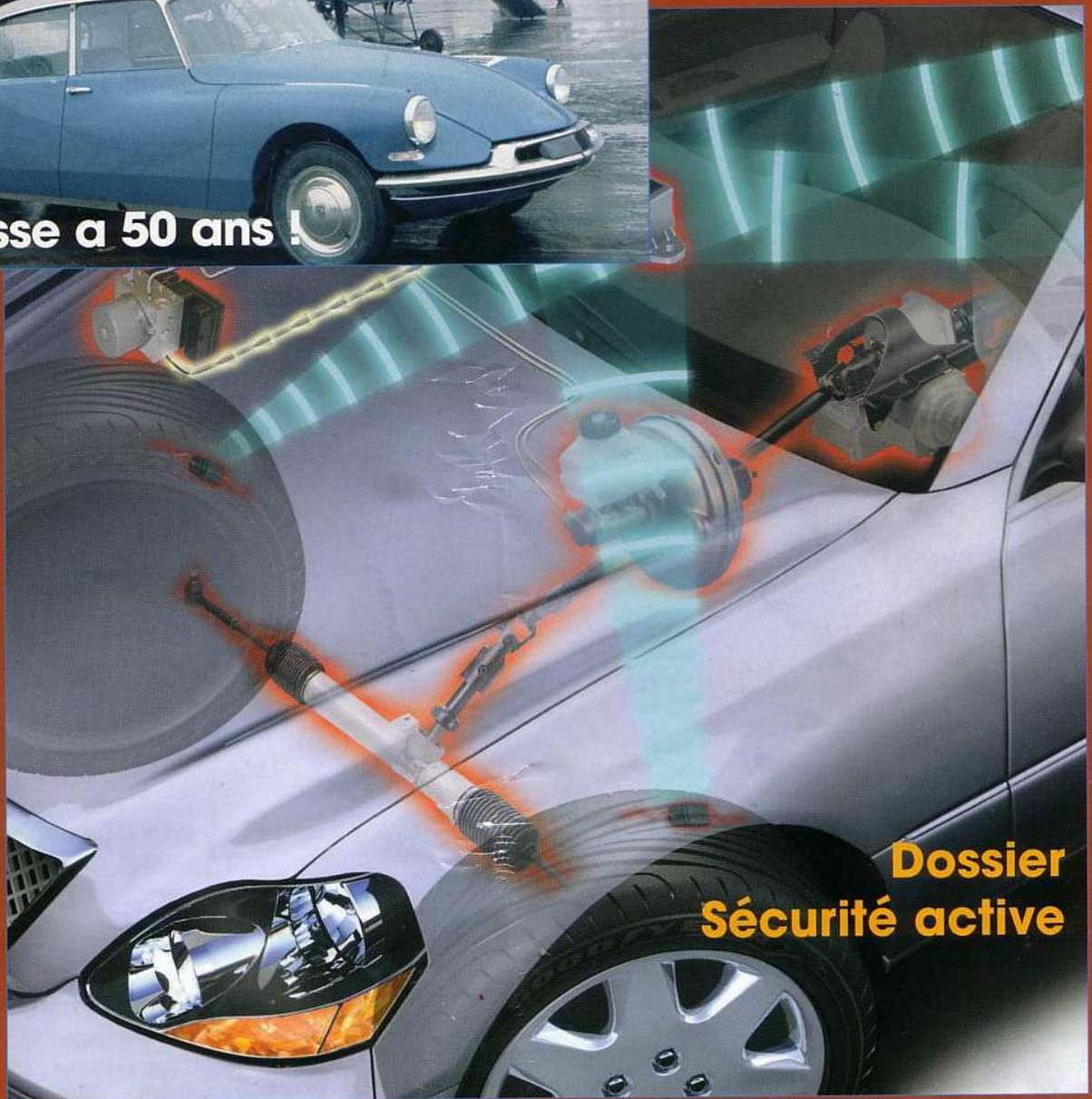


INGÉNIEURS de L'AUTOMOBILE



La déesse a 50 ans !



**Dossier
Sécurité active**

**Un métier : ingénieur acoustique et vibrations
Conférences : Dynamique du véhicule**

N°778 Octobre 2005 / 23€

ISSN 0020 - 1200



Estimateur embarqué de l'adhérence disponible

Gilles SCHAEFER
Chef de Projet, SERA-CD

Daniel LECHNER
Directeur de Recherche,
INRETS-MA

Gérard YAHIAOUI
Directeur, NEXYAD SA

Jean-Pierre COLINOT
PSA-DRIA

Objectif technique

L'adhérence disponible est un des facteurs essentiels de la sécurité routière en général et des aides à la conduite en particulier.

Or, l'adhérence n'est pas correctement appréciée par la majorité des conducteurs ; ces conducteurs ont l'excuse de ne pas avoir cette information "adhérence" au tableau de bord, au contraire d'autres paramètres, comme la vitesse, ni d'avoir le recoupement entre adhérence, vitesse et les difficultés de la route (sinuosité, visibilité, uni, ...) pour l'aider à apprécier le risque.

Les seuls systèmes qui évaluent, pour leur utilisation interne, cette valeur d'adhérence sont l'antipatinage et l'ABS, mais seulement quand ils sont en régulation, c'est-à-dire le plus souvent pendant des situations d'urgence. Cette information n'est donc disponible que rarement et souvent trop tard pour être utilisée dans des systèmes visant à prévenir les accidents.

Contexte du travail

Ces travaux, de type étude de faisabilité, ont été effectués dans le cadre de l'action concertée de recherche sur la sécurité ARCOS [1], financée partiellement et conjointement par les Ministères de l'Industrie, des Transports et de la Recherche, et faisant elle-même partie du PREDIT (Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres). SERA a proposé une organisation intégrée des 7 partenaires correspondant à une architecture informatique répartie de différents modules (voir figure 1).

Nous présentons ici la partie du travail qui a été regroupée dans un démonstrateur, et qui ne constitue pas l'intégralité des travaux effectués.

Développement effectué

Difficultés

Comme le montrent les figures 2 à 5, l'adhérence fluctue avec 5 sources et 5 acteurs différents :

- Les conditions atmosphériques,
- Le type, l'usure et la pollution de la chaussée, dépendant du gestionnaire de la route,
- Le véhicule et la monte du pneu dépendant du constructeur
- L'usure et le gonflage du pneu dépendant du propriétaire du véhicule ou d'un gestionnaire de parc,
- Le cas de charge réel et la vitesse instantanée dépendant du conducteur.

