

Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS

D. LECHNER - INRETS Département Mécanismes d'Accidents
 Y. DELANNE - LCPC Section Interaction Route/Véhicule & Acoustique Routière
 G. SCHAEFER - SERA-CD (Société d'Etudes et Réalisations Automobiles)
 V.SCHMITT - DGA-ETAS Département Performance en Mobilité des Systèmes

RESUME

Cette communication présente les résultats obtenus dans le cadre d'un programme associant l'INRETS, le LCPC et la société SERA-CD, afin de mener à bien la validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS, développé par cette dernière. Ce travail a bénéficié de contributions de l'ETAS et de PSA pour les essais véhicules, et de MICHELIN pour la modélisation des pneumatiques. Un programme d'essais très complet a été réalisé avec 4 véhicules différents, dotés d'une instrumentation adaptée, sur chaussée sèche et mouillée, afin de couvrir la quasi-totalité du domaine de fonctionnement du véhicule, en dynamique transversale, longitudinale ainsi qu'en couplage de sollicitations. Les résultats de simulations présentés sont dans l'ensemble satisfaisants : ils mettent en évidence l'importance de la caractérisation des pneumatiques et de la qualité des paramétrages des véhicules d'essais.

ABSTRACT

This paper presents the work carried out by INRETS and LCPC with SERA-CD, to validate the road vehicle dynamic package called CALLAS, developed by SERA. This program benefited from important contributions from ETAS and PSA, for track tests and MICHELIN for tire modeling. Track tests were carried out with 4 very different cars, fitted with full data collection systems, on dry and wet roads. The overall vehicle operating area was covered : pure lateral and longitudinal dynamics and various combinations of these, from low solicitation up to and beyond the limit of adhesion. The simulation results are in general satisfactory, they reveal the large influence of tire characteristics and car of parameters on the precision obtained.

1. INTRODUCTION

La société SERA-CD a développé un modèle dynamique de véhicule baptisé CALLAS, qui permet de simuler de façon très complète l'ensemble des manoeuvres susceptibles d'être réalisées par un véhicule routier. CALLAS est un modèle 3D, non linéaire, couplé, jusqu'à la limite d'adhérence et doté d'une interface homme-machine évoluée.

A l'initiative de la DRAST (Ministère des Transports), un groupe de travail associant l'INRETS et le LCPC à la société SERA-CD a été constitué afin de mener à bien la validation du logiciel CALLAS [1]. Des contributions de

l'ETAS, PSA et MICHELIN [2] ont également permis la réalisation de cette étude.

Les situations dynamiques que veut valider l'INRETS sont en rapport à ses préoccupations dans le domaine de l'accidentologie : les dynamiques transversales et longitudinales ainsi que leur couplage jusqu'aux limites d'adhérence (freinages d'urgence, manoeuvres d'évitement par déport latéral et des combinaisons variées de ces actions). L'objectif est de se doter d'un outil permettant d'étudier les différentes formes de pertes de contrôle sur sites réels en particulier en courbe et sur chaussée mouillée.

Pour le LCPC, il s'agit d'étudier l'influence de la géométrie de la route, des irrégularités de surface du domaine de l'uni et des performances locales d'adhérence sur le potentiel instantané des usagers en conditions de manoeuvres d'urgence. Ses points particuliers d'intérêt sont la modélisation des distances d'arrêt avec et sans blocage de roues, sur chaussée plus ou moins déformée, et l'analyse plus globale des facteurs "route" dans l'insécurité routière : "La route qui pardonne".

Cette recherche a permis de découvrir et de résoudre de nombreux problèmes liés à la validation d'un logiciel de dynamique et de mettre au point une véritable méthodologie de validation, dont les principales étapes sont :

- la définition, la réalisation et le dépouillement des essais,
- l'élaboration des caractéristiques de pneumatiques et la prise en compte de la nature des revêtements,
- la définition et la mise au point des paramétrages véhicules,
- l'exécution des simulations et l'analyse des résultats.

2. LES ESSAIS DE VALIDATION

Nous avons défini un ensemble de manoeuvres à réaliser sur chaussée sèche et/ou mouillée, de manière à couvrir l'ensemble du domaine de fonctionnement du véhicule dans les différentes directions de sollicitations.

Pour la dynamique transversale : virage établi en régime permanent à vitesse moyenne et en limite d'adhérence, mise en virage (lente, rapide et du type "spirale"), passage d'une chicane du type norme ISO, slalom en boucle fermée à la limite d'adhérence,

Pour la dynamique longitudinale : freinage à la limite du blocage et roues bloquées, freinage avec fonctionnement d'antibloquants (ABS),

Pour la dynamique couplée : freinage avec adhérences gauche droite différentes, lever de pied en courbe, freinage en courbe, manoeuvres combinées freinage/évitement.

Au total, plus de 25 cas d'essais différents ont été réalisés par véhicule en conditions de

chaussée sèche et mouillée pour des vitesses variant de 40 à 110 km/h.

