique et cognitive de l'accident, cœur du travail des accidentologues ;
- le codage des informations recueillies et des résultats de l'analyse afin de renseigner une base de données (le nombre de variables renseignées pour un accident à deux véhicules est de l'ordre de 1 000).



Figure 7. Accidentologues sur le terrain

Reconstruction cinématique et cognitive

A partir des éléments recueillis par les accidentologues sur le terrain, il s'agit ensuite de réaliser la reconstruction de l'accident, afin de restituer son déroulement et de déterminer son scénario [HER 00]. Ce travail est réalisé d'après la synthèse des investigations aussi bien au niveau du véhicule (déformations), de l'infrastructure (traces), que du conducteur (entretiens). Il consiste à remonter le temps à partir de la position finale des véhicules et des traces laissées lors de l'accident (reconstruction rétro-chronologique). La reconstruction de l'accident se réalise en trois étapes (figure 8).

La *reconstruction cinématique de la post-collision* consiste à déterminer les vitesses linéaires, angles et vitesses de lacet de chaque véhicule juste après le choc (en intensité et en direction). A partir des positions finales des véhicules et des traces laissées sur la chaussée, la position du point de choc et la trajectoire de post-collision (échappement) sont estimées. L'évaluation de l'adhérence de la chaussée (et éventuellement de l'accotement) combinée à l'analyse des traces de freinage, ripage, grattage ou roulage permet alors le calcul des données juste après le choc.

La *reconstruction cinématique de la collision* consiste à déterminer les vitesses linéaires, angles et vitesses de lacet d'entrée au choc en fonction des données de sortie. L'énergie dissipée au cours de la déformation de chaque véhicule est estimée par référence à un essai de choc contre un obstacle fixe ayant entraîné les mêmes déformations. La vitesse véhicule lors de cet essai fournit une estimation de l'énergie de déformation (*Equivalent Energy Speed*). Elle est déterminée par jugement d'expert avec une précision de $\pm 10\%$. Les données d'entrée au choc sont alors calculées par les équations de la collision : conservation de la quantité de mouvement, variation de l'énergie cinétique, conservation du moment cinétique.

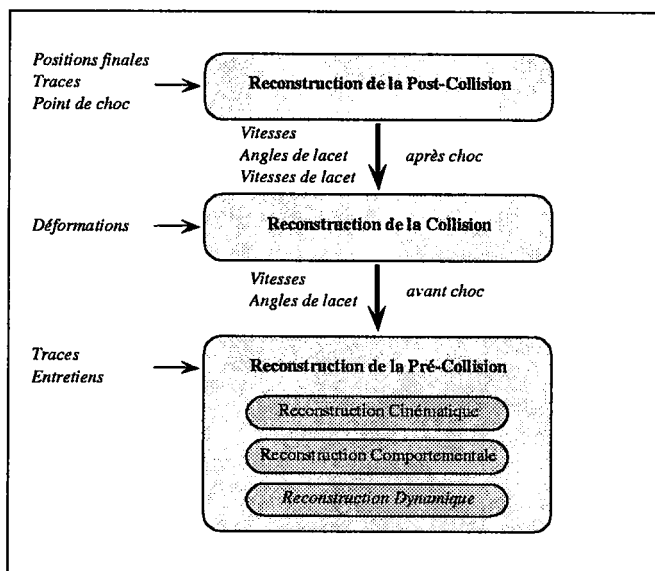


Figure 8. Processus de reconstruction d'accidents

La reconstruction cinématique et cognitive de la pré-collision consiste à déterminer l'évolution des paramètres cinématiques des véhicules et des paramètres comportementaux relatifs aux conducteurs.

Pour la reconstruction cognitive, les verbalisations des conducteurs sont analysées [MAU 99]. Pour chaque impliqué, la pré-collision est décomposée en séquences « perception, évaluation, interprétation, décision et action ». Par exemple, en approche de virage, la perception se décline en « perception de l'intersection » et « perception de la signalisation ». A chacune de ces fonctions de conduite, le résultat obtenu par le conducteur est considéré : « perception de l'intersection : oui/non », « action en longitudinal : freinage /lever de pied/continuation/accélération »... Les éventuelles défaillances de conduite sont ensuite analysées pour chaque fonction. Elles sont décrites par leur mode (non-réalisation, réalisation tardive, ou réalisation incorrecte de la fonction) et leur mécanisme (indisponibilité de l'information, sous-activation du conducteur, ou erreur de conduite).