Remarquons que l'adhérence intéressante pour le conducteur est celle du couple pneumatique chaussée telle que lue par le véhicule à l'instant

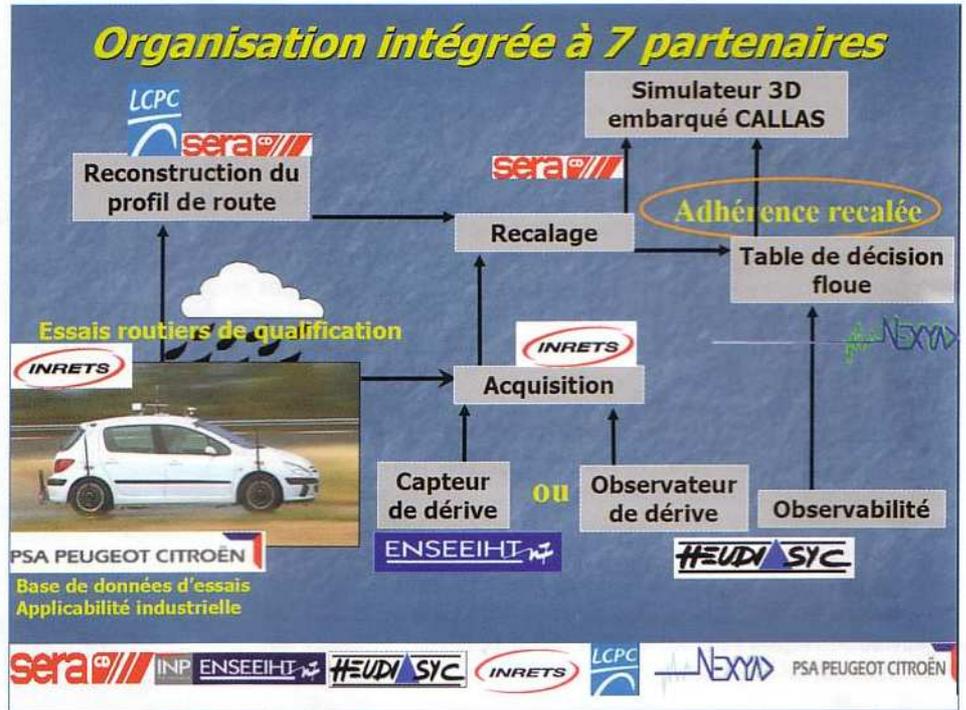


Figure 1 : Organisation intégrée

présent ("ici et maintenant"), seule la solution embarquée permet de mesurer toutes les fluctuations.

La présente recherche vise au contraire à estimer l'adhérence disponible dans tous les cas de sollicitation, ce qui est réputé difficile, notamment à cause de la faiblesse des glissements mis en jeu aux faibles sollicitations, et également de la concurrence des erreurs : le vent, la pente, le dévers et l'uni de chaussée perturbent les glissements de quantités du même ordre de grandeur que l'adhérence.

Principe de la solution proposée

L'adhérence pneu-chaussée est égale à F_{Xmax}/F_Z et F_{Ymax}/F_Z avec F_X , F_Y et F_Z effort instantanée pneu/chaussée, l'indice max indi-

quant potentiel maxi obtenu au glissement optimum. Nous avons donc 8 adhérences pour un véhicule à 4 roues.

Divers principes de détermination de l'adhérence peuvent être utilisés sur les causes type texture, sur les effets type glissement, sur les effets secondaires (bruits), utilisant ou non des organes dynamométriques.

Nous avons choisi l'architecture illustrée par la figure 6.

Le principe retenu est la « méthode du modèle » utilisée en Temps Réel, dans laquelle on compare à chaque instant la réponse de la voiture, mesurée par capteurs physiques, à la réponse du modèle implémenté dans le véhicule, consistant en un simulateur de conduite 3D non Linéaire CALLAS [2, 3], et

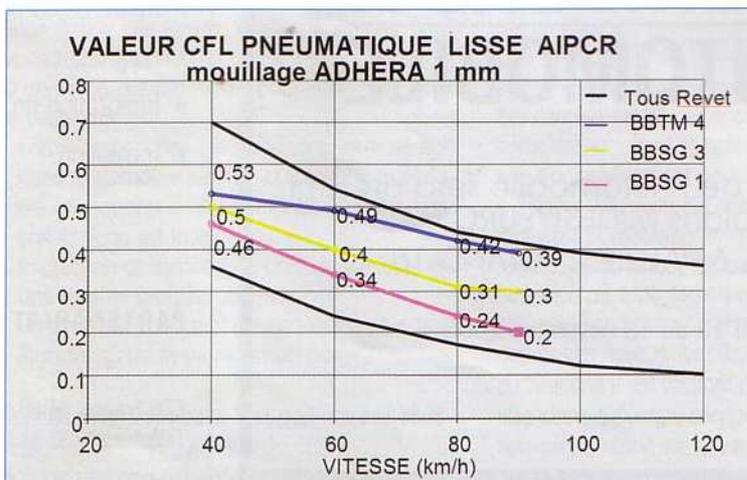


Figure 2 : Variation de l'adhérence avec la vitesse et la nature du revêtement routier, mouillage 1 mm, source LCPC.

Figure 3 : Variation de l'adhérence longitudinale avec la hauteur d'eau et la température de la glace.