Figure 1 : Citroën BX en chicane ISO limite

3. FAIRE UNE SIMULATION AVEC CALLAS

CALLAS est un logiciel de simulation de dynamique automobile permettant de décrire le comportement du véhicule dans la totalité de son domaine de fonctionnement. Une des spécificités de CALLAS est que le même code de calcul peut être utilisé pour décrire des véhicules de tourisme (cadre de cette étude) des véhicules de compétition pour lesquels les phénomènes aérodynamiques sont essentiels, ou des véhicules tout terrain, pour lesquels les entrées sol revêtent une importance toute particulière. L'approche fonctionnelle dans la modélisation y est poussée à l'extrême : on décrit le fonctionnement des sous-systèmes constituant le véhicule à travers leurs effets sous forme de tableaux de chiffres interpolés, plutôt que d'en effectuer une modélisation détaillée du type multicorps par exemple.

Le cœur de calcul de CALLAS est un modèle à 17 degrés de liberté (ddl), comprenant les 6 ddl de la caisse, et 2 ddl par roue (rotation propre et rayon sous charge), la rotation du moteur, un ddl de direction et une éventuelle régulation de vitesse. CALLAS est couplé (les couplages entre les ddl sont pris en compte) et non linéaire (par exemple au niveau des pneumatiques en dérive et charge verticale, des ressorts et amortisseurs, de la cinématique des suspensions).

L'utilisateur peut choisir, en fonction de ses pôles d'intérêt et des données dont il dispose, le degré de complexité de la modélisation des

différents éléments composant le modèle de véhicule.

Le logiciel utilise EXCEL en post-traitement, ce qui permet de tracer très rapidement de nombreux graphiques décrivant des résultats de simulations (500 variables disponibles à chaque pas de temps), avec superposition directe des données de mesure. Un module d'animation permet également de visualiser le comportement du véhicule sous forme d'images de synthèse tridimensionnelles.

Faire une simulation avec CALLAS nécessite de définir 4 fichiers :

- le véhicule modélisé décrit sous-système par sous-système (notions d'éléments fonctionnels),
- les commandes de la simulation : actions du conducteur sur le volant, l'accélérateur et le frein sous forme de lois temporelles, mais également des éventuelles perturbations de l'environnement (vent).
- le sol qui peut être décrit de plusieurs façons ; dans cette étude nous utilisons une description en aire d'essais plane,

légèrement inclinée, avec un angle connu précisément.

- le paramètre d'utilisation qui décrit les conditions initiales d'une simulation (vitesse, position, orientation du véhicule), les stratégies de changement de vitesse et de régulation en propulsion/freinage, les conditions atmosphériques...

4. LES VEHICULES D'ESSAIS

4 véhicules ont participé aux campagnes d'essais : une PEUGEOT 605 SRI, caractérisée et instrumentée par PSA, un RENAULT ESPACE QUADRA RXE 2.2 I, instrumenté par l'ETAS, une CITROËN BX 16 TGS et une PEUGEOT 306 XR, véhicules instrumentés par l'INRETS. Les résultats du quatrième véhicule ne seront pas présentés ici, son paramétrage n'étant pas encore finalisé.

Chaque véhicule disposait d'une instrumentation spécifique à l'équipe le mettant en oeuvre. Les paramètres mesurés pour les différents véhicules sont récapitulés dans le tableau suivant.

PEUGEOT 605	RENAULT Espace	CITROËN BX	PEUGEOT 306
déplacement crémaillère position accélérateur effort sur la pédale de frein vitesse longitudinale (radar) vitesse angulaire de rotation des roues lacet et vitesse de lacet accélérations en x,y,z près du CdG roulis et vitesse de roulis	angle de braquage volant position accélérateur pression de freinage au maître cylindre vitesse longitudinale (5 ^{ème} roue) vitesse angulaire de rotation des roues vitesse de lacet accélérations longitudinale et transversale angle de roulis, tangage, lacet	déplacement crémaillère position accélérateur pressions de freinage dans les circuits avant et arrière vitesse longitudinale (correvit) vitesse angulaire de roues (2av, 1ar) vitesse de lacet accélérations longitudinale et transversale vitesse de roulis	déplacement crémaillère position accélérateur effort pédale et 5 pressions dans le circuit de freinage (ABS) vitesse longitudinale (correvit) vitesse angulaire de roues avant vitesse de lacet accélérations longitudinale et transversale vitesse de roulis et de tangage
4 débattements de suspension	débattements de suspension arrière	4 débattements de suspension	débattements de suspension AR

Tableau 1 : Récapitulatif des informations mesurées sur les véhicules d'essais

5. GENERALITES SUR LA VALIDATION

Le principe de la validation est de soumettre en parallèle le modèle de simulation et le véhicule réel aux mêmes commandes et de

comparer leurs réponses. Compte-tenu des itérations nécessitées par l'évolution du paramétrage du véhicule, la manipulation et la comparaison à l'intérieur de la simulation a été rendue automatique. La figure 2 donne l'architecture globale de la démarche de validation .

C'est en fait tout un ensemble qui est soumis à "l'épreuve du feu" :

- l'outil de calcul avec ses hypothèses, sa mise en équation,
- le paramétrage du véhicule et des pneumatiques : aussi bien au niveau de leurs méthodes d'élaboration que de leurs prises en compte par le logiciel,
- l'acquisition des données en essai (pertinence des paramètres mesurés, validité et précision des mesures)...

