

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

ROULER SANS ÊTRE SECOUÉ

Assurer une bonne tenue de route et le confort des passagers: tel est le rôle des suspensions et amortisseurs dans une voiture. Des suspensions dont les fréquences d'oscillation doivent éviter celles qui sont propres au corps humain.

Les routes ne sont pas parfaitement planes. Lorsque les revêtements sont dégradés, les creux et bosses de la chaussée provoquent un mouvement vertical des roues, qui se transmet à la caisse du véhicule et aux passagers. Les conséquences sont multiples: risque de perte de contact entre la roue et le sol, donc d'une mauvaise tenue de route, usure de la structure et des équipements, inconfort des passagers. Pour éviter ces désagréments, la suspension du véhicule joue un rôle essentiel. Mais comment choisir ses caractéristiques?

DES SUSPENSIONS...

L'analyse des mouvements de la caisse d'un véhicule et de sa tenue de route peut vite devenir complexe. Nous allons donc nous restreindre aux mouvements verticaux d'une automobile roulant en ligne droite. Jouons les naïfs et

imaginons un véhicule sans suspension, c'est-à-dire avec des essieux liés rigidement au châssis.

Tant que la route est plate, pas de soucis. Mais qu'une irrégularité se présente, et la roue subit une accélération verticale. En effet, les pneus, bien que légèrement compressibles, ne peuvent épouser la déformation et transmettent à la caisse, par exemple lors de la montée d'une bosse, une accélération verticale, donc une vitesse verticale.

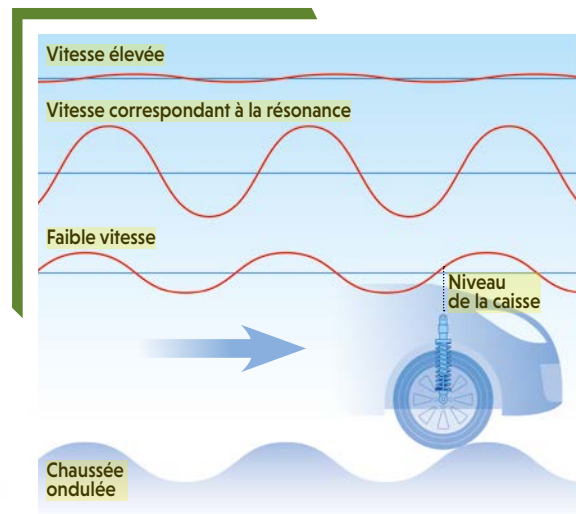
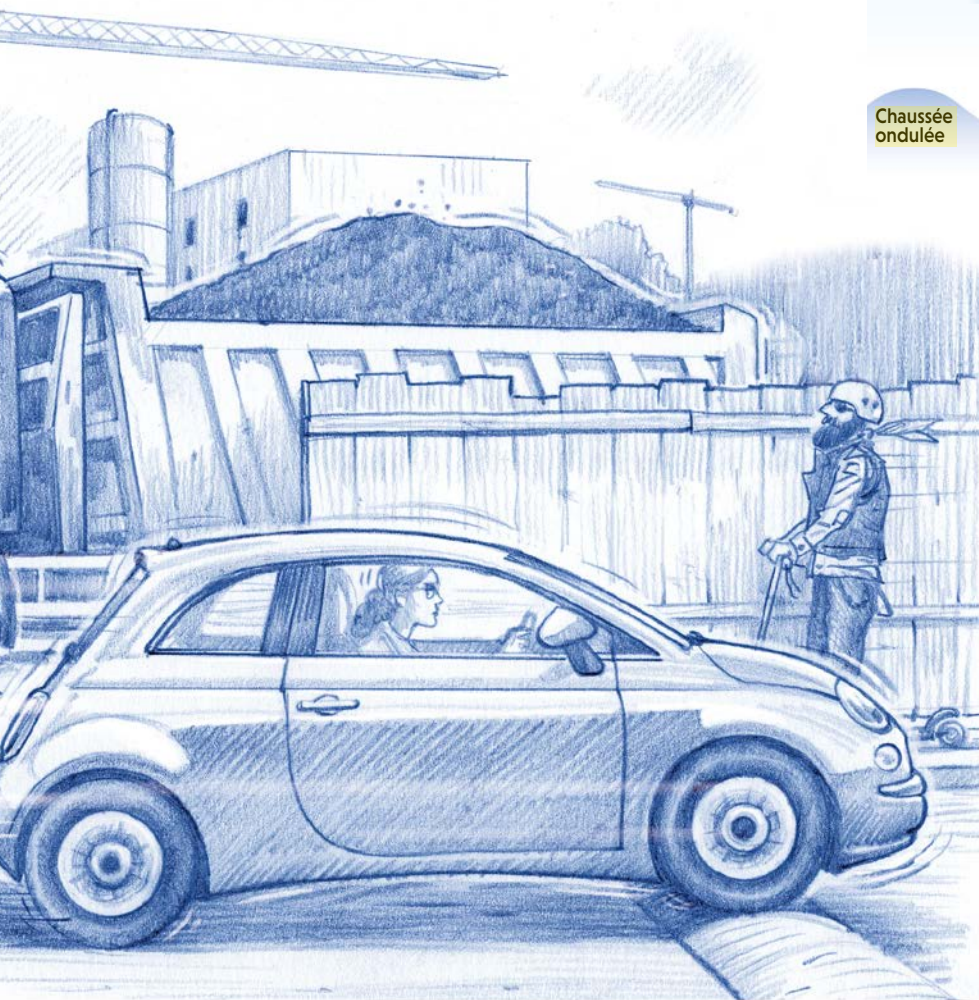
Considérons un tel véhicule se déplaçant à 36 kilomètres par heure, soit 10 mètres par seconde, et qui passe sur un ralentisseur. Lorsque les roues avant roulent sur la pente montante, que l'on suppose inclinée de 10%, elles sont animées d'une vitesse vers le haut de 1 mètre par seconde. Après que le train avant a dépassé le sommet de la bosse, les roues avant perdent le contact avec le sol, donc l'adhérence, et la voiture décolle: malgré



