



Croquis de l'un des jardins-mandalas du projet *I Never Promised You a Green Garden*, incluant les logos des sociétés Bayer, Monsanto, BASF, Syngenta...



installé à Bourges, nommé *We resist*, est une fusion des logos de Bayer et de Monsanto, en écho au rachat du second par le premier en juin 2018. La disposition du jardin, très symétrique, renvoie aux créations de l'architecte paysagiste français André Le Nôtre à qui l'on doit notamment le parc et les jardins de Versailles. Étonnamment, parmi les 14 espèces choisies, plusieurs ont des vertus médicinales. C'est le cas du bleuet *Centaurea cyanus*, de la camomille sauvage *Matricaria chamomilla*, du coquelicot *Papaver rhoeas*...

Toutes ces plantes ont acquis leur résistance dans des milieux fortement traités par des herbicides exerçant une

importante pression de sélection, comme des espaces urbains, des voies ferrées... Les cas de résistance, détectés aujourd'hui dans près de 70 pays, concernent 157 principes actifs appartenant à 23 des 26 classes d'herbicides reconnus. C'est dire l'ampleur du phénomène. L'ivraie raide *Lolium rigidum*, une graminée annuelle abondante en Australie, résisterait à douze classes d'herbicides, un record.

Le jardin *We resist* s'inscrit dans un projet plus vaste intitulé *I Never Promised You a Green Garden* («Je ne vous ai jamais promis un jardin vert»), où des jardins de plus grande ampleur, incluant les logos d'autres sociétés, seront plantés. L'idée

est de sensibiliser le public à l'importance d'une flore diversifiée et d'une agriculture plus saine, conformément à l'appel de Nous voulons des coquelicots. De toute façon, avec les phénomènes de résistance qui essaient, nous en aurons! ■

Exposition «OuVert», au Transpalette, à Bourges, jusqu'au 18 janvier 2020.
Programme complet : www.perspectivact.org



L'auteur a publié :
Pollock, Turner, Van Gogh, Vermeer et la science...
(Belin, 2018)

LES AUTEURS



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

DES VOLANTS PLEINS D'ÉNERGIE

On utilise depuis longtemps des volants d'inertie pour stocker de l'énergie. Ces dispositifs constituent aujourd'hui des alternatives crédibles aux batteries.

Qu'y a-t-il de commun entre un tour de potier datant de 8000 ans, les machines à vapeur du XIX^e siècle et les derniers modèles de véhicules de formule 1 ? Ces machines comportent toutes un volant d'inertie, dispositif qui stocke de l'énergie sous la forme d'énergie cinétique de rotation. Aujourd'hui, les volants d'inertie sont capables de délivrer des puissances bien plus importantes que les batteries électriques. Et outre le stockage d'énergie, on les utilise aussi pour réguler des fluctuations de puissance mécanique ou électrique. Comment fonctionnent-ils et quelles sont leurs limitations ?

POUR FAIRE ROULER UN BUS OU UNE FORMULE 1

Commençons par un exemple, celui des Gyrobus. Ces véhicules, développés dans les années 1950 par la société suisse