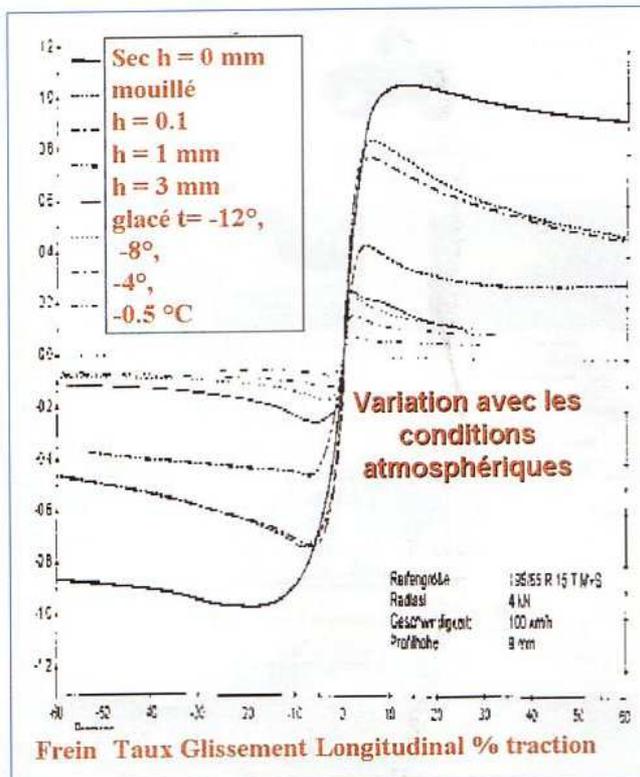
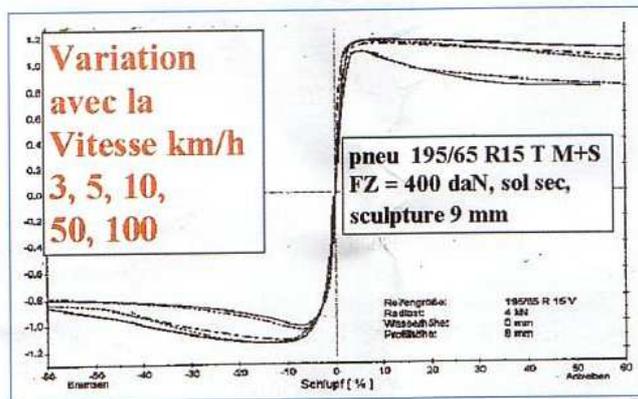


Figure 4 : Variation de l'adhérence longitudinale avec la vitesse sol sec.



lisant les commandes du conducteur réel. La différence entre REEL et MODELE est focalisée sur les glissements longitudinaux et latéraux dans l'aire de contact des 4 roues :

" si le réel glisse plus que le modèle, c'est que ce dernier surestime l'adhérence, donc on baisse progressivement l'estimatif de l'adhérence jusqu'à équilibrer les glissements ".

Le principe illustré par la figure 7 est donc très simple et très naturel.

Ce calcul est effectué en continu dans toutes les situations de conduite, et 8 fois en parallèle pour les 4 roues et séparément pour le longitudinal et pour le latéral.

La fusion de ces 8 informations est ensuite effectuée pour que les valeurs dont la détermination repose sur peu d'éléments soient remplacées par la donnée la plus pertinente, sans interdire des évolutions individuelles.

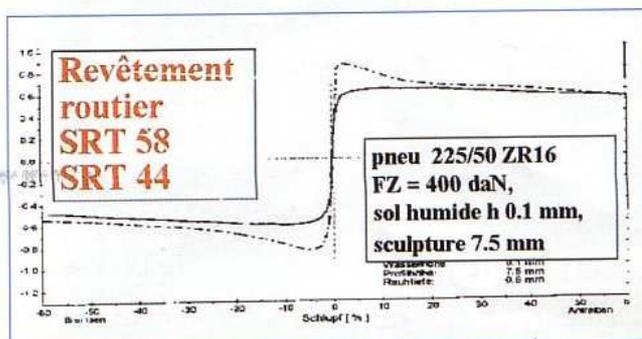


Figure 5 : Variation de l'adhérence longitudinale avec l'usure du revêtement.

Figure 6 : Architecture du recalage.



Recherche sur le recalage

L'expérience de la société NEXYAD, spécialisée en mathématiques appliquées, a orienté le choix de la technologie du recalage vers un système à base de connaissances. La nature intrinsèquement continue et graduelle du problème a poussé à retenir une implantation des connaissances dans un système utilisant la logique floue (logiciel NEXYAD Developer), bien adaptée par ailleurs à gérer des informations potentiellement imprécises et incomplètes.

Nous avons pu montrer que les tables de décision floues permettaient, moyennant quelques aménagements, de représenter élégamment un problème de recalage de modèle d'état à plusieurs modes glissants. Nous avons de même montré que les " talons " des règles floues permettaient d'immuniser le recalage contre le bruit, ce qui a permis de maîtriser la dynamique du recalage selon l'approche dite " ensembliste à erreur bornée ".

L'expertise opérationnelle des mécaniciens permet alors effectivement de recalcer le modèle d'état du véhicule.

Etape simulation contre simulation

Dans un premier temps les concepts de base de la méthode ont été mis au point en simulation contre simulation : les signaux issus d'une acquisition sur véhicule étaient remplacés par des résultats de simulation afin de limiter la complexité du problème. Remarquons d'abord que la détermination de l'adhérence disponible est d'autant plus complexe que la sollicitation est faible ; par exemple le cas extrême où toute l'adhérence disponible est mobilisée, le calcul de l'adhérence est simple (fait par l'ABS de série). Par contre, en utilisation, un conducteur " normal ", en conduite " tranquille ", ne sollicite le potentiel de freinage et de virage qu'à 20% ou 30% [4].

Recalage de l'adhérence latérale sur un virage pris à vitesse 34 km/h sur une entrée de rond point, avec une l'accélération latérale de crête = 2 m/s², soit 20% du potentiel du véhicule.

Recalage de l'adhérence longitudinale sur freinage très faible.

Le freinage atteint une valeur maxi de $1,5m/s^2$, ce qui représente 15% du potentiel de freinage du véhicule.

Etape véhicule laboratoire

Le véhicule laboratoire Peugeot 307 de l'INRETS-MA

Ce véhicule instrumenté haut de gamme pré-existant a été retenu pour être le premier véhicule d'intégration du projet, et a servi à la mise au point de l'ensemble de l'application embarquée "temps réel".

Ce véhicule dispose d'un système d'acquisition basé sur deux cartes NI comportant 64 voies analogiques, et d'un logiciel d'acquisition spécifique, développé en langage C, afin d'en conserver la maîtrise. Le PC est situé dans le coffre de la voiture, l'expérimentateur est en passager avant avec un clavier et un écran déportés et différents interrupteurs permettant de gérer l'acquisition et de saisir des codes numériques.

Si l'application " adhérence " n'utilise en elle-même qu'une douzaine de capteurs, les 128 voies d'acquisition sont utilisées pour connaître aussi extensivement que possible la dynamique réelle du véhicule. On recueille ainsi :

- les données classiques de la dynamique automobile que sont les commandes du conducteur et les sollicitations du véhicule qui en résultent,
- des informations plus originales et complexes à obtenir comme le torseur des efforts à l'interface pneumatique-chaussée, la trajectoire précise du véhicule, ou la hauteur d'eau sur la chaussée,
- des informations complémentaires nécessaires à ce projet comme la vitesse et la direction du vent, ou provenant de capteurs développés et testés dans le cadre du projet.

