

Un TP vite amorti

LAURENT BERQUEZ^[1]

L'avènement des VTT tout suspendus (TS) dans les années 1990 a fait émerger des solutions technologiques sophistiquées, tout d'abord dans les cadres, ensuite en matière d'amortisseurs (hydrauliques, progressifs, à ressort mécanique, à ressort pneumatique...). Il ne suffit pas d'acquérir un bon VTT avec suspension, encore faut-il savoir en régler l'amortisseur !

Le support de ce TP est un banc d'essai d'une suspension arrière de VTT. Son intérêt est qu'il permet de multiples activités autour de la dynamique des solides avec une complémentarité entre l'expérimentation [1] et la simulation numérique [2].

Dans un premier temps, en changeant les combinés ressort-amortisseur, des comportements extrêmement différents de la suspension peuvent être mis en évidence par l'observation du VTT et quantifiés par les mesures d'accélération.

Lors de l'un des essais, à partir d'un amortisseur ayant un coefficient d'amortissement^[2] très important en phase de détente, on observe un mouvement pseudo-périodique créé par la raideur et l'amortissement du pneu. Il est alors possible à partir des mesures et d'une modélisation analytique simple de quantifier cette raideur et cet amortissement. Ces valeurs seront utilisées par la suite dans un logiciel de simulation qui servira à déterminer un réglage de la suspension optimal.

Le rôle de la suspension sur un VTT

Le rôle d'une suspension arrière est d'assurer un contact entre le pneu et la route dans de bonnes conditions. L'amortissement des rebonds de la roue, soumise aux irrégularités de la piste, doit être rigoureux (voir les « Les technologies d'amortisseur » en encadré ci-contre). La suspension doit également préserver le confort de l'utilisateur, en transmettant le moins possible au cadre les irrégularités de la piste.

Il arrive que les utilisateurs ne soient pas satisfaits de leur VTT tout suspendu. Dans bien des cas, cela provient d'un mauvais réglage de leur système amortisseur. Alors comment faire ?

Les constructeurs de combinés ressort-amortisseur [1]^[3] conseillent d'effectuer deux réglages afin d'obtenir un comportement standard : le réglage de l'enfoncement initial et le réglage de l'amortissement à partir du test de la « bordure de trottoir ». Ainsi peut-on lire dans la documentation d'un constructeur :

mots-clés
dynamique, mécanique, simulation, travaux pratiques

Le réglage de la raideur (*précontrainte ou SAG*)

Asseyez-vous sur le VTT et contrôlez l'enfoncement de l'amortisseur. La raideur idéale est atteinte lorsque l'amortisseur s'enfoncera d'un tiers de la course totale de l'amortisseur.

Le réglage de l'amortissement (*détente et compression*)

Prenez votre VTT et descendez d'un trottoir en passant sur la bordure. Comptez le nombre de rebonds effectués par l'amortisseur avant qu'il ne retrouve l'affaissement initial. Le but de cette manœuvre est d'arriver à obtenir un seul rebond en modifiant la valeur de l'amortissement.

L'objectif de ce TP va donc être de reproduire le « test de la bordure de trottoir » pour caractériser le comportement dynamique de plusieurs configurations matérielles et réglages de combinés ressort-amortisseur.

Le montage réalisé pour l'expérimentation

Afin de reproduire le test de la bordure de trottoir, le VTT est fixé au sol par la roue avant, ce qui permet à l'ensemble du VTT de pivoter par rapport à l'axe de la roue avant et d'être soulevé de telle façon que la roue arrière se situe à 10 cm du sol avant d'être lâché.

La fixation du VTT sur le support

La roue avant est immobilisée par rapport à un cadre rigide fixé au sol par des tirants [1]. Un haubanage permet de garder le VTT dans un plan vertical et permet de réaliser une liaison pivot d'une grande rigidité entre la roue avant et la fourche. Toujours afin de garder le VTT dans un plan vertical, la liaison pivot entre le cadre et la fourche est bloquée.