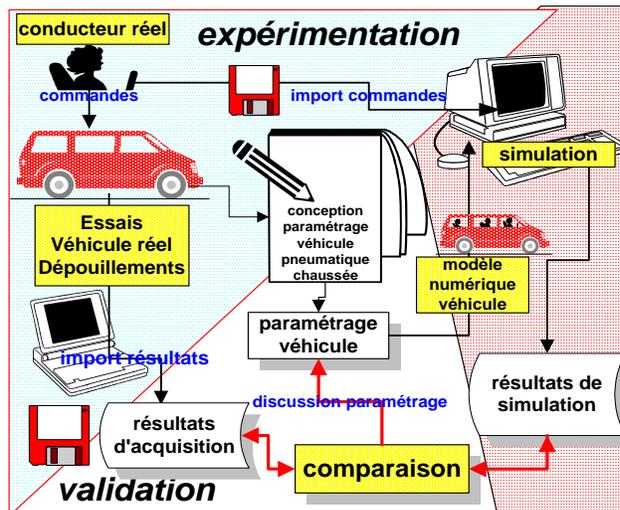


Figure 2 : Synoptique de la démarche de validation

Chacun de ces éléments est susceptible d'introduire un certain pourcentage d'écart entre l'essai réel et la simulation correspondante. Pour obtenir un bon résultat il faut s'attacher à obtenir une précision maximale dans chaque domaine.

La validation du logiciel doit être établie de façon progressive, en commençant par des sollicitations simples (longitudinale et transversale) puis en augmentant progressivement la complexité des sollicitations jusqu'à des niveaux extrêmes pour chaque direction ainsi qu'en manoeuvres couplées. Il est déjà nécessaire d'obtenir de bons résultats sur les simulations des manoeuvres transversales pures, jusqu'à la limite des performances du véhicule, avant de vouloir simuler des manoeuvres combinées, où de violents freinages vont venir se superposer aux

6.1. Régime établi transversal

sollicitations transversales, donnant lieu à de forts couplages.

Il est clair qu'il n'est possible de simuler correctement le comportement dynamique d'un véhicule jusqu'à sa limite d'adhérence que si toutes les conditions nécessaires sont remplies. Le degré d'exigence sur le paramétrage croît de façon importante avec le niveau de sollicitation. La validité et la qualité des données nécessitent de nombreuses précautions et vérifications.

Pour la Peugeot 605, nous avons pu disposer des informations détaillées et complètes du constructeur, pour la Renault Espace une caractérisation de certains sous-systèmes à partir de mesure sur le véhicule d'essai a été entreprise par l'ETAS, pour la Citroën BX, le paramétrage a été élaboré à partir de différentes sources (données constructeur, mesures, identification...).

Dans tous les cas, la construction puis l'affinage du paramétrage est le fruit de très nombreuses itérations, étalées sur plus d'un an.

6. RESULTATS

Avant de présenter quelques simulations effectuées avec CALLAS, rappelons qu'un examen de l'état de l'art en validation [3 à 6] montre qu'en général :

- les manoeuvres transitoires sont plus difficiles à simuler que les régimes établis,
- l'écart calcul/mesure tend à augmenter avec le niveau de sollicitation,
- certaines variables (dérivées d'ordre élevé, trajectoire) sont plus difficiles à simuler de façon précise que d'autres (accélération, vitesse de lacet).

Nous allons présenter une sélection de simulations permettant d'illustrer comment CALLAS se comporte sur ces différents aspects, de donner une vision générale des performances obtenues et d'illustrer quelques problèmes sur lesquels nous estimons nécessaire de continuer à progresser.

Pour illustrer les résultats obtenus en régime établi, la figure 3 superpose les accélérations transversales pour des extraits de 3 secondes de simulation (en trait continu) et d'acquisition (en pointillés) obtenus sur les 3 véhicules au cours du virage stabilisé sur un rayon de 60 m en sollicitation modérée (vers 60 km/h) et limite (vers 80 km/h). Il est clair que ces comparaisons nécessitent des vitesses simulées rigoureusement similaires à celles mesurées, ce qui sollicite fortement la précision de la modélisation du sous-système motorisation. C'est le cas ici à moins de 0.5 km/h près pour la BX et 1 km/h pour l'Espace et la 605. Les résultats sont très corrects sur les 3 véhicules : les écarts sont très faibles en sollicitations modérées et restent inférieurs à 5 % en passage limite (les écarts les plus importants étant liés à des inexactitudes des vitesses).