En parallèle, en remontant le temps depuis la collision pour chaque véhicule, la pré-collision est découpée en séquences cinématiques correspondant chacune à un type de sollicitation (accélération, freinage, roulage sur l'accotement...). A chaque séquence est associée une valeur (ou une évolution) d'accélération longitudinale et un ensemble de points de

passage du véhicule (compte tenu des traces de freinage, ripage, grattage ou roulage, ainsi que des caractéristiques du revêtement). Des informations complémentaires sont prises en compte, comme les statistiques de temps de réaction et de déplacement de pied des conducteurs, des informations relatives à la dynamique des véhicules (décélérations maximales en fonction du type de chaussée, lois moyennes d'accélération de véhicules au démarrage...). Cette approche permet de reconstruire la trajectoire et la vitesse de chaque véhicule.

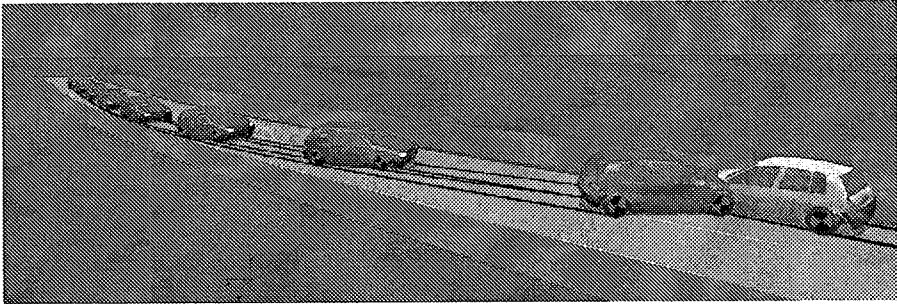


Figure 9. Exemple de reconstruction dynamique

Une reconstruction dynamique fondée sur une modélisation dynamique du véhicule peut ensuite être effectuée. Elle est réalisée dans l'ordre chronologique et consiste à retrouver les actions (taux et vitesse de freinage et d'accélération, angle et vitesse volant...) qui ont engendré la trajectoire et les décélérations observées. La simulation fournit alors des valeurs comme l'accélération transversale et la vitesse de lacet qui sont déterminantes pour les accidents où le véhicule est sollicité en transversal.

Exemple d'évaluation prévisionnelle d'efficacité

Il est impossible de reconstruire un accident de manière exacte. La solution présentée ci-dessus consiste en une reconstruction déterministe unique du déroulement le plus vraisemblable. Une alternative consiste à considérer plusieurs déroulements possibles par une approche probabiliste de simulation de Monte Carlo. Pour un accident, à chacune des données recueillies sur le terrain (EES, masses, angles, décélérations...) est associée une loi de probabilité. La simulation consiste alors à tirer aléatoirement, suivant ces lois, n jeux de valeurs des variables d'entrée. Une reconstruction complète de la pré-collision est alors effectuée pour chacun de ces jeux par un générateur automatique. La base de données obtenue est alors exploitée pour la spécification fonctionnelle et l'évaluation prévisionnelle d'efficacité

de systèmes de sécurité active. Deux outils informatiques ont été développés au LAB dans le cadre de cette approche (GenSIS et ProSPECT).

