

> 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.

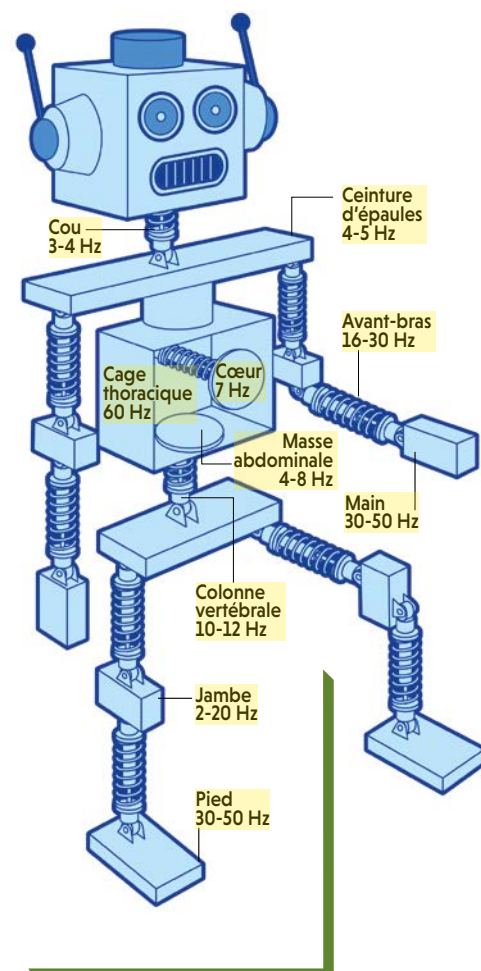
Reste une question épineuse. Comment choisir la raideur des ressorts de suspension? On devine qu'ils doivent être mous pour le confort, mais pas trop pour limiter l'amplitude du mouvement de la suspension, c'est-à-dire son débattement. Au-delà de ce minimum à respecter, c'est en fait le confort des passagers 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 minime 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.