Les technologies d'amortisseur

Presque toutes les géométries de VTT tout suspendus bénéficient des progrès dans la technologie des amortisseurs. La géométrie du cadre et le positionnement des points d'ancrage de l'amortisseur vont modifier considérablement la façon dont ce dernier va se comporter.

Un amortisseur est composé de deux parties : un ressort, qui emmagasine l'énergie lors de la compression et qui la restitue ensuite, et un système d'amortissement, chargé de dissiper cette énergie pour éviter un balancement indéfini de la suspension.

La fonction ressort, souvent réalisée par un ressort de compression, laisse progressivement place à des amortisseurs à air sur les modèles à faible débattement. Deux raisons à cela : un poids moindre et la possibilité de régler facilement la force du rebond en modifiant la pression d'air. Le ressort métallique est tout de même conservé sur les cadres à fort débattement tels que ceux utilisés pour la descente, afin d'assurer une meilleure rigidité et une compression plus linéaire. Il équipe également la majorité des modèles d'entrée de gamme des grandes surfaces pour des raisons de coût.

Le système d'amortissement est majoritairement réalisé par laminage d'huile. Lors de la compression-détente de la suspension, le mouvement du piston force l'huile à passer dans des orifices de faible ouverture, et dissipe ainsi l'énergie emmagasinée par le ressort. L'indice de viscosité de l'huile ainsi que la taille des ouvertures – parfois ajustable – modifient le coefficient d'amortissement.

[1] Maître de conférences à l'université Paul-Sabatier de Toulouse (31). Courriel : laurent.berquez@laplace.univ-tlse.fr

[2] La définition des mots en italique est donnée dans le lexique.

[3] Les chiffres gris entre crochets renvoient à la webographie.

I le chargement et la levée du vTT

Afin de faire varier le poids de l'utilisateur, celui-ci est remplacé par des haltères empilés sur une tige de selle modifiée et allongée pour cet usage. Typiquement – de l'ordre de 35 à 45 kg sont installés –, cette masse correspond à la partie du corps du cycliste non amortie par ses jambes. Pour soulever le VTT, une corde, un palan et une ventouse électromagnétique sont utilisés **3**. En mettant en contact la ventouse électromagnétique avec la plaque située au bout de la tige de selle et en alimentant, il est possible de créer une force suffisante pour soulever le VTT à partir du palan et de la corde attachée à l'électroaimant. En coupant l'alimentation de la ventouse électromagnétique, le VTT tombe de la hauteur à laquelle il a été soulevé.

I l'instrumentation classique avec un accéléromètre

Pour quantifier les accélérations du mouvement, on installe un accéléromètre posé sur les altères. Son signal est enregistré par une centrale d'acquisition (DAQPad-6020E ou plus récemment USB-6221) et un conditionneur de signal (SC2345) de la société National Instruments. L'acquisition de l'accélération est synchronisée sur la commande de lâcher du VTT. Cette commande est réalisée à partir d'un port numérique de la centrale d'acquisition qui pilote la ventouse électromagnétique via une interface relais. Un programme d'acquisition permet de commander l'alimentation de la ventouse électromagnétique, le déclenchement de