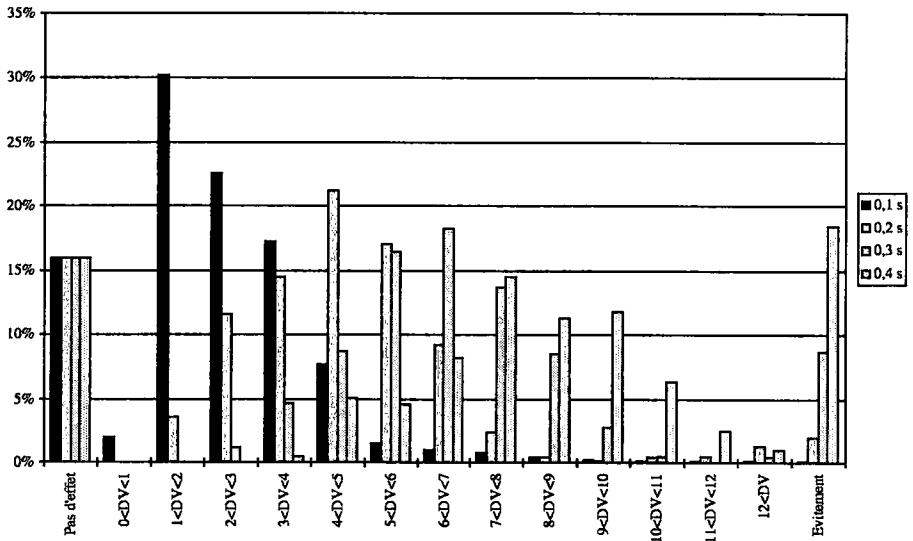


Figure 10. Efficacité prévisionnelle d'une AFU en fonction de Δt (répartition de la réduction DV des vitesses de collision, en km/h)

Cette approche a été mise en œuvre pour l'évaluation prévisionnelle de l'efficacité potentielle d'une Assistance au freinage d'urgence (AFU) dans les scénarios d'accidents d'intersection. L'AFU est un système qui amplifie l'assistance de frein lorsqu'un freinage d'urgence est détecté, typiquement à partir d'une valeur seuil de la vitesse d'enfoncement de la pédale. Ce système a pour effet de faire chuter le délai d'obtention de la décélération maximale du véhicule d'un temps Δt , et de permettre à des conducteurs ordinaires d'atteindre la décélération maximale permise par l'adhérence. La figure 10 fournit une évaluation prévisionnelle du taux d'évitements et de la répartition de la réduction des vitesses de collision (notée DV), en fonction du paramètre Δt . Cette approche a permis de montrer une efficacité potentielle de 20 % d'évitements d'accidents d'intersection et une réduction moyenne des vitesses de collision de 8 km/h. D'autres exploitations des études détaillées d'accidents sont proposées dans [ALL 98, DAM 99, THO 96, THO 99, THO 00].

Expérimentations de sécurité active

Les études détaillées d'accidents fournissent des informations sur les scénarios des accidents réels mais avec des niveaux de précision et de certitude limités. Par nature, elles ne permettent pas d'obtenir des données sur les manœuvres de récupération réussies (presque-accidents). Or, d'une part, leur connaissance est nécessaire pour concevoir des systèmes qui ne perturbent pas les conducteurs dans ces cas. D'autre part, la comparaison entre les évitements et les accidents permet de mieux caractériser le comportement des conducteurs. De plus, bien qu'elles permettent d'analyser les scénarios accidentogènes, ces études fournissent peu de données quantitatives sur le comportement des conducteurs dans ces scénarios.

Les systèmes de sécurité active fonctionnent à partir de données mesurées par des capteurs embarqués. Leur conception requiert donc de connaître l'évolution de ces paramètres dans les situations accidentogènes, avec un niveau de précision équivalent. Ces informations peuvent être obtenues de manière expérimentale en reproduisant artificiellement les scénarios identifiés dans les études détaillées d'accidents, et en mesurant le comportement des conducteurs et les réactions véhicule.

Le LAB a donc mis en place un groupe de recherche dédié à l'analyse du comportement de *conducteurs ordinaires* par des expérimentations de sécurité active. Ces études sont réalisées en simulateur de conduite ou sur piste d'essais. Elles portent à chaque fois sur une centaine de conducteurs représentatifs recrutés parmi le grand public et qui ne connaissent pas l'objet de l'étude, afin de préserver la spontanéité de leurs réactions. Elles sont complémentaires aux essais de mise au point du comportement intrinsèque des véhicules par des *pilotes essayeurs*, qui eux ne permettent pas d'appréhender le comportement des conducteurs ordinaires et leurs interactions avec le véhicule en situation d'accidents.

Les expérimentations en *simulateur de conduite* permettent l'analyse en toute sécurité de configurations très critiques ou techniquement non réalisables en grandeur réelle, le contrôle strict et la reproductibilité des situations expérimentales [CHE 97, PER 98]. Cependant, les simulateurs ont un domaine de validité difficile à évaluer *a priori*.