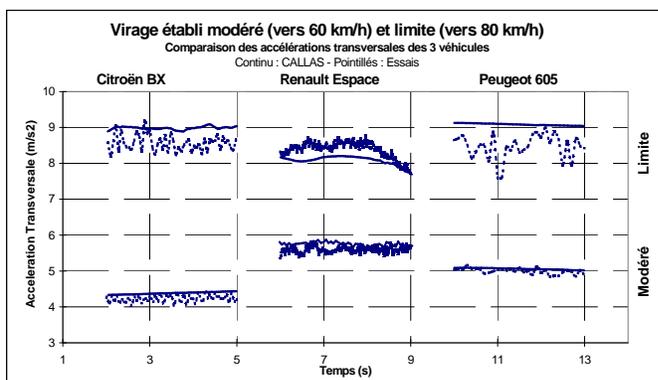


Figure 3 : Résultats en régime établi

6.2. Régime transitoire violent

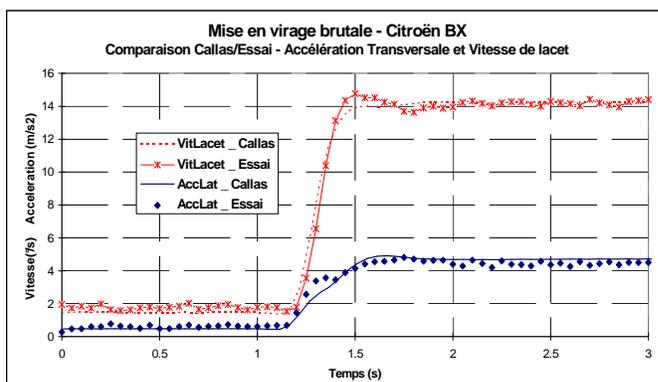


Figure 4 : Mise en virage brutale

La figure 4 illustre une mise en virage brutale de la BX avec une vitesse de rotation du volant qui atteint 450 °/s, ce qui est considérable. On a représenté simultanément l'accélération transversale et la vitesse de lacet. Ces 2 paramètres sont très bien restitués tant sur le transitoire que sur le palier

stabilisé qui suit, même si le calcul montre une surtension un peu plus vive que la mesure pour l'accélération, alors que c'est l'inverse pour la vitesse de lacet.

6.3. Chicane ISO de difficultés croissantes

Il s'agit ici de montrer comment le logiciel se comporte sur une manoeuvre connue des spécialistes de dynamique des véhicules pour être sévère et discriminante entre véhicules : la chicane ISO, franchie par la Citroën BX à 3 vitesses différentes : 64, 85 et 110 km/h.

Les évolutions temporelles des accélération transversale et vitesse de lacet montrent que les résultats restent très satisfaisants lorsqu'on augmente le niveau de sollicitation (Figure 5).

Sur cette manoeuvre, nous avons également mis en évidence la sensibilité de la reconstitution de trajectoire à une faible modification de la commande volant. La figure 6 présente cette trajectoire pour le passage à 110 km/h, telle qu'obtenue à partir de la commande volant enregistrée, et si on augmente cette commande de 1° (sur une valeur maximale de 80°) : l'écart atteint près de 0.8 m en entrée du dernier couloir et 1.3 m en sortie ce qui est considérable.

L'explication de cet écart est la suivante : en augmentant le braquage sur le premier coup de volant à gauche, le véhicule tourne d'un angle de cap (lacet + dérive) plus important, qui associé à la vitesse de l'ordre de 30 m/s, donne cet écart conséquent en terme de trajectoire en sortie de la chicane, alors que l'accélération transversale est fort peu modifiée par cette variation de la commande. Lorsqu'on atteint la limite du véhicule, on met en évidence les limitations de l'approche en boucle ouverte, alors que le rôle de l'essayeur est essentiel pour assurer le contrôle de la trajectoire.