Tige de selle modifiée pour accueillir des haltères

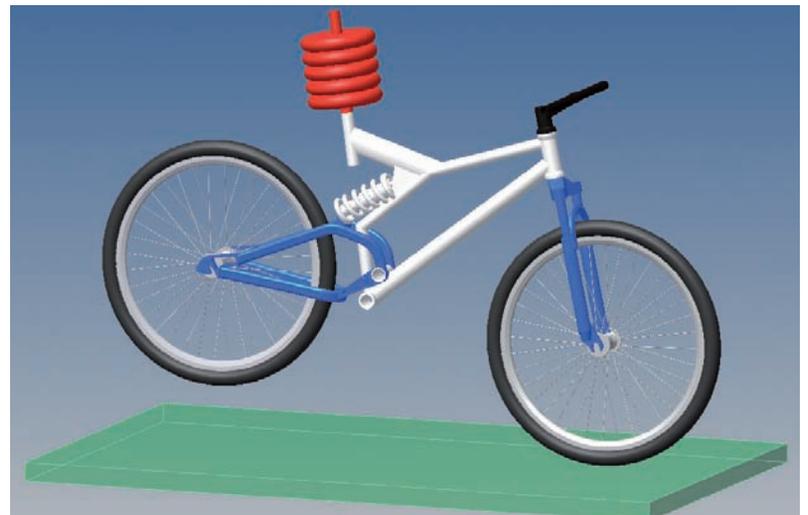


Blocage de la rotation de la fourche

Bridage de la roue avant

Haubanage de la roue avant

1 Le banc d'essai



2 Le banc d'essai virtuel

Lexique

Amortissement (coefficient d'amortissement) : Rapport entre la force exercée par l'amortisseur et la vitesse de déplacement de sa tige. Expression : $c = F_a / \dot{x}$ en kg/s ou Ns/m.

Blocage : Pour contrer le pompage, on peut bloquer l'amortisseur. À n'utiliser que sur terrain très roulant sans aspérité.

Compression : Vitesse d'enfoncement de l'amortisseur. Elle influe sur le confort et sur le pompage de la suspension.

Débattement : Course totale possible de l'amortisseur.

Détente : En réglant la détente, on gère la vitesse de rebond – ou retour – de la suspension après enfoncement. Cela évite à la suspension de rester enfoncée (talonnement) ou de rebondir trop fort.

Pompage : Quand on pédale fort, et encore plus en danseuse, la suspension s'enfoncé inutilement. Cela fait perdre de l'énergie et nuit à la performance.

Précontrainte ou SAG : Hauteur de l'enfoncement de l'amortisseur, à l'arrêt, cycliste monté sur le vélo. Elle est exprimée en pourcentage du débattement (de 20 à 30 % pour l'enduro, de 35 à 45 % pour la descente). Sur les suspensions à ressort à air, le SAG est réglable grâce à une partie « gonflable ». Pour les suspensions à ressort mécanique, le SAG se règle en comprimant le ressort grâce à une molette fileté.

Raideur (constante de raideur) : Rapport entre la force exercée sur l'amortisseur et le déplacement provoqué. Expression : $k = F_r / x$ en N/m.

Ventouse électromagnétique

Plaque de ventouse électromagnétique

Accéléromètre

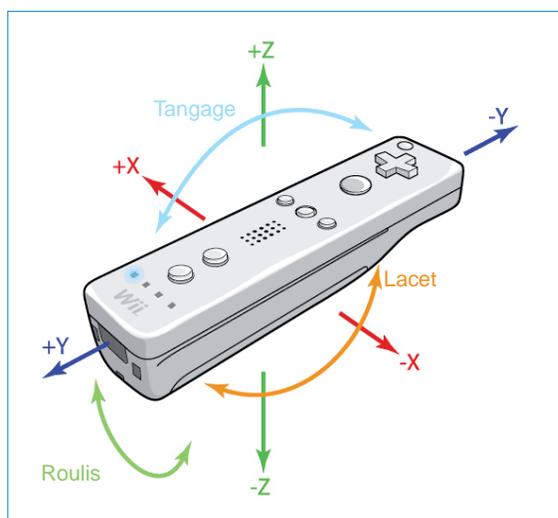
Haltères



3 Le chargement et la levée du VTT

la chute du VTT, l'acquisition du signal issu de l'accéléromètre, l'affichage et l'enregistrement des courbes d'accélération ainsi que les mesures pour un traitement ultérieur éventuel.

Le choix de la mesure de l'accélération au niveau des haltères est motivé par le fait que c'est l'image de l'effort de contact entre le cycliste et la selle. Ce signal caractérise donc le confort du VTT. Compte tenu du bruit et des signaux parasites qui viennent des chocs lors de la chute du vélo, il est quasi impossible de remonter au mouvement (vitesse et espace) du VTT par intégration numérique du signal de l'accéléromètre.