Les roues des véhicules sont équipées d'une suspension (un ressort) et d'un amortisseur, afin d'atténuer les effets des irrégularités de la chaussée.

la gravité, elle conserve une vitesse ascendante pendant 0,2 seconde et aura donc parcouru au moins 2 mètres avant de retomber.

Pour éviter cela, il faut empêcher que le mouvement vertical des roues soit transmis instantanément et totalement à la caisse, afin que celle-ci reste horizontale malgré la bosse. Cela implique une suspension compressible: c'est le rôle des ressorts hélicoïdaux de suspension, bien visibles sur la plupart des voitures. Dans leur régime habituel de fonctionnement, leur variation de longueur (étirement ou compression) est proportionnelle à la force subie à leurs extrémités. L'inverse



ONDULATIONS

Le mouvement vertical de la caisse d'un véhicule dont les roues sont équipées d'une suspension et qui roule sur une chaussée ondulée dépend de sa vitesse. À faible vitesse, la caisse suit la déformation de la chaussée. À vitesse élevée, l'amplitude du mouvement est faible. À vitesse moyenne, où la fréquence des bosses rencontrées est voisine de la fréquence propre d'oscillation des suspensions (situation de résonance), le mouvement est légèrement amplifié. Un déphasage est également à noter, sauf à faible vitesse.

de la constante de proportionnalité est la «raideur»: plus cette caractéristique du ressort est élevée, plus la déformation est faible, pour une force donnée.