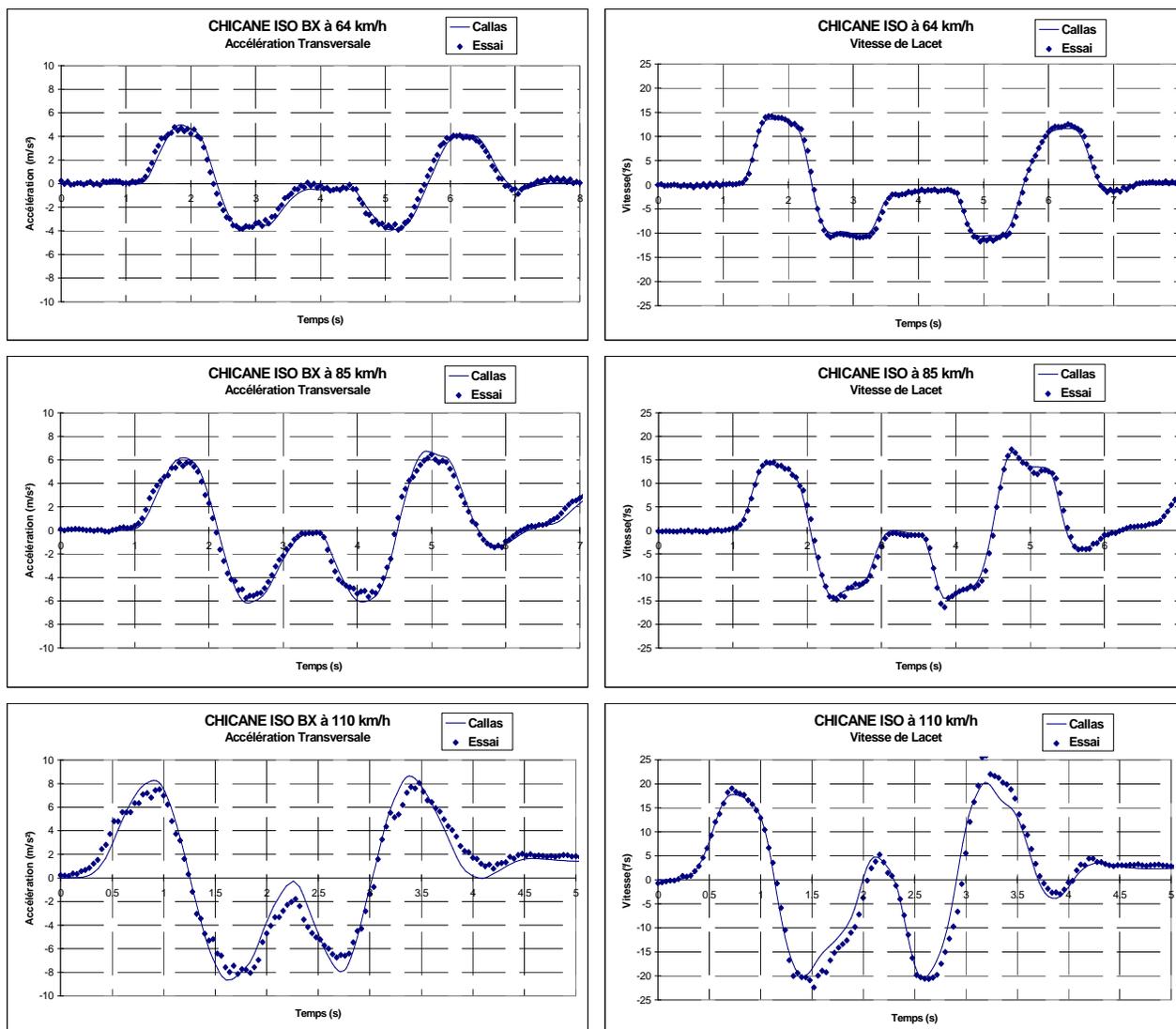


Figure 5 : Chicane ISO sur BX à 64, 85 et 110 km/h

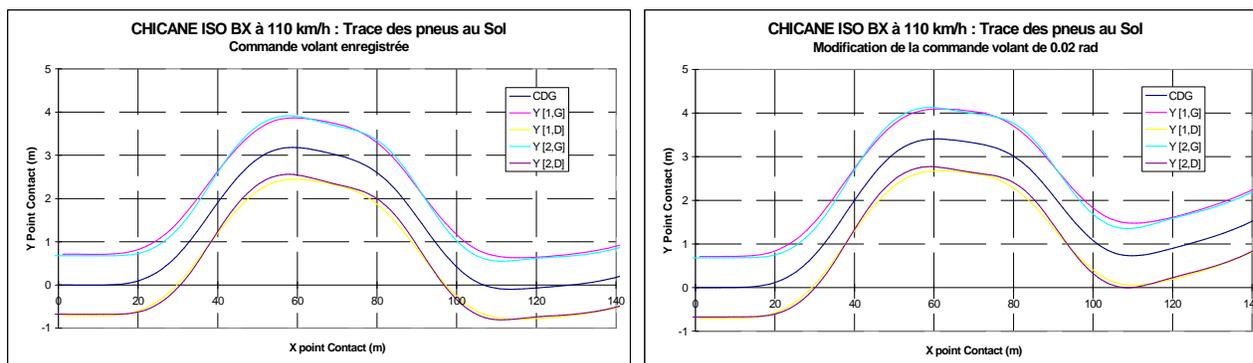


Figure 6 : Sensibilité de la trajectoire à une modification de la commande volant

Sur les véhicules les plus lourds, et notamment l'Espace, nous avons été confronté à un problème de pics indésirables venant se superposer à un signal calculé globalement correct dans les zones de forte accélération

transversale : nous attribuons essentiellement ce phénomène à une mauvaise connaissance des caractéristiques des pneumatiques pour de très fortes valeurs de charge verticale : le dernier point de mesure est à 700 daN, alors

que nous avons dû effectuer des extrapolations pour des charges instantanées jusqu'à 2 fois supérieures, qui sont sans doute incorrectes.