Parmi les sollicitations dynamiques, on attache une attention particulière aux accélérations longitudinale, transversale et verticale au CDG, et aux 3 vitesses angulaires en lacet, roulis et tangage. Nous disposons également d'accéléromètres transversaux positionnés en porte-à-faux avant et arrière. Les mesures des vitesses longitudinale et transversale du véhicule sont également essentielles, car elles permettent de calculer l'angle de dérive. De nombreuses informations sont acquises sur chacune des 4 roues : les débattements de suspension, les hauteurs de caisse, les vitesses angulaires, les pressions de freinage, ainsi que les accélérations verticales. Certains de ces capteurs sont doublés pour assurer une redondance des informations les plus importantes.

Le véhicule dispose également de 4 moyeux dynamométriques Kistler-Igel, permettant la mesure des 6 composantes (3 forces et 3 moments) du torseur des efforts à l'interface pneumatique-chaussée pour chacune des roues, ainsi que la vitesse de rotation avec une haute résolution. Deux capteurs Corrsys-Datron per-

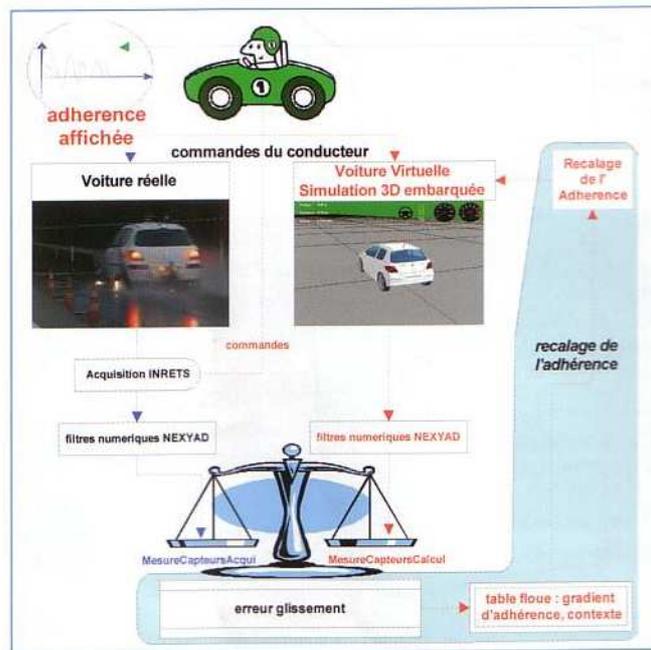


Figure 7 : Principe de la méthode.

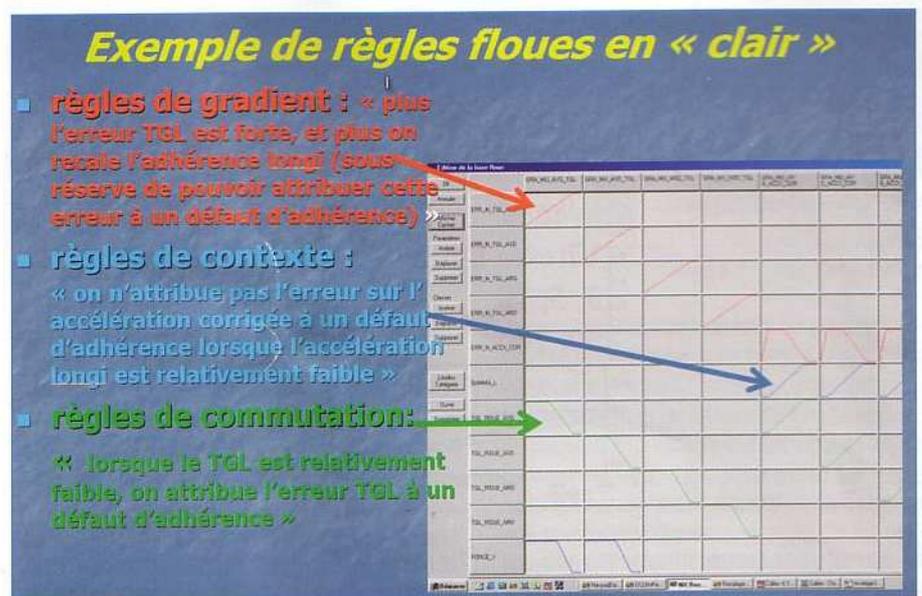


Figure 8 : Exemples de règles floues.

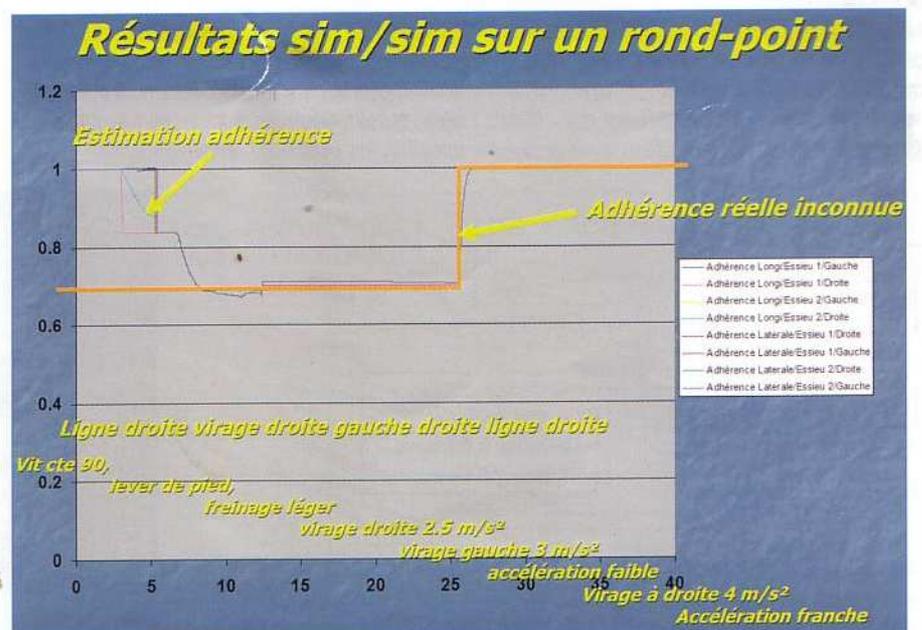


Figure 9 : Résultat en simulation contre simulation (rond point).

mettent la mesure des angles de dérive sur deux roues.