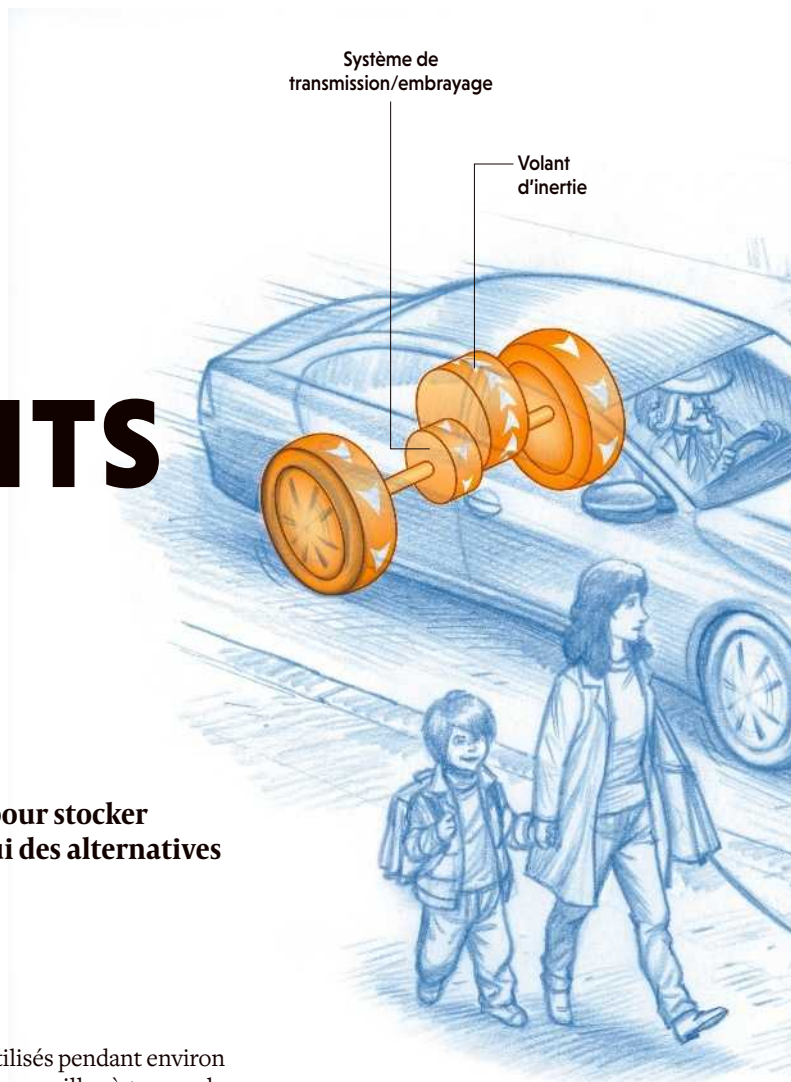
Oerlikon, ont été utilisés pendant environ sept ans dans quelques villes à travers le monde. Entre deux arrêts, leur seule source d'énergie pour se propulser était un volant d'inertie de 1,6 mètre de diamètre et d'une masse de 1,5 tonne tournant autour de son axe à une vitesse de 3000 tours par minute.

L'énergie cinétique de cette masse en rotation est égale à la moitié du produit du « moment d'inertie » – qui caractérise la répartition et l'éloignement de la masse autour de l'axe – par le carré de la vitesse de rotation. Elle est ici de 23 mégajoules, soit l'énergie mécanique délivrée par un moteur diesel consommant 1,5 litre de gazole. Durant le trajet, l'énergie stockée dans le volant était convertie en énergie électrique pour alimenter le moteur électrique du bus, ce qui lui procurait une autonomie de 6 kilomètres, tout à fait adaptée au transport urbain.

