

IDÉES DE PHYSIQUE

Batailles de toupies

L'équilibre des toupies, que les joueurs cherchent à perturber chez leurs adversaires, est étonnant. Sa clef ? Le couple gyroscopique.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

«Trois, deux, un... hyper-vitesse!», s'écrient les enfants en lançant dans l'arène leurs toupies *Beyblade* (nom d'une série de mangas) d'attaque, de défense ou d'endurance (voir la figure 1). Quelle sera la dernière toupie à rester debout tandis que les autres auront été déséquilibrées par une collision ou éjectées de l'arène, ou auront simplement cessé de tourner ? Et qu'est-ce qui différencie les toupies d'attaque de celles de défense ou d'endurance ?

Immobile sur sa pointe, une toupie tombe quand on la lâche. Mais lorsqu'elle tourne rapidement autour de son axe, elle entame un mouvement dit de précession, l'axe décrivant un cône autour de la verticale (voir la figure 3). D'où provient cette stabilité et qu'est-ce qui empêche la toupie de tomber ?

Rotation rapide, couple intense

Pour le comprendre, commençons par une expérience plus simple et facile à reproduire chez soi. Prenons une roue de vélo dont l'axe de rotation est muni de poignées. Saisissons ces dernières de telle sorte que l'axe soit horizontal devant nous, la roue étant verticale. Un comparse fait alors tourner rapidement la roue de telle façon que son sommet s'éloigne de notre tronc (voir la figure 2). Ensuite, faisons tourner les poignées comme un guidon, afin de faire pivoter la roue vers la gauche.

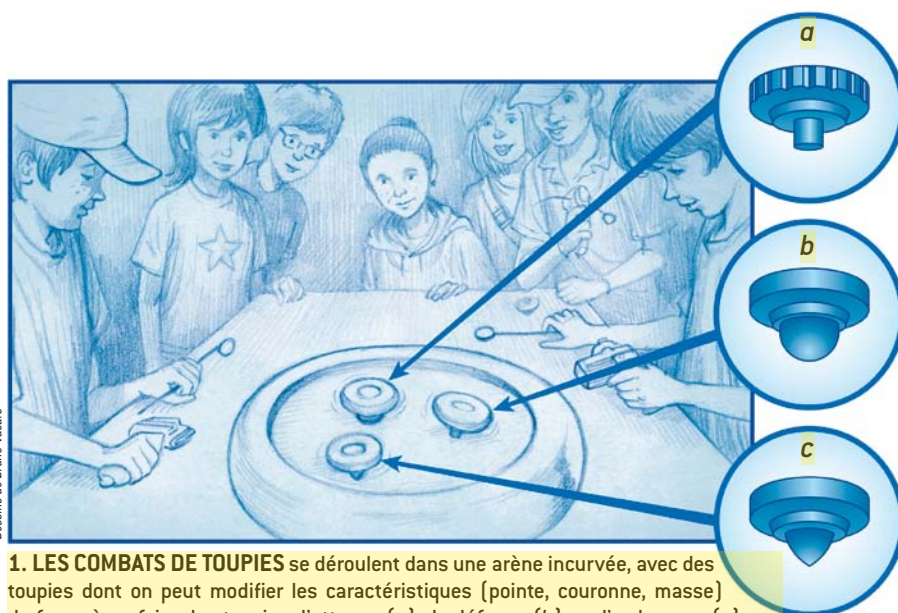
LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

Quelque chose d'inattendu se produit : nous ressentons une résistance au mouvement de rotation, tandis que la roue a tendance à basculer sur le côté droit. C'est l'action du couple gyroscopique, d'autant plus intense que la rotation de la roue est rapide.

Quelle est l'origine de ce couple gyroscopique ? Piquons une punaise colorée sur la périphérie du pneu et analysons son mouvement. Lorsque la roue tourne à vitesse constante autour de l'axe horizontal, la trajectoire est un cercle vertical et l'accélération de la punaise est dirigée vers le centre. Cela signifie que la force qu'elle subit de la part de la roue est une force centripète, dirigée



1. LES COMBATS DE TOUPIES se déroulent dans une arène incurvée, avec des toupies dont on peut modifier les caractéristiques [pointe, couronne, masse] de façon à en faire des toupies d'attaque [a], de défense [b] ou d'endurance [c]. Chaque joueur tente d'éjecter ou déstabiliser les toupies adverses ; il gagne quand la sienne est la dernière à rester en équilibre dans l'arène.

vers l'intérieur; réciproquement, en vertu de la loi de l'action et de la réaction, elle exerce sur la roue une force centrifuge, c'est-à-dire dirigée vers l'extérieur.