La trajectoire du véhicule peut être obtenue avec une précision centimétrique lors d'essais en site dégagé (ce qui est le cas des pistes, beaucoup moins souvent des sites routiers) par un système GPS différentiel LRK.

Implémentation Temps Réel

La première implémentation dans un véhicule réel a été effectuée par l'INRETS-MA avec assistance de SERA.

Le passage du recalage "simulation contre simulation" à "simulation contre acquisition sur véhicule réel" a rencontré trois types de difficultés :

1. Résolution des capteurs et conditionnement du signal (filtrage, retard, cohérence, déri-

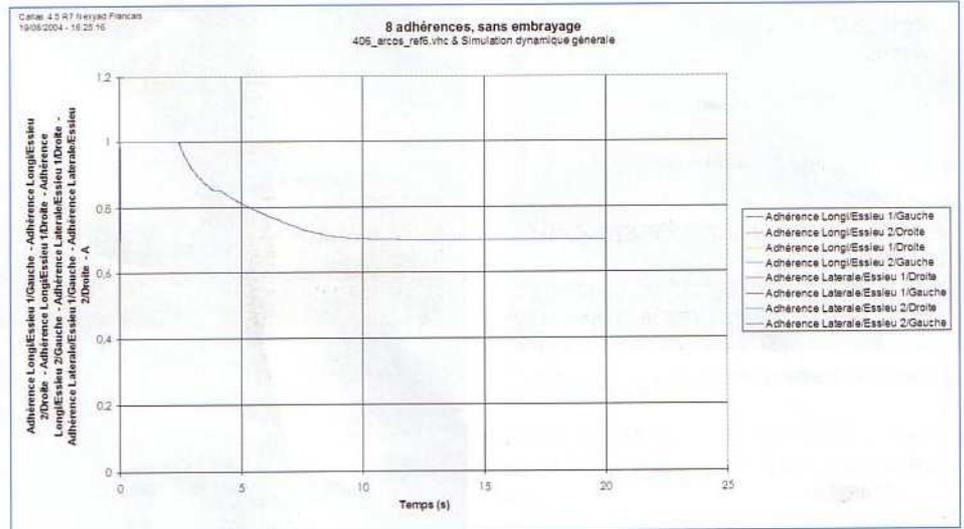


Figure 10 : Résultat en simulation contre simulation (freinage très faible).



Figure 11 : La PEUGEOT 307 de l'INRETS-MA.

ve) : on aura remarqué que le calcul effectué est doublement différentiel (On calcule des erreurs entre acquisition et modèle, et les glissements sont des différences de vitesse entre roue et sol). Il est donc normal d'aboutir à des impératifs élevés en terme de précision des capteurs, surtout à sollicitation et vitesses faibles.

2. Superposition de toutes les entrées conducteur, uni chaussée, vent, cas de charge. C'est pour les isoler que l'on fait



Figure 12 : Vue générale de l'ensemble de l'instrumentation embarquée de la 307.



Figure 13 : Détail de l'électronique embarquée.

de la simulation qui peut être vue comme un super laboratoire avec un contrôle parfait sur toutes les perturbations possibles et avec une résolution de capteurs très élevée.

3. Erreur modèle : cette méthode du modèle suppose que les erreurs du modèle à adhérence nominale soient notablement plus faibles que les erreurs induites par l'adhérence. Toutes les erreurs sont attribuées à l'adhérence !

Les réponses suivantes ont été apportées à ces trois difficultés :

4. les étalonnages ont été soignés, des solutions automatiques de remise à zéro ont été implémentées, des filtres hardware ont été installés.
5. Des reconstructions des 4 éléments cités ont été effectuées et sont ré-injectées dans le calcul, elles ne seront pas détaillées ici.
6. Un recalage des variables essentielles du comportement dynamique est effectué dans un processus analogue à un étalonnage.

Ces perfectionnements ont nécessité des traitements complémentaires après acquisition dans un fonctionnement de type rejeu.

Quelques résultats obtenus

Notions

Différentes notions sont utiles pour qualifier l'estimation d'adhérence :

- Sensibilité : capacité à estimer l'adhérence à faible sollicitation
- Convergence : capacité à estimer l'adhérence à partir d'initialisations fausses hautes et basses
- Temps de réponse
- Résolution ou pouvoir discriminant : écart minimum d'adhérence que l'on peut détecter
- Précision : aptitude à converger vers la bonne valeur de l'adhérence.

Accélération départ arrêté puis freinage frontal maximal sur sec

Le véhicule est sur un sol sec d'adhérence estimée 1.0 ; il est initialement à l'arrêt, démarre à $t = 6$ s, accélère jusqu'à 106 km/h à $t = 27$ s,



Figure 14 : Véhicule 307 en test.

puis à $t = 29.5$ s déclenche un freinage maximum sur les seules roues avant à 6.7 m/s^2 , jusqu'à l'arrêt.

La figure 17 présente l'évolution temporelle des paramètres du véhicule : la vitesse (bleu) et les accélérations longitudinale (vert) et transversale (magenta).

On voit que le recalage volontairement mal initialisé à 0.5 est actif à partir de 20 km/h, que les valeurs déterminées sont légèrement variables avec la sollicitation qui se réduit jusqu'à l'attaque du freinage où les valeurs sont stables autour de 1.1.

Accélération DA sur sec. passage sur mouillé et freinage frontal max

On démarre à 5 s sur le sec, prend de la vitesse, rentre sur le mouillé (seuil magnétique) à 18.3 s, on freine à 19 s. L'adhérence sur la partie mouillée est estimée à 0.9.

On voit que par rapport au cas précédent, la légère rupture d'adhérence (de 1.0 à 0.9) est bien détectée et que l'écart avec l'adhérence " sur sec " du cas précédent est bien restituée.

Démarrage sur du lino

Nous avons utilisé un revêtement en linoléum arrosé, afin de disposer d'une base à adhérence réduite, les pistes utilisées n'étant pas dédiées à des essais sur faible adhérence. On démarre à $t = 6.3$ s sur le lino (adhérence estimée 0.4) simulant par exemple la partie peinte d'un passage piéton. L'accélération est soutenue et les roues patinent.

Avec deux initialisations différentes, on voit bien que la convergence est parfaite, le temps de réponse est d'environ 2 s et la précision correcte.