Survient alors une nouvelle difficulté. Une masse m (la caisse) posée sur des ressorts (la suspension) oscille verticalement dès qu'on lui donne une impulsion. La fréquence de ces oscillations, appelée fréquence propre, ne dépend pas de l'amplitude du mouvement: elle est proportionnelle à la racine carrée de k/m , où k désigne la raideur du ressort. Ainsi, lors du passage d'un ralentisseur, les ressorts se compriment, ce qui réduit fortement le mouvement de la caisse du véhicule

vers le haut, mais au prix d'un nouvel inconvénient: une fois le ralentisseur franchi, la caisse de la voiture se met à osciller verticalement!

... QUI OSCILLENT PARFOIS INCONFORTABLEMENT

Et ce n'est pas tout, car les routes sont toujours quelque peu ondulées. En pratique, on tolère des ondulations d'amplitude comprise entre 2 et 20 millimètres pour des distances crête-crête allant de 1 à 50 mètres. Ce qui, avec des vitesses variant entre 1 et 35 mètres par seconde, engendre des fréquences de vibration comprises entre 0,02 et 35 hertz (Hz).

Si la voiture roule lentement, la fréquence des oscillations verticales imposées par la chaussée est plus faible que la fréquence propre d'oscillation du véhicule. Celui-ci suit alors le mouvement vertical des roues, mais, comme ce mouvement est lent, ce n'est pas vraiment un problème.

Si la voiture roule vite, les oscillations sont plus rapides que la fréquence propre; ➤

Les auteurs ont récemment publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



> dans ce cas, la caisse bouge à peine selon la verticale et la suspension joue parfaitement son rôle.

Mais si la fréquence des oscillations est proche de la fréquence propre du véhicule, il y a résonance: les ondulations de la chaussée sont amplifiées, et la caisse bouge verticalement avec des amplitudes bien supérieures aux irrégularités de la chaussée!

DES AMORTISSEURS ADÉQUATS

Que faire? D'abord, limiter fortement les oscillations libres de notre système masse-ressort. C'est le rôle des amortisseurs, ces dispositifs encastrés selon l'axe des ressorts de suspension. Encore faut-il convenablement régler l'amortissement: trop faible, il n'empêchera pas de nombreux rebonds; trop élevé, il n'y aura plus de rebond, mais le temps de retour à l'équilibre sera très long, ce qui nuira au confort des passagers si les irrégularités se succèdent à un rythme plus élevé.

On choisit ainsi le coefficient d'amortissement pour que le système de suspension-amortissement soit à peu près dans son régime «critique», où les rebonds ont tout juste disparu et où le retour à l'équilibre est le plus rapide (pour un amortissement donné, le régime critique dépend de la fréquence propre, donc de la masse du véhicule et de sa charge). Un autre avantage de ce choix est que l'amplification du mouvement, quand la fréquence excitatrice atteint une fréquence de résonance, proche de la fréquence propre du système non amorti, est peu marquée.

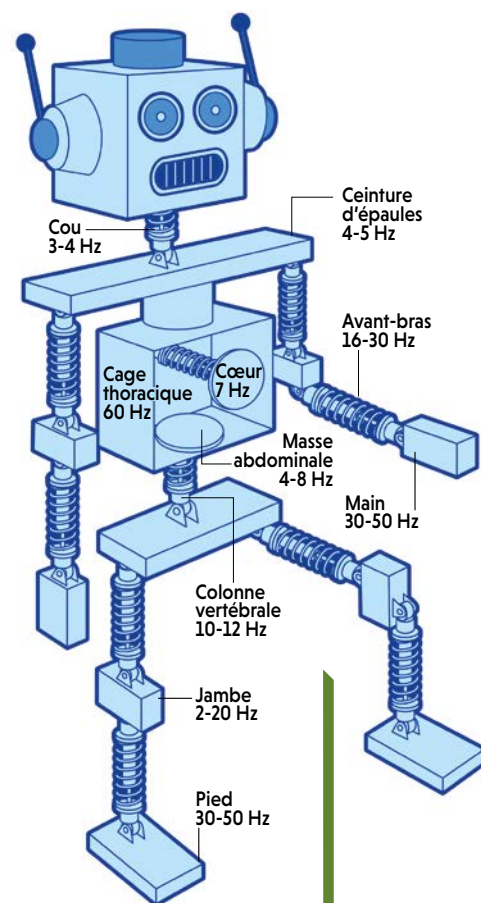
Reste une question épineuse. Comment choisir la raideur des ressorts de suspension? On devine qu'ils doivent être mous pour le confort, mais pas trop pour limiter l'amplitude du mouvement de la suspension, c'est-à-dire son débattement. Au-delà de ce minimum à respecter, c'est en fait le confort des passagers qui va déterminer la raideur des ressorts, de telle façon que la fréquence de résonance de l'oscillateur caisse-suspension ait la valeur la moins gênante pour le corps humain.