Les expérimentations sur *piste d'essais* sont donc nécessaires pour valider les résultats obtenus en simulateur et analyser plus finement certains comportements, même si elles laissent moins de latitude quant aux situations réalisables techniquement et de manière sécuritaire, et se prêtent moins bien à un contrôle strict des situations expérimentales.

Plusieurs expérimentations ont été réalisées suivant ce schéma, dont deux concernant les situations accidentogènes fronto-arrière (accidents de manœuvrabilité et de guidance par rapport au trafic). Ces deux études ont été réalisées dans le cadre d'un projet du PREDIT [PER 99, KAS 99].

Protocole expérimental type

La participation d'un sujet dure en moyenne 3 heures. Elle commence par une visite médicale au cours de laquelle sont réalisés des tests ophtalmologiques d'acuité visuelle ainsi que des mesures morphologiques. Le sujet réalise un parcours de prise en main du simulateur ou du véhicule, puis le parcours d'essai proprement dit. Ce parcours se termine par une situation accidentogène. En simulateur, il s'agissait d'une des quatre situations suivantes, provoquée par un véhicule :

- qui sort de stationnement et s'insère dans la voie du sujet,
- à l'arrêt derrière un sommet de côte,
- à vitesse réduite derrière un sommet de côte,
- qui décélère puis freine fortement devant le sujet.

Sur piste, les sujets suivaient un véhicule tractant une remorque, remorque qui était larguée soudainement et freinée fortement (décélération de -7 m/s^2). Cette remorque a été développée spécifiquement afin de permettre des chocs répétés sans dommages (structure en nid d'abeilles, éléments mécaniques en aluminium, blocs d'absorption des chocs...). Dans tous les cas, la cinématique des configurations a été ajustée pour provoquer environ 50 % d'accidents.

À la suite de l'essai, un entretien avec un psychologue permet d'analyser ce que le sujet a perçu de la situation, ce qu'il en a compris, ce qu'il a voulu faire et comment il a réagi.

Mesures embarquées

Que ce soit en simulateur ou sur piste, les mesures concernent à la fois les actions du conducteur sur les commandes du véhicule (angle volant, courses et efforts aux pédales, rapport de boîte...) et les réactions du véhicule à ces sollicitations (distance à l'obstacle, positions, vitesses et accélérations longitudinales et transversales, angles de lacet, roulis et dérive...). Toutes ces mesures sont réalisées de manière transparente pour les sujets. En parallèle, une vidéo de la route, du visage, des mains et des pieds du sujet est enregistrée.