Ce cas est moyennement difficile car la sollicitation relative forte est compensée par le fonctionnement basse vitesse toujours délicat.

Cercle avec adhérence alternée

Le véhicule démarre et accélère en restant en boucle fermée sur un cercle. Il rencontre successivement deux niveaux d'adhérence (estimés à 0.9 et 0.8) puis freine.

La figure 23 fournit en bleu la vitesse, en vert l'accélération longitudinale et en magenta l'accélération latérale, ainsi que le re-

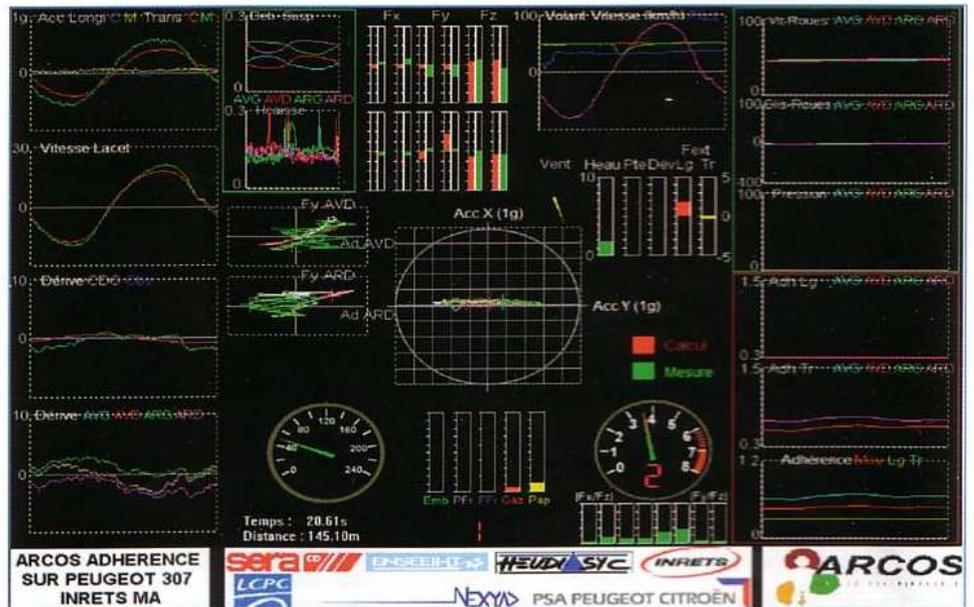


Figure 15 : Tableau de bord virtuel en Temps Réel.

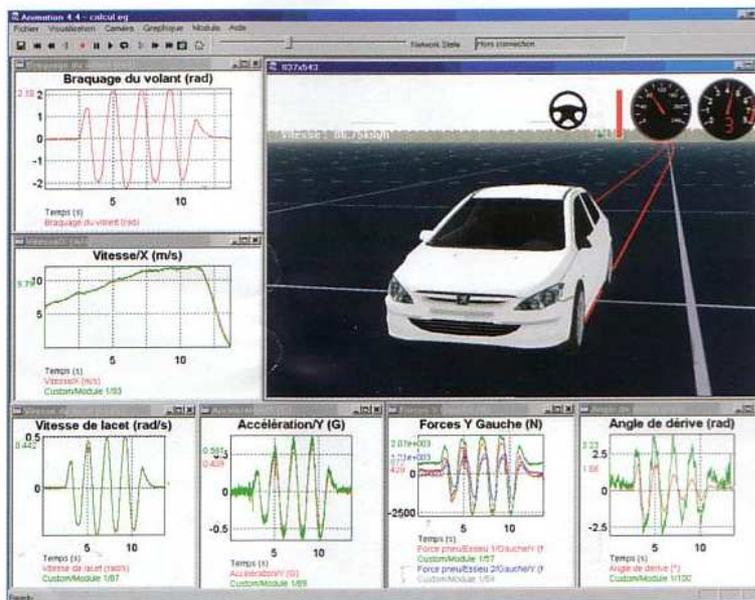


Figure 16 : Animation avancée CALLAS en Temps Réel en rejou.

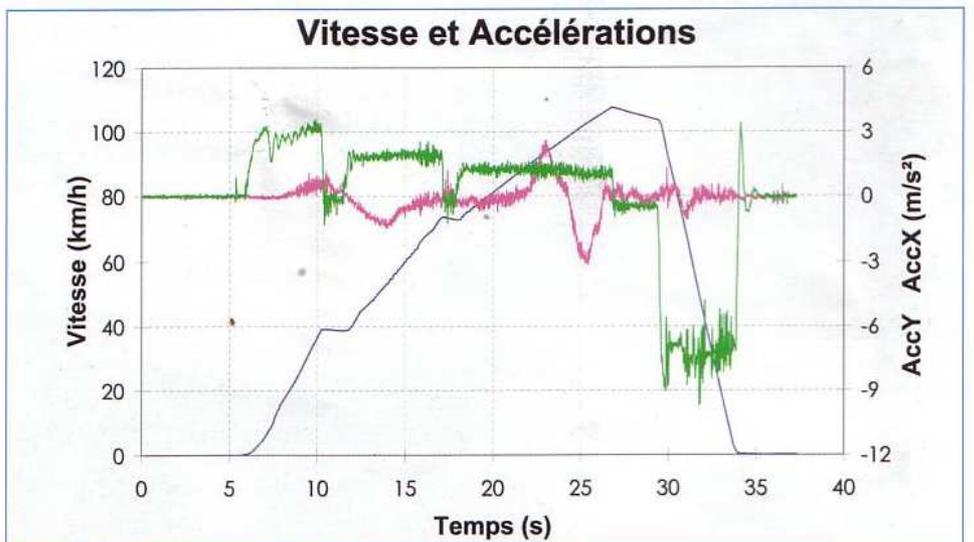


Figure 17 : Freinage frontal sec - Sollicitation du véhicule.

pérage des zones mouillées.

On voit sur la figure 24 que la légère modulation de l'adhérence est bien lue, avec un petit temps de réponse.

Démarrage et sollicitations variées

Le véhicule démarre à $t = 8$ s, accélère à 3 m/s^2 , zigzague légèrement (moins de 1 m/s^2 d'accélération transversale) simulta-

nément à une accélération longitudinale de 2 m/s^2 sur le second rapport, prend de la vitesse jusqu'à 90 km/h , zigzague plus fortement entre 2 et 3 m/s^2 , puis freine très doucement et régulièrement à un peu plus de -1 m/s^2 .