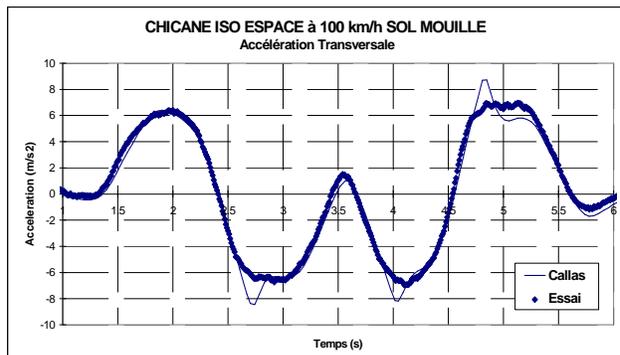


Figure 7 : Pics indésirables sur accélération transversale aux très fortes charges

6.4. Manoeuvre transitoire extrême : slalom en limite d'adhérence

Cette manoeuvre est présentée figure 8 pour la 605 sur sol mouillé : le pilote effectue 8 périodes en 16 s avec une amplitude de 200° . Les résultats en terme d'accélération transversale, qui culmine à 9 m/s^2 , vitesse de lacet, qui dépasse parfois $50 \text{ }^\circ/\text{s}$ et roulis de suspension arrière, sont globalement bons, même si certains pics d'accélération en calcul sont au-delà de la mesure, alors que la vitesse de lacet est plutôt sous-estimée par le modèle. Ces écarts sont provoqués par une inexactitude de la vitesse de dérive, qui traduit le début du dérapage, sans doute liée à une imprécision de quelques pourcents de la limite d'adhérence.

6.5. Comportement en freinage

La figure 9 illustre un freinage d'urgence de la BX sur sol sec. La comparaison des décélérations mesurée et calculée montre que le modèle est très légèrement en avance sur la mesure au niveau du pic initial. Cela est dû à l'absence de temps de réponse de la commande de freinage, qui devra être introduite comme perfectionnement dans le modèle. Les niveaux de décélération calculés sont bons tant sur le pic que lors du blocage qui suit, à l'exception de l'augmentation finale de la décélération, qui n'est pas reproduite par le modèle.

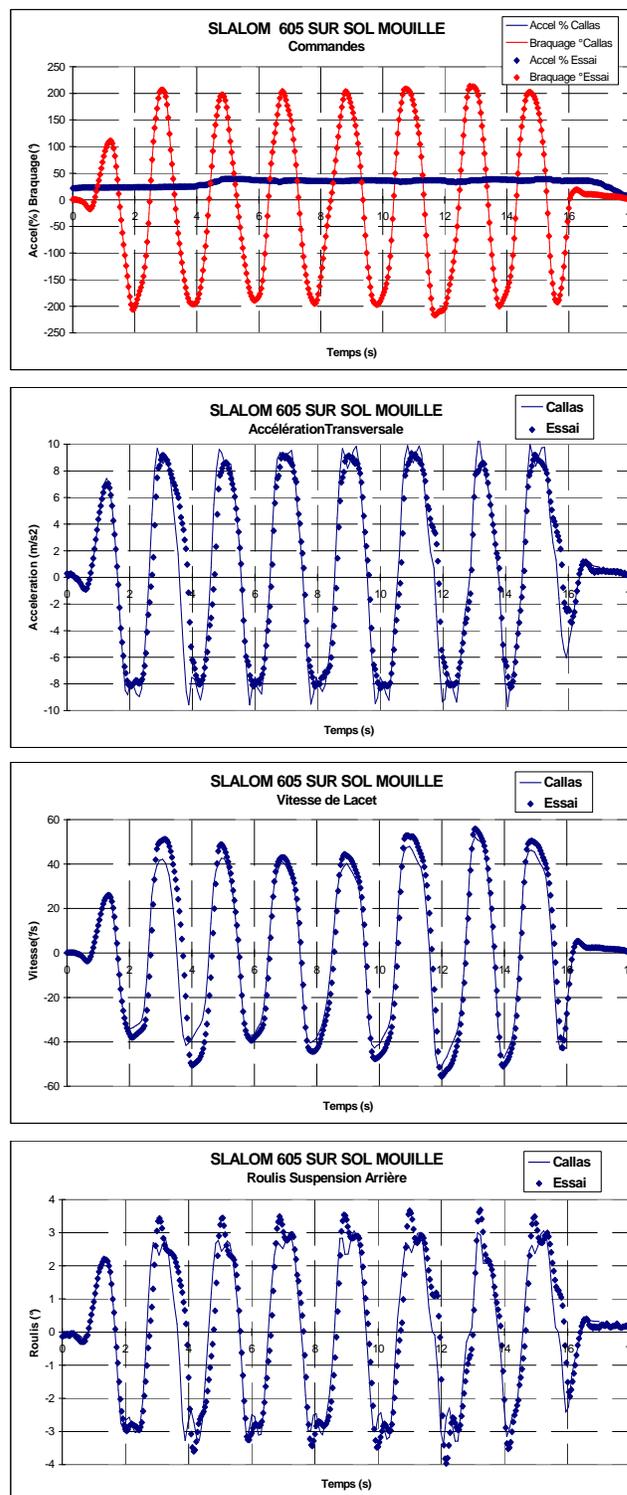


Figure 8 : Slalom sol mouillé 605 en limite d'adhérence

Le tracé des tangages suspension montre la principale limitation de la représentation de la suspension hydro-pneumatique de la BX par un équivalent mécanique : pour le calcul l'arrière de la voiture reste levé, alors que la mesure revient presque en position initiale à partir de l'instant 3 seconde, suite à

l'intervention du correcteur d'assiette non modélisé.

