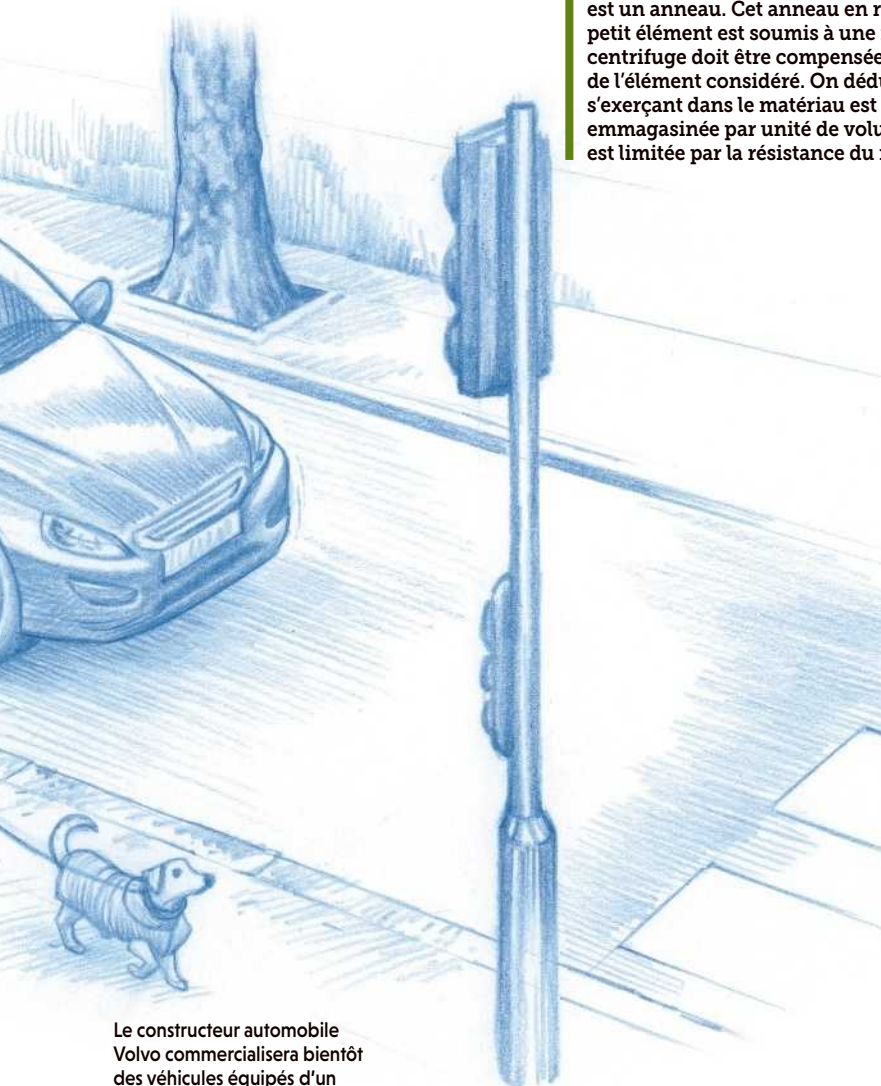
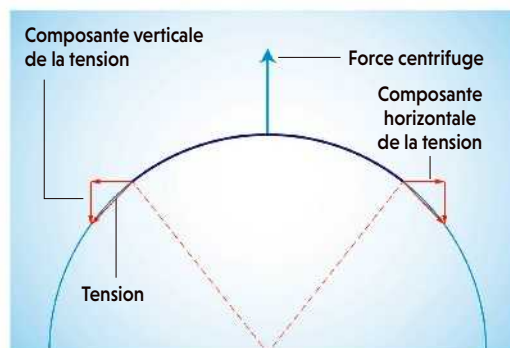


DU LASSO AU VOLANT D'INERTIE

Pour comprendre les forces internes agissant dans un volant d'inertie en rotation, on peut raisonner de façon simplifiée en considérant le volant comme un cylindre formé d'un grand nombre de cylindres annulaires et concentriques très minces. On examine alors les forces au sein d'un tel cylindre annulaire, qui, vu de dessus, est un anneau. Cet anneau en rotation est similaire à la corde d'un lasso, dont chaque petit élément est soumis à une force centrifuge et à la tension de la corde. La force centrifuge doit être compensée par les tensions s'exerçant aux deux extrémités de l'élément considéré. On déduit de cette compensation que la contrainte de traction s'exerçant dans le matériau est égale au double de l'énergie cinétique de rotation emmagasinée par unité de volume du matériau, et donc que cette densité d'énergie est limitée par la résistance du matériau.