En contrepartie, le volant ralentissait à mesure que le bus avançait. C'est

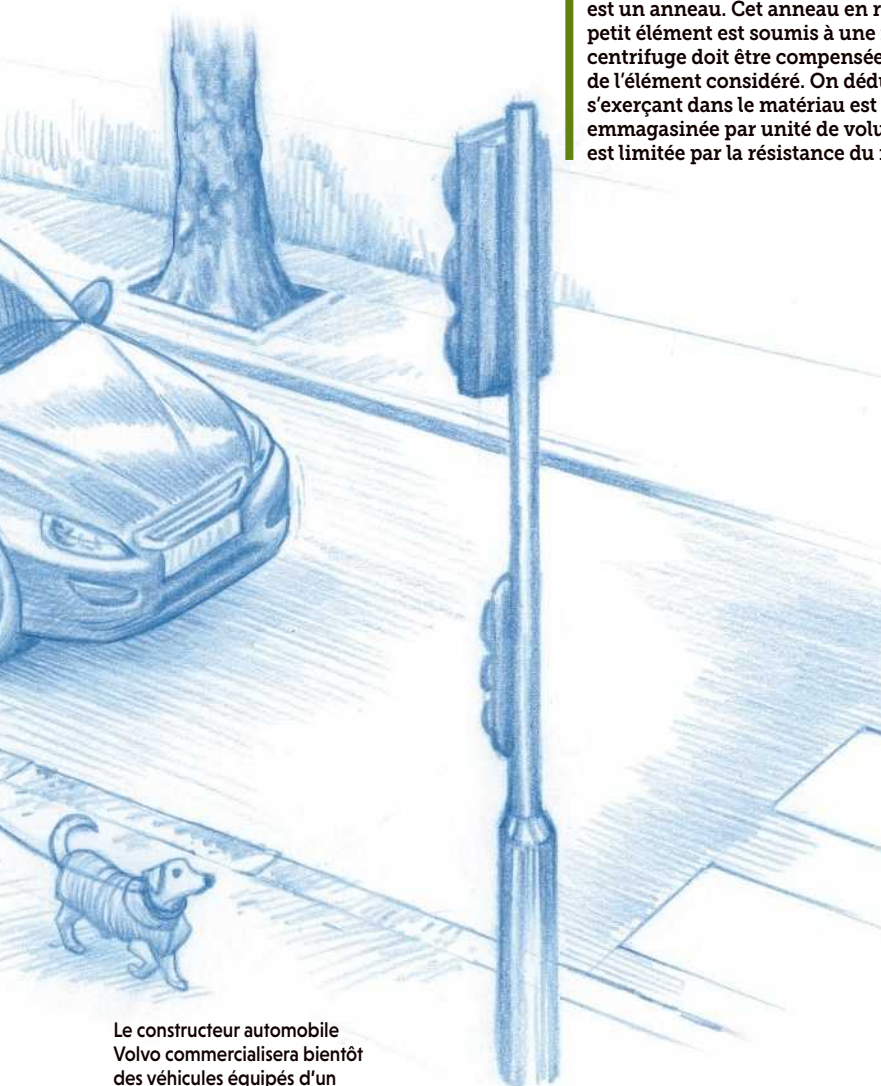
pourquoi, à certains arrêts, le bus se connectait à une borne électrique (déjà !) qui relançait le volant d'inertie jusqu'à sa vitesse maximale. La durée de la recharge (parfois de 3 à 4 minutes) et le danger potentiel que représentait cette roue massive tournant à grande vitesse ont conduit à l'abandon de ce système de propulsion.

En revanche, on retrouve de lourds volants d'inertie pour réguler les fluctuations rapides de production ou de consommation dans un réseau électrique. C'est par exemple le cas des centrales électriques construites par la société Beacon Power, aux États-Unis, qui

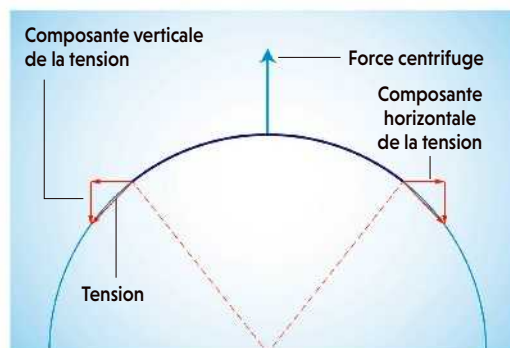


DU LASSO AU VOLANT D'INERTIE

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.

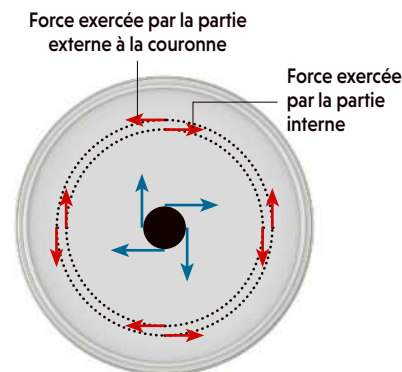
Il est ainsi avantageux d'utiliser un matériau d'une bonne résistance mécanique et peu dense, auquel on pourra imprimer une rotation plus rapide qu'avec un matériau plus dense. On préférera donc la fibre de carbone (1,6 tonne par mètre cube), qui résiste à une contrainte de 4900 mégapascals, à l'acier (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 €

DOM - BEL/LUX 8,90 € - CAN: 13,50 \$CA - N CAL/S: 1 250 CFP - POL/S: 1 300 CFP



Abeilles :
100 millions d'années d'évolution



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