4 Les accélérations et les rotations données par une Wiimote

Une instrumentation pratique avec une Wiimote

Pour la mesure de l'accélération, il est possible de détourner un dispositif très connu, la manette de la console de jeu Wii, la Wiimote, qui permet d'enregistrer les accélérations dans les trois directions, sans fil et pour un coût 100 fois inférieur à celui de la solution précédente ! (Voir Rémi Stavrakas et Patricia Chabert, « Une technologie ludique », *Technologie* n° 172, mars 2010.) De plus, en associant à la Wiimote l'accessoire Wii MotionPlus construit à partir de deux capteurs gyroscopiques, il est possible de remonter à la position des haltères à partir des accélérations et rotations suivant les trois axes 4. Cette solution est d'autant plus intéressante que des bibliothèques pour différents langages (C, Python, Matlab) sont disponibles pour accéder aux données des manettes et que de nombreux sites illustrent les multiples applications détournées de la Wiimote [2-6].

Pour les plus bricoleurs qui souhaiteraient fabriquer le TP, le tableau 5 vous donne la nomenclature de ses éléments constitutifs ainsi que leur coût. (La reproduction du TP est librement autorisée dans les établissements relevant de l'Éducation nationale. Par contre, toute utilisation à des fins commerciales est soumise à autorisation.)

L'exploitation

Les différentes mesures effectuées sont des mesures de l'accélération des haltères lorsque l'on fait tomber le VTT de 10 cm. Elles ont permis de mettre en évidence des comportements très différents entre les divers types d'amortisseurs.

Pièce	Fournisseur	Référence	Prix
Bâti	-	Profilé acier	50,00 €
Pieds d'amortissement	Radiospare	257-8640	13,40 €
Écrou à sertir	Radiospare	425-7553	21,55 €
Goujons d'ancrage	Radiospare	525-329	17,88 €
Ventouse électromagnétique	Mécaelectro	5.83.01	58,00 €
Alimentation	Iso-Tech	IPS 303A	145,00 €
Anneau de levage	Radiospare	673-692	4,30 €
Palan d'écoute			200,00 €
Accéléromètre	DJB Instrument		518,00 €
Boîtier d'acquisition	National Instruments	DAQPad-6020E obsolète, remplacé par USB-6221	1 399,00 €
Boîtier de conditionnement	National Instruments	SC2345	399,00 €
Câble	National Instruments		99,00 €
Module de conditionnement	National Instruments	SCC-IPC01	359,00 €
Amortisseur premier prix	-		20,00 €
Amortisseur entrée de gamme	K plus		60,00 €
Amortisseur milieu de gamme	RockShox	Bar	150,00 €
Amortisseur haut de gamme	RockShox	Bar	200,00 €

5 La nomenclature des éléments constitutifs du TP

Essai n° 1:**l'amortisseur premier prix**

La raideur est fixée par la précontrainte du ressort et l'amortissement n'est pas réglable.

L'observation du VTT permet de distinguer deux comportements distincts **6**. Pendant plus de 5 secondes, le VTT rebondit (décollement de la roue arrière) 10 fois, puis la roue ne décolle plus et le VTT a un comportement oscillatoire amorti. Il faut attendre plus de 10 secondes pour que le VTT se stabilise. On peut en déduire que le coefficient d'amortissement est très faible.

Essai n° 2:**l'amortisseur d'entrée de gamme**

De manière identique, la raideur est fixée par la précontrainte du ressort, et l'amortissement n'est toujours pas réglable.

L'essai de cet amortisseur montre un comportement qui se rapproche du comportement attendu d'une suspension, à savoir un retour rapide à la position d'équilibre **7**. En effet, moins de 2 secondes après le choc, la suspension est de nouveau disponible, même s'il subsiste un rebond.