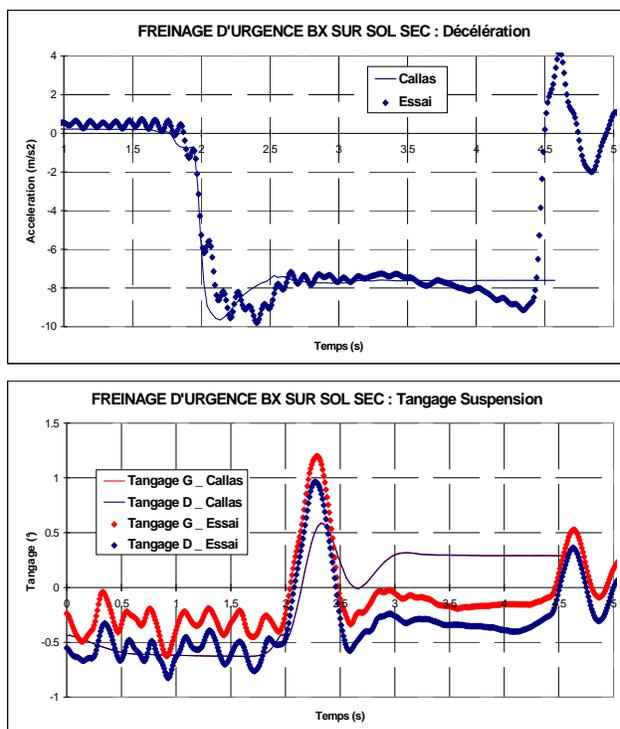


Figure 9 : Freinage d'urgence sur sol sec BX

6.6. Manoeuvres combinées

Ce sont manifestement les plus difficiles à reproduire car de violents coups de freins sont superposés sur la manoeuvre de changement de voie. La figure 10 montre que la simulation des accélérations longitudinale et transversale n'est pas parfaite tout au long de la manoeuvre. Nous considérons cependant que certaines voies de progrès existent, et que les améliorations envisageables au niveau des sollicitations pures, vont se répercuter sur la qualité de ces résultats.

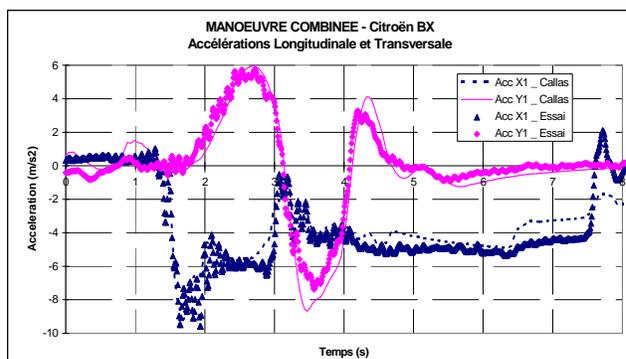


Figure 10 : Accélérations longitudinale et transversale en manoeuvre combinée (BX)

7. SYNTHÈSE DES ENSEIGNEMENTS

L'obtention de bons résultats en simulation nécessite de nombreuses précautions :

- effectuer des validations d'essais de difficulté progressive : partir de manoeuvres dans une seule direction de sollicitation avec des niveaux de sollicitations croissants, pour arriver à des manoeuvres combinées. On peut dire également que l'on débute en boucle ouverte pour finir en boucle fermée, lorsque l'essayeur pilote véritablement le véhicule à la limite.
- valider autant que possible les paramètres décrivant le véhicule à l'aide d'essais analytiques spécifiques : exemple des C_x , traînée de roulement et frottements divers validés par un essai de décélération sur sol plan en absence de vent.
- mettre au point un modèle longitudinal précis qui permet de reconstituer de façon fiable la vitesse du véhicule tout au long d'un essai, y compris à charge variable, ce qui est un préalable indispensable à toute validation fine : il est illusoire de comparer des accélérations transversales si les vitesses en essai et calcul ne sont pas rigoureusement identiques. Cela nécessite en particulier de constituer un champ moteur précis (couple fonction du régime et de l'ouverture papillon).

Les points les plus importants mis en évidence par les résultats de ce travail sont les suivants :

- la représentation du pneumatique apparaît particulièrement critique, et nécessite la caractérisation des pneumatiques précisément utilisés par les véhicules d'essais, sur les pistes mêmes où se sont déroulés les essais. Par ailleurs, ces caractérisations ne pouvant être que partielles, des précautions doivent être prises lors d'extrapolations, particulièrement dans le domaine des très fortes charges verticales.
- la connaissance précise de toutes les caractéristiques des suspensions (loi effort-débattement, courbe de butées, loi d'amortissement, caractéristiques cinéma-

tiques et élasto-cinématiques) est nécessaire, dès lors que l'on recherche un degré de précision important dans une simulation et pas uniquement dans le domaine des sollicitations extrêmes. En outre les véhicules sensibles aux réglages et ayant déjà eu "une vie bien remplie" demandent une individualisation de ces caractéristiques, en particulier pour l'élasto-cinématique.

Les fortes sollicitations sont particulièrement révélatrices de la qualité du modèle et des paramétrages véhicules et pneumatiques : la multiplicité des phénomènes non linéaires entrant en jeu rend l'ensemble beaucoup plus sensibles à la moindre imperfection.