Il faut tout d'abord éviter le mal des transports, qui apparaît lorsque notre oreille interne est sollicitée à des fréquences inférieures à 1 Hz. De façon plus générale, le corps humain est très sensible aux vibrations de fréquences inférieures à 20 Hz, précisément les fréquences qu'il subit dans une voiture.

L'étude biomécanique est délicate, mais il est possible de modéliser les différentes parties du corps comme des ensembles masse-ressort amortis et de

LE CORPS ASSIMILÉ À DES MASSES ET DES RESSORTS

Sur le plan biomécanique, on peut modéliser le corps humain de façon simplifiée comme un assemblage de masses reliées par des ressorts amortis, comme représenté ci-contre. Cela s'applique aux membres comme aux principaux organes internes. Chacun de ces systèmes masse-ressort se caractérise par une fréquence propre d'oscillation, qui détermine son comportement lors d'oscillations imposées de l'extérieur. La conception des suspensions d'un véhicule doit en tenir compte. En particulier, il faut éviter que le véhicule oscille à des fréquences qui soient trop proches des fréquences propres des parties du corps humain, ce qui donnerait lieu à une amplification par effet de résonance. Les suspensions sont, de ce fait, conçues pour que leur fréquence de résonance soit voisine de 1 hertz.



déterminer les fréquences propres de ces oscillateurs (voir l'encadré ci-dessus).

Outre les vibrations de la tête, de la colonne vertébrale ou des membres, cette analyse révèle que nos organes internes peuvent aussi bouger par rapport au reste du corps. Et si nous sommes agités à un rythme proche de leurs fréquences propres (environ 7 Hz pour le cœur, entre 4 et 8 Hz pour le foie, entre 6 et 12 Hz pour les reins...), des troubles et des douleurs variés peuvent s'ensuivre.

RÉGLER LA FRÉQUENCE PROPRE SUR ENVIRON 1 HERTZ

La conclusion est que la sensibilité de l'organisme humain aux vibrations verticales est minimale aux environs de 1 Hz. C'est cette fréquence qui nous permet de dimensionner les suspensions: avec une masse de 1 tonne, donc 250 kilogrammes par roue, on trouve des raideurs de 10 kilonewtons par mètre et un temps de relaxation (retour à l'équilibre) de l'ordre de quelques dixièmes de seconde. Des chiffres similaires aux valeurs réelles, malgré la simplicité et les limites de notre approche, qui omet les vibrations des pneus ou des sièges et qui suppose des suspensions purement passives... ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Létévé, **Étude de l'influence des suspensions de véhicule de tourisme sur le confort vibratoire, le comportement routier et les limites de fonctionnement**, thèse de doctorat de l'université de Bordeaux, 2014 (www.theses.fr/2014BORD0346/document).

K. Fritsch, **Fun with automobile springs**, *The Physics Teacher*, vol. 44(7), pp. 451-454, 2006.

A. G. Piersol et T. L. Paez, **Harris' Shock and Vibration Handbook**, chapitre 42 : « Effects of shock and vibration on humans », McGraw-Hill, 6^e édition, 2009.