À l'issu de ces deux tests, il convient de comprendre la raison technologique de cette différence notable de comportement dynamique entre ces deux combinés ressort-amortisseur. Un démontage des deux ensembles permet de manipuler les deux amortisseurs sans le ressort et de constater l'énorme différence en termes de coefficient d'amortissement. En effet, dans le cas du plus mauvais des amortisseurs, le simple poids de la tige permet sa translation ! Encore plus surprenante, l'absence de piston, d'huile, de trou de laminage, comme on peut le constater sur la photo **8**, démontre la supercherie à laquelle s'est livrée le constructeur avec cet amortisseur qui n'en est pas un.

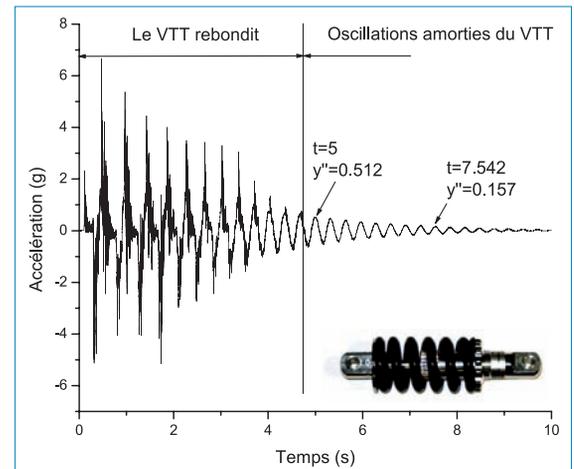
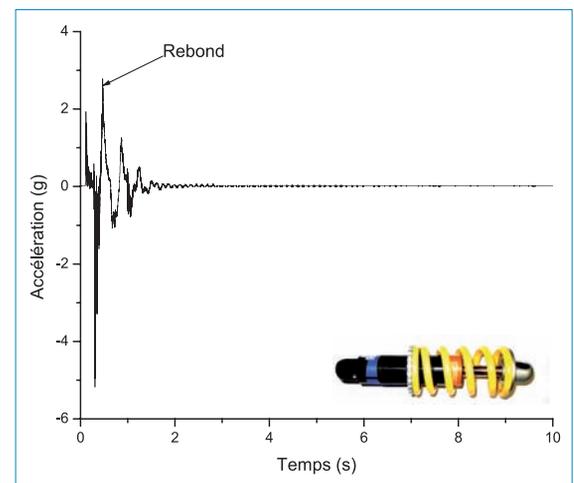
Essai n° 3:**l'amortisseur de milieu de gamme**

Le ressort est obtenu par deux chambres remplies d'air, comme dans un vérin. La raideur, non constante en fonction de l'enfoncement, peut être modifiée en changeant les pressions dans les deux chambres. L'amortissement n'est pas réglable.

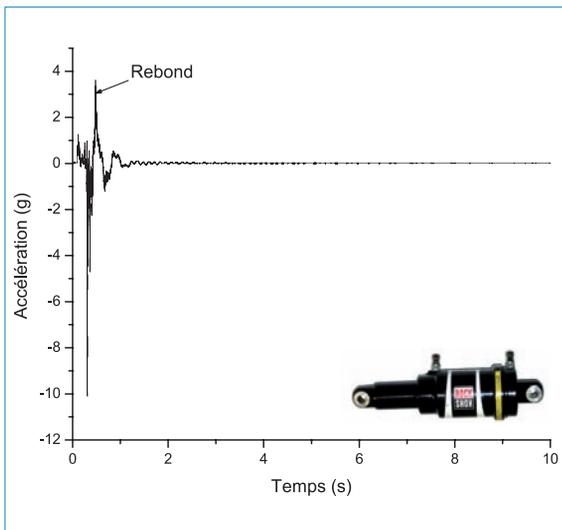
Même s'il subsiste un rebond, le retour à l'équilibre du VTT prend moins d'une seconde **9**. On constate également que l'amélioration de la performance de la suspension se traduit par une augmentation de l'accélération mesurée. Le VTT est plus performant mais moins confortable.

