



HAL
open science

Left-vs right-handed badminton slice shots: opposite spinning of the chiral shuttlecock and Magnus effect

Eric Collet

► **To cite this version:**

Eric Collet. Left-vs right-handed badminton slice shots: opposite spinning of the chiral shuttlecock and Magnus effect. *Comptes Rendus. Physique*, In press, 25 (G1), pp.1-15. 10.5802/crphys.174 . hal-04388731v1

HAL Id: hal-04388731

<https://hal.science/hal-04388731v1>

Submitted on 22 Jan 2024 (v1), last revised 26 Mar 2024 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

Slices de gauchers vs slices de droitiers au badminton : rotation inverse du volant chiral et effet Magnus

Eric Collet,^{a,b,c,*}

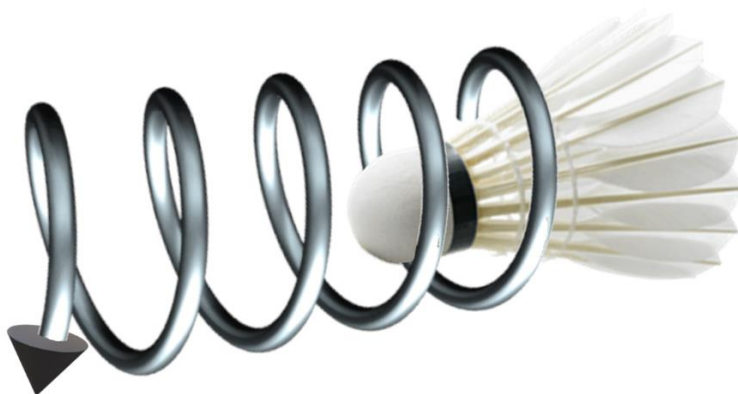
eric.collet@univ-rennes.fr

<https://ipr.univ-rennes1.fr/interlocuteurs/eric-collet>

^a Univ Rennes, CNRS, IPR (Institut de Physique de Rennes) - UMR 6251, F-35000 Rennes, France

^b DYNACOM IRL2015 University of Tokyo - CNRS – Univ Rennes, Hongo, Tokyo 113-0033 – Japan

^c Institut universitaire de France (IUF)



Traduction de l'article

Left- vs right-handed badminton slice shots: opposite spinning of the chiral shuttlecock and Magnus effect

Publié dans CR Physique (2024)

<https://doi.org/10.5802/crphys.174>

▪ Résumé

La nature chirale du volant de badminton est responsable de sa rotation anti-horaire lorsqu'il se propage naturellement dans l'air. Cela induit une dissymétrie entre joueurs gauchers et droitiers et les trajectoires du volant qui en résultent, capturées ici en condition réelle sur le terrain de badminton en slow motion à 3700 images par seconde. Les vidéos mettent clairement en évidence cette dissymétrie puisque les slices effectués par les droitiers induisent une rotation anti-horaire naturelle, tandis que ceux effectués par les gauchers induisent une rotation d'horaire à anti-horaire, rendant les trajectoires de volants différentes. Les vidéos ont également mis en évidence un bref effet Magnus, souvent négligé au badminton, soulevant le volant pour les gauchers comme les droitiers et affectant l'efficacité du slice.

- **Mots clés** : Physique du badminton, effet Magnus, symétrie, chiralité, trajectoires, temps résolu

Vidéos

Les liens hypertextes dans l'article renvoient vers les vidéos disponibles sur [une chaîne YouTube](#) où d'autres vidéos explicatives viennent compléter cet article.