Le recalage d'adhérence est actif :

- commence la convergence à $t = 10 \text{ s}$ avec 2 s de retard :
- En accélération longitudinale au dessus de 2 m/s^2 ,
- En latéral sur les pics au delà de 1.5 m/s^2 ,

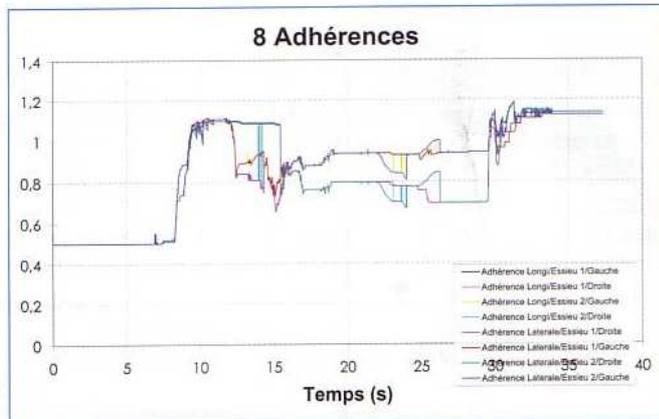


Figure 18 : Freinage frontal sec - Recalage de l'adhérence.

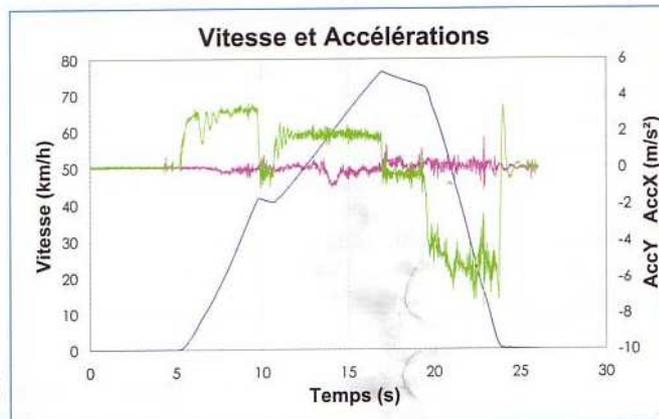


Figure 19 : Freinage frontal mouillé - Sollicitation du véhicule.

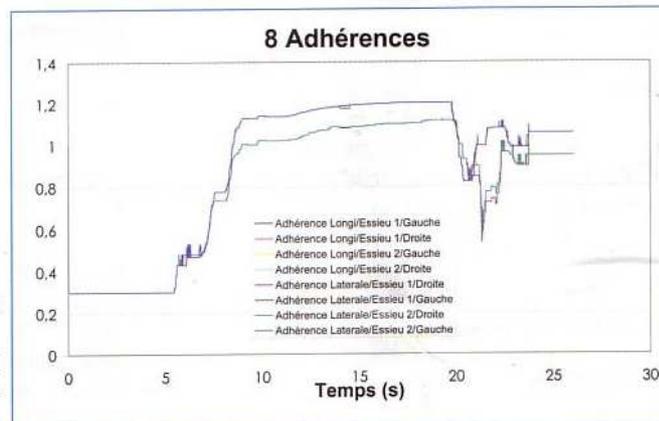


Figure 20 : Freinage frontal mouillé - Recalage de l'adhérence.

- Il est par contre inactif dans la phase de freinage à 1 m/s^2 .

Conclusions et perspectives

Ce programme de recherche était ambitieux : sujet difficile, méthode proposée ambitieuse (évaluation sur chaque roue en continu) et complexe de mise en œuvre. Il a représenté un volume considérable de travail et une exigence de qualité sur tous les aspects de la méthode, tout en étant mené de manière intégrée, ce qui a nécessité une étroite collaboration entre les principaux partenaires SERA, NEXYAD, INRETS, HEUDIASYC et PSA.

La première mise au point des concepts du recalage en simulation sur simulation a été rapidement satisfaisante sur une grande variété de scénarios. Elle a été suivie d'une forte régression des performances lors du passage au fonctionnement Temps Réel embarqué dans le véhicule.

Les solutions apportées ont permis de faire progresser l'état de l'art dans les deux disciplines de base utilisées :

- les mesures embarquées (précision et complétude),
- la simulation numérique (validité et représentativité).

En conséquence, les résultats actuels permettent d'affirmer que :

- le principe proposé fonctionne sur la majorité des situations de vie explorées, avec une qualité de résultats variable.
- La méthode apparaît prometteuse.

Si le système actuel donne des tendances cohérentes, une étape complémentaire reste cependant à effectuer pour avoir un outil totalement opérationnel.

Par ailleurs l'obtention d'une valeur d'adhérence fiable par la méthode proposée nous paraît reposer sur les conditions suivantes :

- la précision des capteurs utilisés,
- une puissance de calcul significative pour autoriser en temps réel acquisition, simulation et traitement du signal,
- une vitesse minimale (de l'ordre de 15 km/h) pour permettre la précision relative nécessaire,
- un niveau de sollicitation dynamique du véhicule suffisant (environ 2 m/s^2).

Les concepts théoriques utilisés sont très puis-

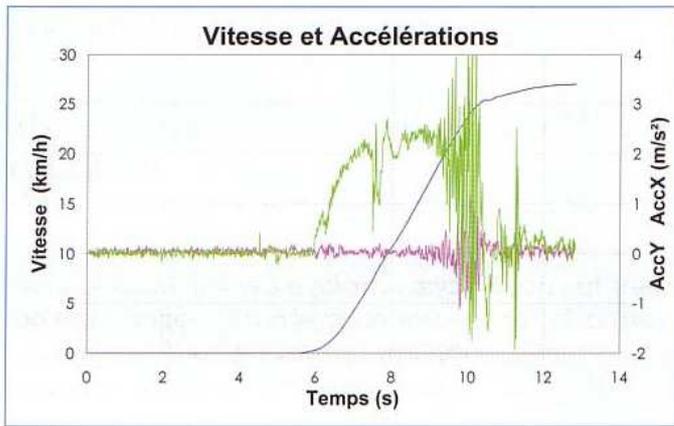


Figure 21 : Démarrage sur lino - Sollicitation du véhicule.