Figure 11. Scénario accidentogène sur piste d'essais

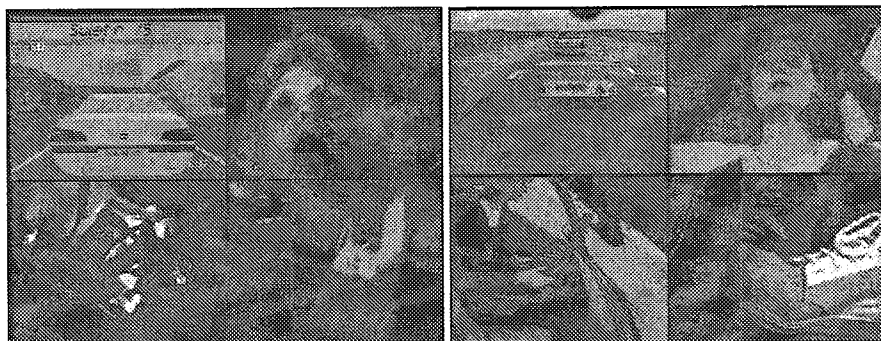


Figure 12. Images vidéo enregistrées en simulateur et sur piste

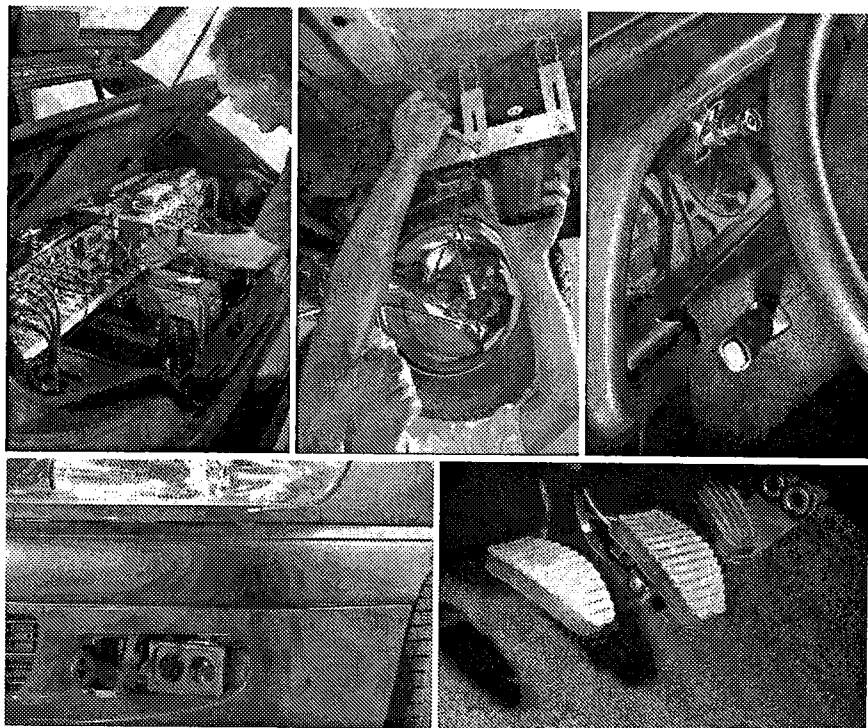


Figure 13. Matériel embarqué dans le coffre, capteur de vitesse optique sous le véhicule, caméra visage, télémètre laser dans le bouclier avant, pédalier instrumenté

Exemple de résultats expérimentaux généraux

L'analyse des réactions des sujets sur les commandes du véhicule dans ces expérimentations a permis de dégager des résultats généraux utiles pour la conception de systèmes de sécurité active, et notamment de montrer que :

- tous les conducteurs ont freiné, mais hors agglomération, seulement 50 % d'entre eux tentent un déport latéral ;
- 50 % des conducteurs n'ont pas activé l'ABS, et 80 % de ceux qui le déclenchent ne tentent pas de déport latéral, ce qui est paradoxal ;
- le temps entre l'apparition du danger et l'obtention de la décélération maximale du véhicule est en médiane de 1,7 s (figure 14) ;
- 40 % des conducteurs n'atteignent pas -7 m/s^2 de décélération maximale, sur un potentiel de -9 m/s^2 ;

- tous les coups de volant sont donnés à des instants où la situation n'est plus évitable par un freinage seul, et font donc partie intégrante de la manœuvre d'évitement ;
- 65% des conducteurs qui tentent des déports latéraux freinent avant de braquer ;
- tous les conducteurs qui se déportent relâchent le frein au cours de la manœuvre de déport ;
- les vitesses volant de contre-braquage sont plus élevées que celle du braquage ;
- plus de 50 % des conducteurs débrayent avant de freiner ou en pleine manœuvre d'évitement ;
- les femmes ont les mêmes performances que les hommes ;
- la dynamique des actions de relever de pied de l'accélérateur et les efforts à la pédale de frein augmentent avec l'expérience de conduite.

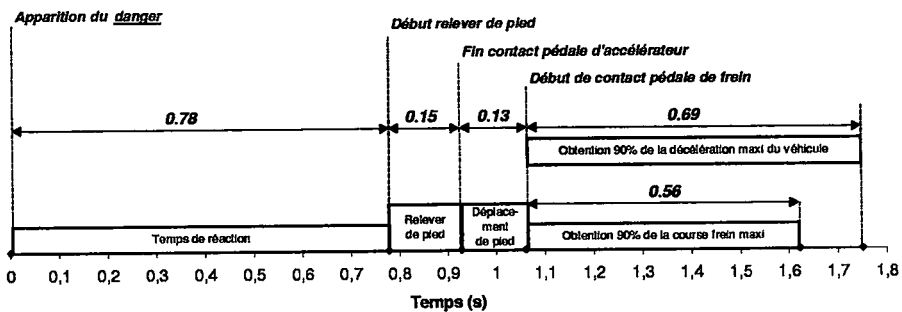


Figure 14. Décomposition des réactions de freinage des sujets (valeurs médianes)

Exemple de spécification fonctionnelle

Outre le fait que 50 % des conducteurs n'ont pas activé l'ABS, dans la majorité des cas les actions d'attaque de la pédale de frein comportent des paliers d'effort ou de course. Une assistance au freinage d'urgence (AFU) permettrait donc d'améliorer significativement l'efficacité des freinages.