Le constructeur automobile Volvo commercialisera bientôt des véhicules équipés d'un volant d'inertie, comme le sont déjà des voitures de formule 1.



fournissent jusqu'à 20 mégawatts. Elles contiennent plusieurs dizaines de modules, dont chacun contient un rotor de 0,91 mètre de diamètre pesant 1,1 tonne et entraîné jusqu'à 16 000 tours par minute. Ces vitesses de rotation sont si élevées que l'ensemble est placé dans une chambre à vide et tenu par une suspension magnétique pour éviter tout contact direct. En fonctionnement, l'énergie de chaque module est de l'ordre de 30 kilowattheures, soit 100 mégajoules, et la puissance qu'il peut restituer est ajustable: de 50 kilowatts pendant 35 minutes en continu jusqu'à des pics de 180 kilowatts pendant 2 ou 3 minutes.

Ces dispositifs ont plusieurs avantages par rapport aux batteries. D'une part, les transferts d'énergie sont systématiquement plus rapides, pour une énergie disponible par unité de masse à peu près équivalente (50 à 100 wattheures par kilogramme). D'autre part, ces dispositifs se détériorent moins vite que les batteries lors des cycles de charge et décharge, d'où une durée de vie supérieure (plus de 100 000 cycles, contre moins de 10 000 pour une batterie). Enfin, l'impact environnemental est faible, les matériaux utilisés étant bien moins toxiques que ceux des batteries électrochimiques.

Comment adapter ces systèmes à des utilisations embarquées où l'on doit viser la légèreté? Comme on ne peut pas augmenter la masse, il suffit de faire tourner plus vite! Une fois réglés les délicats problèmes de vibrations et d'équilibrage, reste un élément limitant: la cohésion de la matière, puisque la force centrifuge, si elle est trop intense, disloquera le matériau.

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

> Regardons ce qui se passe pour un anneau mince en rotation (une analyse plus générale aboutirait à la même conclusion). Pour comprendre la nature des contraintes mécaniques dans le matériau, une bonne image est celle du lasso avec sa corde en forme d'anneau (voir l'encadré page précédente). À cause de la rotation, chaque petit morceau de la corde subit une force centrifuge, dirigée vers l'extérieur, proportionnelle au produit du rayon de l'anneau par le carré de la vitesse de rotation. Cependant, la forme de la corde est déterminée par la tension qui y règne tout du long. En imposant l'équilibre des forces centrifuge et de tension, on détermine cette dernière ainsi que la contrainte dite « de traction », homogène à une pression, qui s'exerce dans la corde.

RÉSISTANCE DU MATÉRIAU À LA TRACTION...

On trouve que la contrainte de traction est égale au produit de la masse volumique du matériau par le carré de la vitesse, c'est-à-dire à deux fois la densité volumique d'énergie cinétique. Il s'ensuit qu'à volume donné, l'énergie maximale stockable dans un anneau en rotation (et plus généralement un volant d'inertie) est limitée par la contrainte de traction maximale que supporte le matériau, donc par sa résistance mécanique. Elle ne dépend pas, ce qui est inattendu, de la masse volumique ou de l'inertie (la masse) du volant.

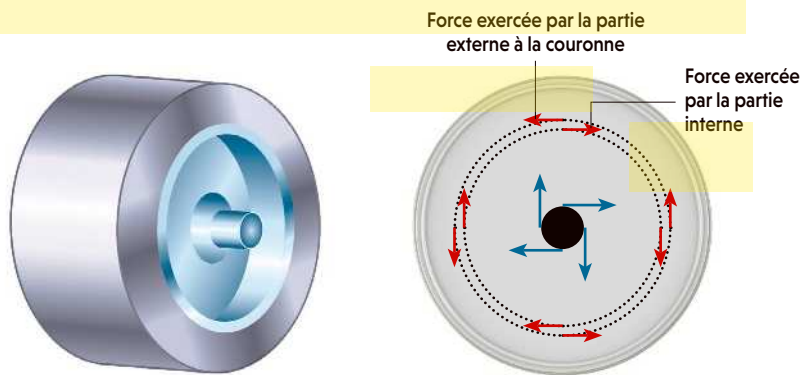
Il est ainsi avantageux d'utiliser un matériau d'une bonne résistance mécanique et peu dense, auquel on pourra imprimer une rotation plus rapide qu'avec un matériau plus dense. On préférera donc la fibre de carbone (1,6 tonne par mètre cube), qui résiste à une contrainte de 4900 mégapascals, à l'acier (8 tonnes par mètre cube), qui cède à 1450 mégapascals : les densités d'énergie maximale sont de 3 mégajoules par kilogramme pour la fibre de carbone et de 0,18 mégajoule par kilogramme pour l'acier.