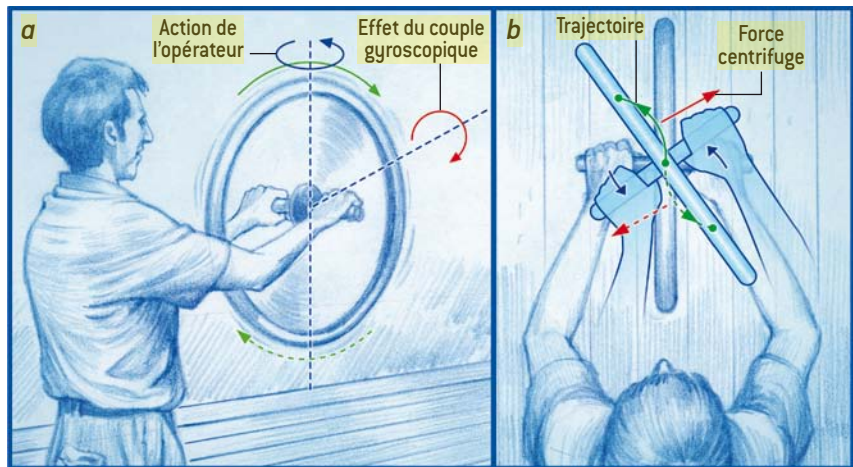
Qu'en est-il lorsque nous tournons lentement la roue vers la gauche ? La trajectoire de la punaise n'est plus un cercle parfait : quand la punaise est en haut, sa trajectoire s'incurve vers la gauche. Cela signifie qu'à son accélération centripète vient s'ajouter une accélération vers la gauche. Il en résulte une force supplémentaire, exercée par la punaise sur la roue et dirigée vers la droite. Lorsque la punaise est en bas et qu'elle se rapproche de nous, sa trajectoire s'incurve cette fois vers la droite, d'où une force supplémentaire sur la roue dirigée vers la gauche, mais de même intensité que la précédente.

Si la punaise nous a aidés à visualiser le mouvement, les conclusions qui précèdent s'appliquent aussi à un morceau de pneu situé en haut ou en bas de la roue ; et en raison du caractère solide du matériau, ces forces nouvelles viennent s'appliquer sur la jante.

Pour les autres morceaux du pneu, il est plus difficile de visualiser les trajectoires, mais le calcul montre que chaque morceau de pneu exerce sur la jante une force dirigée vers la droite dans la moitié supérieure de la roue, et vers la gauche dans la partie inférieure. Globalement, ces forces se compensent, mais elles créent un couple qui tend à faire basculer le plan de la roue vers la droite. Ce couple gyroscopique est perpendiculaire à la fois à l'axe de rotation rapide et à l'axe de la rotation imprimée par nos mains à la roue.

Stabilité gyroscopique grâce à la précession

C'est ce couple gyroscopique qui stabilise une toupie, grâce à un mécanisme particulier. Habituellement, pour maintenir un objet dans une certaine position, nous exerçons une force opposée à son déplacement afin de le ramener vers sa position initiale. Mais ce n'est pas la seule solution possible. Si l'on vous pousse dans le dos, plutôt que de résister, vous pouvez esquiver en continuant à avancer, mais en tournant vers

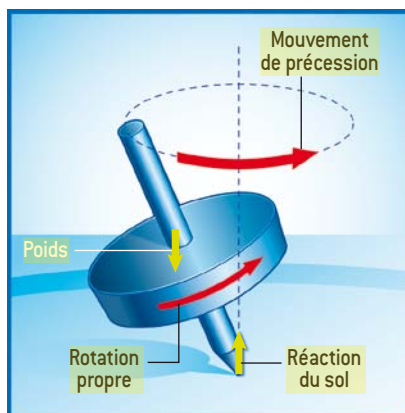


2. QUAND ON ESSAIE DE FAIRE PIVOTER LA ROUE, en rotation rapide, vers la gauche, une résistance apparaît et la roue tend à s'incliner vers la droite (a). C'est l'effet du couple gyroscopique (b) : la trajectoire des points de la roue (en vert ; seuls les points haut et bas sont illustrés) n'étant plus circulaire, des forces centrifuges supplémentaires apparaissent, dont l'effet global est un couple qui tend à incliner la roue.

la gauche. Vous allez alors effectuer un cercle et revenir à votre position initiale, sans jamais vous être opposé à la force qui vous meut.

C'est exactement le cas pour les toupies. Lorsqu'on cherche à déstabiliser une toupie verticale, son sommet décrit un cercle autour de la verticale, un cercle d'autant plus petit que la rotation de la toupie est rapide. Lorsque le facteur déstabilisant est le poids (c'est le cas lorsque la toupie est lâchée en étant inclinée), l'effet est le même. Au lieu de tomber, l'axe de la toupie se met à tourner autour de la verticale : c'est le mouvement de précession. La rotation et la précession de la toupie créent un couple gyroscopique qui compense le couple dû au poids. Autrement dit, la toupie n'échappe pas au poids, mais elle réussit en quelque sorte à l'esquiver.

Qu'en est-il alors des toupies de combat qui passionnent tant les enfants ? L'arène dans laquelle elles évoluent est une sorte de grand bol. Pour tenter de gagner, il est possible de modifier les caractéristiques de la toupie : la forme de la pointe, la couronne qui entre en contact avec les toupies adverses ou la masse centrale qui, avec la couronne, détermine l'inertie de la toupie (cette dernière est d'autant plus élevée qu'on éloigne la masse de l'axe de rotation).



3. UNE TOUPIE LÉGÈREMENT INCLINÉE ne tombe pas : le couple gyroscopique, créé par la rotation rapide et le mouvement de précession, compense le couple dû au poids et à la réaction du sol.