Essai n° 4:**l'amortisseur haut de gamme**

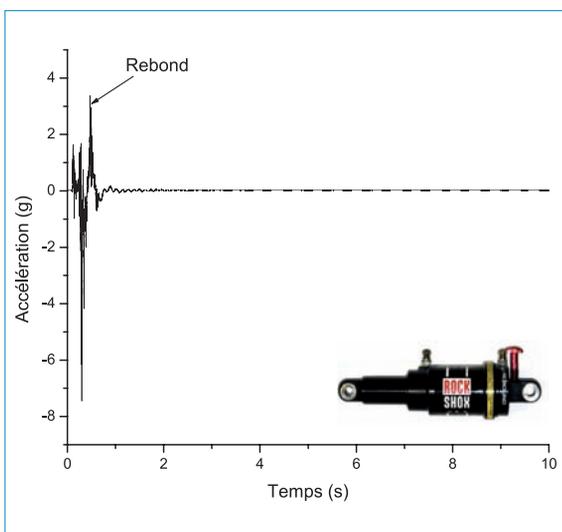
Pour cet amortisseur haut de gamme, de construction similaire au précédent, il est possible de régler la raideur et la vitesse de rebond (c'est-à-dire le coefficient d'amortissement lors de la détente de la

**6** L'essai de l'amortisseur premier prix**7** L'essai de l'amortisseur d'entrée de gamme**8** Une conception... atypique !**Webographie**

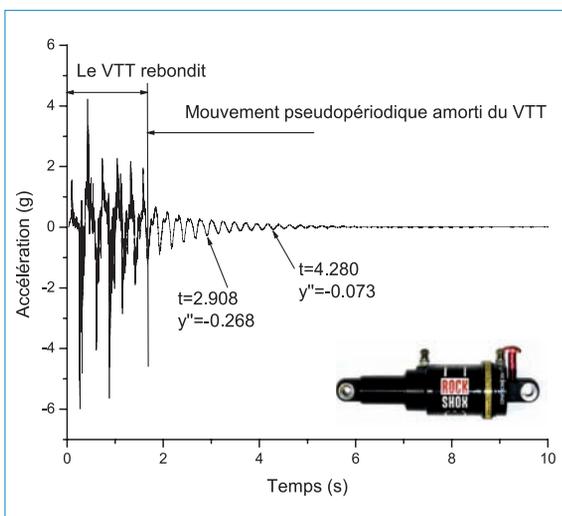
- [1] http://www.sram.com/_media/techdocs/03RSDeluxeAndBarOwners_fr.pdf
- [2] <http://fwiineur.blogspot.com/>
- [3] <http://netscale.cse.nd.edu/twiki/bin/view/Edu/WiiMote>
- [4] <http://klab.wikidot.com/wii-proj>
- [5] <http://libwiimote.sourceforge.net>
- [6] http://www-physique.u-strasbg.fr/~udp/articles/fortin/wiimote-for-physics/Wiimote_sciphypdf



9 L'essai de l'amortisseur de milieu de gamme



10 L'essai de l'amortisseur haut de gamme avec un réglage d'amortissement optimal



11 L'essai de l'amortisseur haut de gamme avec un réglage d'amortissement maximal

suspension). Deux essais ont été réalisés, l'un avec la valeur minimale et l'autre avec la valeur maximale d'amortissement.

Lors de l'essai, avec le coefficient d'amortissement minimal, la suspension est encore plus performante, le retour à la position d'équilibre se fait en 0,7 s **10**. Il est probablement possible de faire mieux en augmentant ce coefficient d'amortissement afin d'éviter le rebond.

Quand le coefficient d'amortissement est maximal, le comportement de la suspension se dégrade **11**. Sous l'effet du choc, la suspension se comprime, mais, le coefficient d'amortissement étant très important, il apparaît un verrouillage de la suspension après le choc. Tout se passe alors comme si le VTT ne comportait pas de suspension. Après 2 secondes, le VTT retrouve un comportement pseudopériodique. Ce comportement est lié à la raideur et à l'amortissement du pneu.