Nous avons constaté cependant que les sollicitations moyennes, lorsque le potentiel d'adhérence du pneumatique n'est pas saturé, sont particulièrement sensibles aux paramètres "véhicule" ("suspension" en particulier), alors qu'à la limite d'adhérence, une bonne représentation des efforts pneumatiques peut gommer certains défauts des paramétrages suspension et donner de très bons résultats.

Nous considérons que les résultats obtenus sur les différents véhicules sont globalement satisfaisants, avec en particulier des écarts calcul/mesure qui n'augmentent pas sensiblement avec le niveau de sollicitation, ce qui est un acquis significatif de ce programme. Quelques points ne nous donnent cependant pas satisfaction.

- L'apparition de pics indésirables dans les zones d'accélération transversale élevée, qui viennent s'ajouter à une courbe globale calculée correcte, pour les fortes sollicitations transitoires (chicanes ISO limite et slaloms). Nous avons identifié deux causes principales à ce phénomène :

- une mauvaise réponse du pneumatique à des charges verticales transitoires extrêmes, qui est liée à l'absence de points de mesure des pneumatiques sous de tels niveaux de charges et nous a contraint à des extrapolations sans doute inexactes.

- une mise en butée trop violente du fait de courbes de butées insuffisamment documentées.

- Les difficultés à transposer pour différents sites les données de caractérisation des pneumatiques pour chaussée mouillée à partir de mesures effectuées sur un site. Alors que la transposition des caractéristiques de pneumatiques mesurées sur une chaussée sèche à d'autres revêtements ne pose, en général, pas de problème, les phénomènes sont beaucoup plus complexes sur le mouillé : l'adhérence dépend du revêtement, de la hauteur du film d'eau, et des variations en fonction du temps sont également observées. Ce point ne relève évidemment pas de la modélisation proprement dite mais le développement des connaissances est impératif, si on veut progresser dans la connaissance fine du comportement des véhicules sur chaussée mouillée, notamment pour l'accidentologie.

Nous considérons donc que les sources principales des écarts modèle/essai constatés sont :

- quelques insuffisances dans les paramétrages véhicule et pneumatique (charges extrêmes et sol mouillé),
- des insuffisances locales de modélisation de sous-systèmes (freinage trop idéalisé, impossibilité de prise en compte détaillée d'états légèrement dégradés des véhicules d'essais).

8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats obtenus sur trois véhicules très différents permettent de mieux cerner la validité générale de CALLAS :

- les résultats de simulation sont globalement satisfaisants,
- les écarts calcul/mesure constatés n'augmentent pas sensiblement avec le niveau de sollicitations, en dehors de défauts spécifiques pour lesquels des voies de progrès existent,

- le logiciel est performant pour des architectures de véhicule très diverses : traction, 4 roues motrices, dans des comportements sousvireur et survireur.

Les objectifs déclarés de ce logiciel nous semblent atteints très correctement :

- une bonne fiabilité informatique et de façon plus générale son aspect opérationnel, grâce à sa facilité d'utilisation,
- la possibilité de modéliser "tout véhicule, dans toute situation, pour tout niveau de sollicitation", avec un degré de validité élevé et une bonne sensibilité aux paramètres.

Les travaux en cours consistent à réduire la part du logiciel et du paramétrage dans les écarts constatés. La mise à disposition d'un outil permettant de réaliser des simulations valides jusqu'à la limite d'adhérence, pour des véhicules d'architectures variées, nous permettra d'entreprendre un programme de développement de ce modèle afin de répondre à des besoins spécifiques concernant l'accidentologie pour l'INRETS et l'évaluation des performances route/véhicule dans des sections routières à risque pour le LCPC :

- modèle de conducteur pour s'intéresser au comportement en boucle fermée,
- interaction du pneumatique avec une chaussée réelle complexe (notamment la prise en compte des entrées verticales "route" et la variation spatiale du dévers),
- représentation des états dégradés du véhicule (sous-gonflage des pneumatiques).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la DRAST (Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques du Ministère des Transports) pour l'aide apportée dans la mise en place de ce programme, ainsi que PSA pour sa participation aux essais et MICHELIN pour sa contribution à la modélisation des pneumatiques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *D. Lechner, Y. Delanne, G. Schaefer, V. Schmitt. Dynamique du véhicule en situation d'urgence ou perte de contrôle : Validation du modèle CALLAS.* Rapport de convention DRAST (diffusion restreinte).
- [2] *P. Bayle, J.F. Forissier, S. Lafon. A new tyre model for vehicle dynamics simulations.* Automotive Technology International 1993.
- [3] *G. Schaefer, D. Lechner, Y. Delanne, V. Schmitt. Callas : a decisive step toward validity for 3d vehicle dynamics.* ISATA 97SAF005.
- [4] *D. Lechner. Dynamique du véhicule en situation d'urgence.* SIA octobre 1987.
- [5] *A.G. Nalecz. Development and validation of Light Vehicle Dynamics Simulation (LVDS).* SAE 920056.
- [6] *W. & D. Milliken. Race car vehicle dynamics.* SAE 1995