Ces expérimentations ont permis d'obtenir des informations pour la spécification de tels systèmes. Le déclenchement de certaines AFU repose sur une valeur seuil de vitesse d'enfoncement pédale de frein. L'analyse combinée de la répartition des vitesses d'enfoncement pédale de frein en

situation d'urgence et en situation normale de conduite (figure 15) a ainsi permis de d'orienter le choix de valeurs seuil de déclenchement de ces AFU.

De manière générale, il ressort que les conducteurs évitent l'obstacle essentiellement grâce au déport latéral. Or, il a été montré que tous les conducteurs qui se déportent relâchent le frein en cours de manœuvre pour soulager le véhicule. Il semble donc souhaitable que les AFU fonctionnent en boucle fermée et que leur stratégie de régulation fournisse la possibilité de soulager le freinage une fois activées.

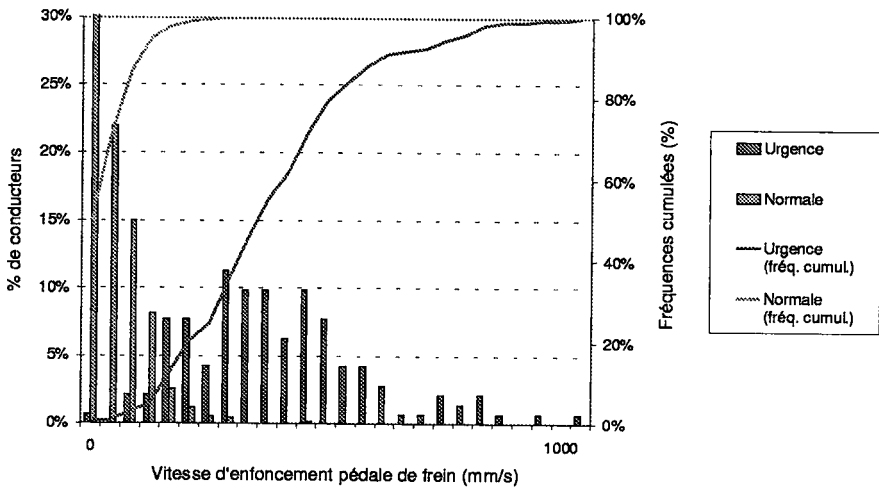


Figure 15. Répartition des vitesses d'enfoncement pédale de frein en situations d'urgence et en situations de conduite normale

Par simulation, il a été montré que dans les scénarios étudiés, une AFU aurait permis d'éviter 30 à 40 % des collisions. Dans encore 30 % des cas, alors que l'assistance ne permettrait pas d'éviter l'accident, la réduction des vitesses d'impact serait supérieure à 15 km/h. Au-delà des AFU qui sont réactives à une action du conducteur, un gain encore plus grand est à attendre de systèmes proactifs qui anticipent le freinage d'urgence : si le freinage était mis en œuvre au début du lever de pied de l'accélérateur (environ 0,3 s avant le freinage), plus de 70 % des collisions seraient évitées.

Ces chiffres partent cependant de l'hypothèse que l'assistance est effectivement toujours activée dans les situations d'urgence, ce qui est un cas idéal. En effet, compte tenu du recouvrement des distributions des situations d'urgence et des situations normales, les critères de déclenchement des AFU du type « seuil sur un paramètre » ne peuvent à la fois détecter toutes les

situations d'urgence et garantir que la sur-assistance ne sera jamais activée lorsqu'elle n'est pas nécessaire.