... ET AU CISAILLEMENT

Pourquoi alors ne pas utiliser exclusivement de la fibre de carbone, légère et résistante ? Parce qu'il faut exercer un couple important sur le volant pour l'accélérer ou le freiner. Cela se fait à partir de l'axe central, chaque couronne du volant exerçant sur la couronne suivante, vers l'extérieur, une force qui la met en mouvement, et ainsi de suite de proche en proche. Cela se traduit par l'apparition, dans tout le volume du volant, d'une autre contrainte, dite de cisaillement, qui

CISAILLEMENT DANS LE VOLANT

L'accélération ou le freinage d'un volant d'inertie s'effectue en exerçant un couple sur son axe (flèches bleues). Les forces correspondantes se transmettent alors de proche en proche, de l'axe à la périphérie. Elles sont tangentielles et décroissent à mesure que l'on s'écarte de l'axe. Il leur correspond une contrainte de cisaillement qui est maximale près de l'axe (on a représenté ici par des flèches rouges les contraintes de cisaillement s'exerçant sur une mince couronne cylindrique). C'est pourquoi on conçoit des volants d'inertie dont la partie centrale est en acier, bien résistant au cisaillement, tandis que la partie périphérique est en matériau composite, bien résistant aux contraintes de traction (qui augmentent avec la distance à l'axe).



est maximale près de l'axe et qui diminue jusqu'à s'annuler à la périphérie (voir l'encadré ci-dessus).

Or les matériaux composites résistent bien à la traction, mais très mal au cisaillement. On conçoit donc des volants d'inertie dont la partie centrale est en acier, pour un transfert efficace de puissance entre l'axe et la roue, tandis que cette partie centrale est entourée d'un matériau composite résistant bien aux contraintes de traction et supportant donc des vitesses de rotation très élevées.

Les volants rapides les plus performants ont ainsi une densité d'énergie maximale de 0,7 mégajoule par kilogramme, bien supérieure à celle de l'acier et désormais comparable à celle des batteries au lithium-ion. C'est le cas des volants d'inertie conçus en 2006 et destinés aux voitures de formule 1 pour récupérer l'énergie lors des freinages et la redonner lors des accélérations.

Par exemple, dans un modèle de chez Flybrid, un cylindre de 20 centimètres de diamètre, en acier et en fibre de carbone, tourne à 64500 tours par minute et emmagasine près de 0,6 mégajoule. Ces performances sont en fait limitées par le règlement de la formule 1, qui interdit aux volants d'inertie de dépasser une puissance de 60 kilowatts. On envisage cependant leur utilisation dans les voitures de tourisme dès 2020. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. E. Amiryar et K. R. Pullen, **A review of flywheel energy storage system technologies and their applications**, *Applied Sciences*, vol. 7(3), article 286, 2017.

M. Hedlund et al., **Flywheel energy storage for automotive applications**, *Energies*, vol. 8(10), pp. 10636-10663, 2015.

M. Krack et al., **Rotor design for high-speed flywheel energy storage systems**, in R. Carbone (dir.), *Energy Storage in the Emerging Era of Smart Grids*, InTech, 2011.

n° 34 : décembre 2019

Le moustique tigre histoire d'une conquête



100 p.
8,50 €



Vente en kiosque,
par abonnement
et par correspondance

Sur notre nouveau site

especes.org

vous pouvez désormais
vous abonner au format
papier ou numérique,
commander nos numéros,
consulter les sommaires,
les compléments d'articles,
les actualités de la revue...



La revue de vulgarisation scientifique
entièrement dédiée aux sciences
de la vie et de la Terre

Revue trimestrielle publiée
par l'association Kyrnos publications
association.kyrnos@gmail.com