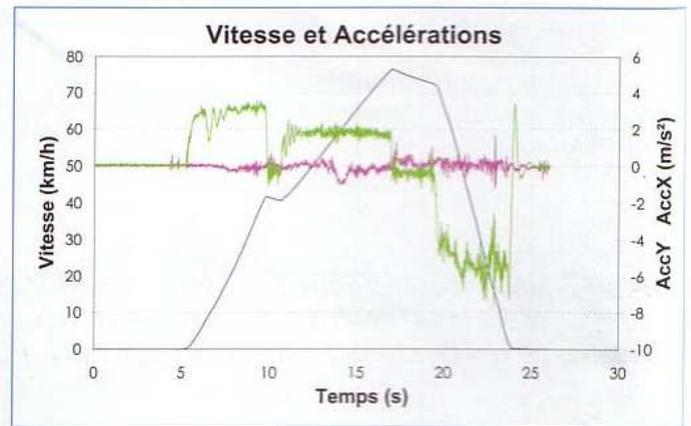


Figure 23 : Cercle avec adhérences alternées - Sollicitation du véhicule.

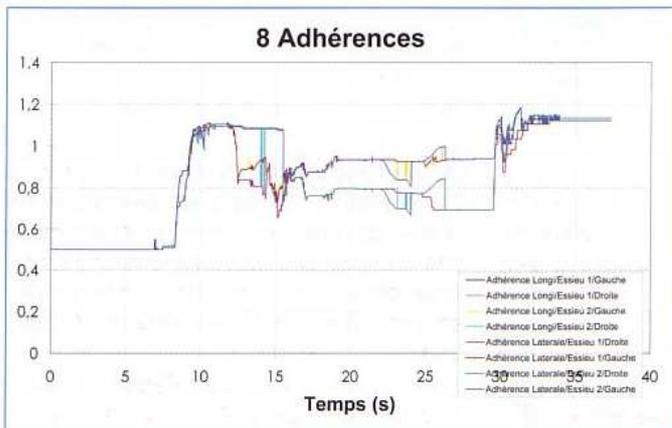


Figure 22 : Démarrage sur lino - Recalage de l'adhérence.

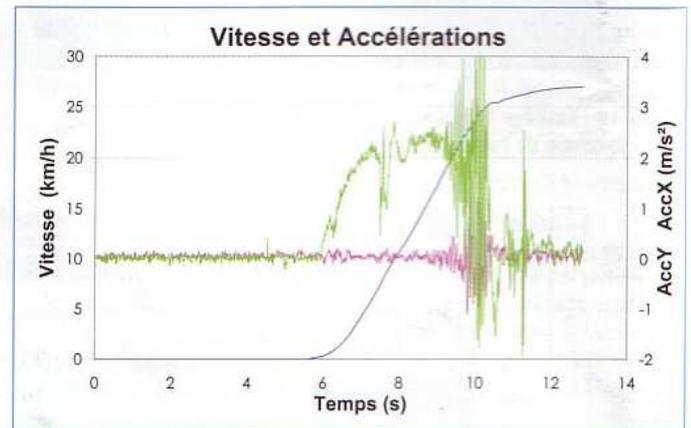


Figure 25 : Sollicitations variées - Sollicitation du véhicule.

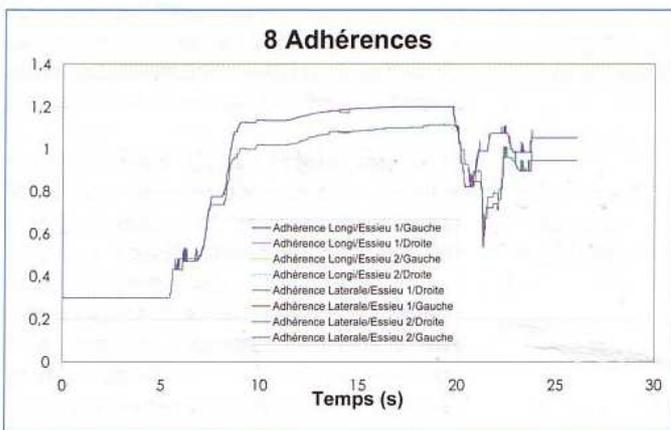


Figure 24 : Cercle avec adhérences alternées - Recalage de l'adhérence.

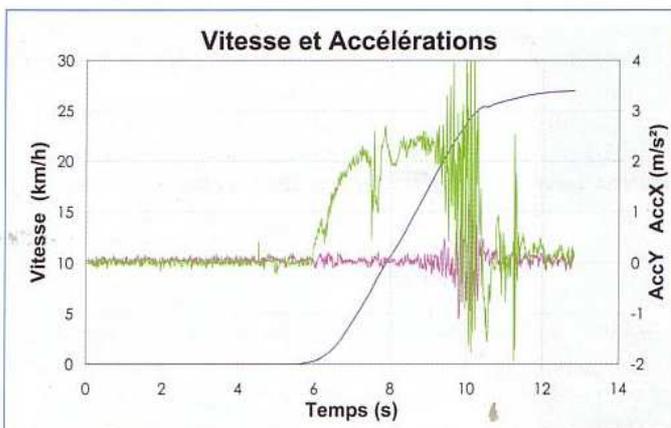


Figure 26 : Sollicitations variées - Recalage de l'adhérence.

sants et les possibilités concrètes de paramétrage du système étendues, ce qui permet d'envisager la continuation de la progression des résultats.

Bibliographie

- 1 SCHAEFER, G., et al. *Estimation embarquée de l'adhérence disponible*. Rapport final public du thème 2.2 du programme ARCOS. Janvier 2005.
- 2 SCHAEFER, G., (SERA-CD), LECHNER, D., (INRETS), DELANNE, Y., (LCPC), SCHMITT, V., (ETAS). CALLAS : a decisive step toward validity for 3d vehicle dynamics. ISATA Paper 97SAF005. 30th ISATA Conference, Florence June 1997.
- 3 LECHNER, D., (INRETS), DELANNE, Y., (LCPC), SCHAEFER, G., (SERA-CD), SCHMITT, V., (ETAS). Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS. Papier SIA 970202. Congrès SIA International "La dynamique du véhicule automobile et ferroviaire" Ecole Centrale de Lyon, Avril 1997. Reprint in "Ingénieurs de l'Automobile" N°713, Mai 1997.

- 4 LECHNER, D., PERRIN, C., Utilisation réelle des capacités dynamiques des véhicules par les conducteurs - Expérimentation sur route 1992, Rapport INRETS N°165, Juin 1993. ■