Afin d'optimiser les critères de déclenchement, les résultats obtenus sont donc utilisés pour définir des critères multi-variables reposant simultanément sur plusieurs paramètres (utilisation de méthodes de discrimination multi-factorielles comme l'analyse discriminante, la régression logistique, les réseaux de neurones...). En première approche, il a été montré que de tels critères permettraient d'augmenter significativement le nombre de personnes aidées en situations d'urgence. Une autre solution consiste à intégrer dans les critères des paramètres relatifs à l'environnement extérieur (comme la distance à l'obstacle) obtenus à partir d'un télémètre.

Discussion

Il existe deux types de simulateurs de conduite : les simulateurs statiques (à base fixe) et les simulateurs dynamiques (avec mouvement du véhicule). Cette étude a montré que les simulateurs statiques sont adaptés à l'étude des *accidents de guidance* (problèmes de positionnement du conducteur et de son véhicule par rapport à l'infrastructure et au trafic). Les résultats montrent que l'on peut considérer qu'en situation d'urgence le conducteur fonctionne sur un mode réflexe, en boucle ouverte : les biais perceptifs introduits par le simulateur ont peu d'effet sur le dosage initial des réactions d'évitement (temps de réaction, phase d'attaque de la pédale...). Le conducteur ne s'attend pas encore à ressentir les effets de ses actions initiales et l'absence d'accélération n'est donc pas perturbante.

Par contre, ceci n'est plus vrai pour la régulation des actions dans le temps : typiquement 500 ms après le début de l'action de freinage, les conducteurs ne ressentent pas la décélération et ont tendance à surdoser le freinage. Pour analyser la phase de régulation des actions, il faut donc de recourir à des essais sur piste. Le problème est le même pour l'étude des dysfonctionnements relatifs aux *accidents de contrôle* (pertes de contrôle), la tâche de contrôle étant différente en simulateur statique en raison du manque de retour d'informations dynamiques. Il est alors nécessaire de réaliser les essais en simulateur dynamique ou sur piste d'essais.

De manière plus générale, les expérimentations en simulateur ou sur piste semblent adaptées à l'analyse des *accidents de manœuvrabilité* ou de *sensibilité aux perturbations* (la situation accidentogène est provoquée par un élément extérieur au couple « conducteur-véhicule »), mais beaucoup moins à l'étude des *accidents de pilotabilité* (imputables à une erreur du conducteur). En effet, la probabilité réelle d'une erreur de conduite n'est pas compatible avec la durée d'une expérimentation. Il est possible d'accroître

artificiellement la probabilité d'erreur (en obligeant le conducteur à rouler trop vite ou en appliquant des masques de visibilité importants, par exemple), mais l'étude ne peut alors plus porter que sur l'analyse du dysfonctionnement lorsqu'il a été initié (manœuvres d'urgence, à l'exclusion des défaillances de conduite).

Conclusion

La conception de systèmes de sécurité active requiert des données sur les scénarios d'accidents et sur le comportement des conducteurs en situations accidentogènes. Cette démarche a été développée par le Laboratoire d'accidentologie, de biomécanique et d'études du comportement humain depuis 1994. Les études détaillées d'accidents permettent de déterminer les scénarios d'accidents réels. Les expérimentations en simulateur de conduite ou sur piste d'essais permettent de compléter ces informations et de caractériser précisément le comportement des conducteurs dans les scénarios identifiés, y compris les manœuvres de récupération qui ont effectivement abouti à l'évitement de l'accident.

Cependant, la spécification fonctionnelle de systèmes de sécurité active ne peut reposer que sur des données d'accidents. La connaissance des situations de conduite normale et du comportement normal des conducteurs (c'est-à-dire « hors situations accidentogènes ») est nécessaire pour garantir que les systèmes ne viendront pas perturber les conducteurs lorsqu'ils n'en ont pas réellement besoin. Ceci est essentiel pour l'acceptabilité de ces systèmes et par conséquent pour leur efficacité globale à réduire le nombre et la sévérité des accidents. Pour répondre à ce nouveau besoin, le LAB a engagé de nouvelles études relatives à l'observation du comportement des conducteurs sur route ouverte.