Le réglage entraînant le verrouillage de la suspension n'a pas d'utilité dans une utilisation tout-terrain, en revanche sur route il peut éviter le *pompage* de la suspension sous l'effet du pédalage et améliore le rendement du VTT.

Dans cette phase, on peut assimiler le VTT à une masse concentrée au centre de gravité ayant un mouvement de rotation par rapport à la roue avant. Il est alors possible d'écrire le principe fondamental de la dynamique afin de déterminer l'équation du mouvement pseudopériodique qui apparaît au-delà de 3 secondes de mouvement. La pseudopériode et la décroissance logarithmique de la courbe permettent d'estimer la raideur et l'amortissement du pneu, respectivement de 28 700 N/m et de 72 Ns/m (voir le lexique en encadré).

La simulation numérique

Le modèle numérique, développé initialement sous MotionWorks et fonctionnant maintenant avec l'environnement de simulation dynamique d'Inventor, doit nous permettre :

- de trouver le coefficient d'amortissement optimal de l'amortisseur, de l'ordre de 10 000 Ns/m suivant le critère de la bordure de trottoir **12**, la raideur du ressort étant calculée à partir de l'enfoncement initial et de l'effort dans le ressort obtenu par une résolution graphique du problème d'équilibre statique du VTT ;
- de calculer les efforts dans les différentes liaisons ;
- de dimensionner les différents éléments du cadre en prenant en compte les efforts dynamiques.

Il est également possible d'étudier l'impact des différentes cinématiques que l'on peut trouver dans les suspensions arrière de VTT de différentes marques.

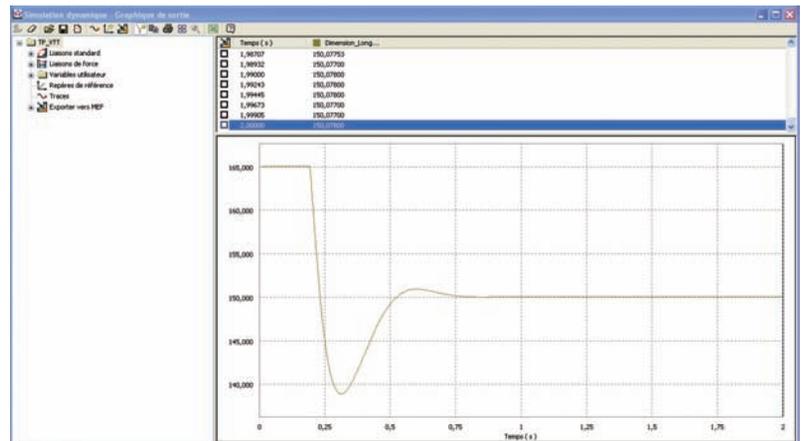
Conclusion

Le support proposé permet de visualiser des comportements de la suspension arrière radicalement différents les uns des autres et de s'interroger sur l'origine de ces

différences. Ce point particulier peut être le prétexte à une étude technologique des amortisseurs utilisés afin de comprendre l'origine de ces différences.

Il permet également de mettre en évidence l'influence de la raideur et celle de l'amortissement du pneu, observation qui se révèle utile lors de la modélisation du contact entre le pneu et le sol dans la maquette numérique.

Enfin, l'utilisation d'un modèle numérique associé à son logiciel de simulation mécanique permet d'envisager une étude sur l'influence des cinématiques de suspension arrière de VTT. Ce dernier point suppose de pouvoir modéliser un contact non permanent entre deux solides et définir une raideur et un amortissement dans ce contact – un type de liaison qui n'est malheureusement pas proposé dans tous les logiciels. ■



12 La simulation dynamique de l'enfoncement de l'amortisseur lors de la descente de la bordure de trottoir