Bibliographie

- [ALL 98] ALLEAUME S., THOMAS C., PERRON T., LE COZ J.-Y., « Emergency Braking Patterns prior to Real World-Crashes », *FISITA World Automotive Congress*, 27 septembre-1er octobre 1998, Paris.
- [CHE 97] CHEVENNEMENT J., PERRON T., LE COZ J.-Y., « Contribution of a Motionless Driving Simulator to the Analysis of Driver's Behavior », in *Potential Accident Situations*, *EAEI international congress*, july 2-4 1997, Cernobbio.
- [DAM 97] DAMVILLE A., PERRON T., THOMAS C., LE COZ J.-Y., « Apport de l'accidentologie en sécurité primaire pour l'analyse des facteurs de risque », *1er congrès transversal Sécurité Automobile de la SIA*, 8 et 9 octobre 1997, Rouen.

[DAM 99] DAMVILLE A., MAUTUIT C., PERRON T., THOMAS C., « Défaillance des conducteurs en fonction de l'infrastructure routière au travers des Etudes Détaillées d'Accidents », *Assises Européennes de Psychologie Appliquée aux transports*, 16-19 juin 1999, Angers.

[HER 00] HERMITTE T., THOMAS C., PAGE Y., PERRON T., « Real-World Car Accident Reconstruction Methods for Crash Avoidance System Research », *FISITA World Automotive Congress*, juin 12-15 2000, Séoul.

[KAS 99] KASSAAGI M., PERRON T., PÉAN E., GUILLEMOT H., BOCQUET J.-C., « Study of drivers' behavior in rear-end accident situations on a driving simulator », *Driving Simulator Conference*, 7-8 juillet 1999, Paris.

[MAU 99] MAUTUIT C., DAMVILLE A., PERRON T., THOMAS C., LE COZ J.-Y., « Reliability of Drivers' Statements on a Driving Simulator », *Xie CMRSC Conference*, may 9-12 1999, Halifax.

[ONI 99] ONISR, Bilan annuel - Statistiques et commentaires, Année 1999.

[PER 96] PERRON T., THOMAS C., LE COZ J.-Y., BOCQUET J.-C., « Methodological Framework for Primary Automotive Safety », *15th ESV International Technical Conference*, may 13-17 1996, Melbourne.

[PER 97] PERRON T., Méthodologie d'analyse de sécurité primaire automobile pour la spécification fonctionnelle et l'évaluation prévisionnelle d'efficacité de systèmes d'évitement d'accidents, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, 1997.

[PER 98] PERRON T., CHEVENNEMENT J., DAMVILLE A., MAUTUIT C., THOMAS C., LE COZ J.-Y., « Pilot Study of Accident Scenarios on a Driving Simulator », *16th ESV International Technical Conference*, juin 1-4 1998, Windsor.

[PER 99] PERRON T., BRUTEL G., LE COZ J.-Y., KASSAAGI M., BOCQUET J.-C., « Etudes expérimentales de scénarios accidentogènes », *Second Carrefour PREDIT*, 23-25 mars 1999, Lille.

[TAR 96] TARRIÈRE C., BRUTEL G., PERRON T., CHENISBEST B., THOMAS C., DRISCOLL R., « European Accident Causation Survey », *ATA International Conference*, october 10-11 1996, Capri.

[THO 00] THOMAS C., DAMVILLE A., PERRON T., MAUTUIT C., LE COZ J.-Y., « Comportement humain en accidents corporels », *2ème congrès transversal Sécurité Automobile de la SIA*, 23-24 mai 2000, Rouen.

[THO 90] THOMAS C., KOLTCHAKIAN S., TARRIÈRE C., TARRIÈRE B., GOT C., PATEL A., « Primary Safety Priorities in View to Technical Feasibility Limits to Secondary Automotive Safety », *FISITA World Automotive Congress*, may 7-11 1990, Torino.

[THO 96] THOMAS C., PERRON T., LE COZ J.-Y., AGUADÉ V., « What Happens on the Road before Fatal Car Crashes ? », *40th AAAM Conference*, octobre 7-9 1996, Vancouver.

[THO 99] THOMAS C., HERMITTE T., PERRON T., LE COZ J.-Y., « Drivers Actions during Real-World Pre-crash Phases », *JSAE Spring Convention*, may 19-21 1999, Yokohama.

[WAN 81] WANNER J.-C., « Le facteur humain dans la conduite de grands systèmes », *Le Progrès Technique*, n° 21, 1981.