Introduction

Selon la Badminton World Federation, le badminton est l'un des sports les plus populaires, pratiqué par plus de 339 millions de personnes dans le monde [1]. Environ 23% d'entre elles sont gauchères [2]. Si dans la plupart des sports il n'y a pas de différence géométrique entre les gauchers et les droitiers, ce n'est pas le cas au badminton. Cette dissymétrie provient de la nature chirale des volants. Les volants en plumes sont composés d'un ensemble de 16 plumes assemblées au niveau du bouchon (figure 1). Sa symétrie globale correspond au groupe ponctuel C_{16} , qui contient des axes de rotation d'ordre 2, 4, 8 et 16 [3]. Les plumes de l'aile gauche d'oies sont généralement utilisées pour fabriquer des volants car elles sont plus régulières et plus flexibles que celles de l'aile droite [4]. En raison de la façon dont les plumes sont placées en hélice gauche dans le bouchon, les volants ne présentent pas de symétrie miroir. Ils ne sont donc pas superposables à leur image dans un miroir et forment des objets chiraux. Cette structure fait tourner ces projectiles dans le sens inverse des aiguilles d'une montre lorsqu'ils s'éloignent du joueur, décrivant ainsi une hélice gauche. La symétrie du terrain de badminton est différente car elle correspond au groupe ponctuel $mm2$. La figure 2 montre une symétrie miroir au filet et une symétrie axiale d'ordre 2 au centre du terrain. Lorsque deux joueurs droitiers se font face (figures 2a), ou deux gauchers (Figure 2b), il existe une symétrie axiale d'ordre 2 sur le terrain, également contenue dans la symétrie du volant, qui tourne donc de manière équivalente de part et d'autre du terrain. La situation est donc symétriquement équivalente pour les deux joueurs droitiers (ou les deux gauchers) qui se font face. Lorsqu'un gaucher fait face à un droitier (figures 2c-2d), la symétrie axiale d'ordre 2 est perdue et une symétrie miroir apparaît au filet. Pour maintenir cette symétrie miroir, le volant devrait tourner dans des directions opposées de part et d'autre du court. Cependant, en raison de sa nature chirale, la rotation du volant dans le sens horaire et la rotation naturelle dans le sens anti-horaire ne sont pas équivalentes. Il n'y a donc pas globalement de symétrie miroir, et la situation est alors différente par symétrie pour un gaucher qui fait face à un droitier, en particulier parce que la raquette manipulée par ces joueurs peut induire des rotations opposées du volant.

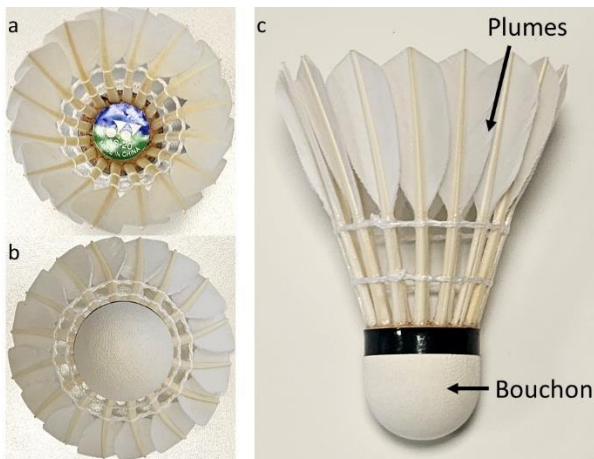


Figure 1. Structure et symétrie d'un volant en plumes. Les vues de dessous et de dessus le long de l'axe de rotation (a et b) montrent la symétrie C_{16} , due à l'implantation des 16 plumes dans le bouchon (c). Le volant présente également une symétrie d'ordre 2.

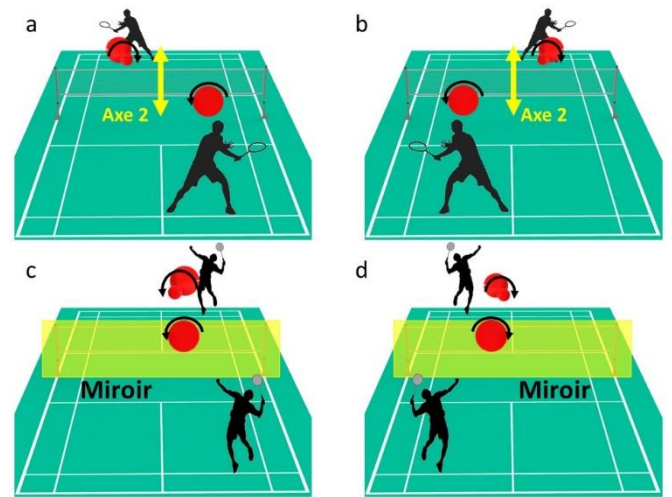


Figure 2. Croquis d'un terrain de badminton, présentant une symétrie d'ordre 2 (2-fold) autour du centre du terrain et une symétrie miroir (mirror) centrée sur le filet. Une situation où des droitiers (a) ou des gauchers (b) se font face correspond à une symétrie axiale d'ordre 2, laissant invariante le sens de rotation du volant. Pour avoir une symétrie miroir, il faudrait que des joueurs gauchers et droitiers se fassent face (c,d) et que le volant tourne de manière équivalente dans les deux sens, ce qui n'est pas le cas.

La plupart des études sur les trajectoires des volants disponibles dans la littérature concernent des mesures expérimentales, réalisées en soufflerie, à l'aide de caméras rapides, et/ou des analyses théoriques de différents coups au filet, au service, lors de smashes ou de dégagements [5-12]. Ces études visent à acquérir des connaissances sur les équations du mouvement et la trajectoire du volant. Habituellement, la trajectoire est décrite dans un plan, défini par la position initiale et les composantes horizontales et verticales des vitesses. La reproductibilité et la qualité de ces études sont essentielles pour l'analyse quantitative des propriétés de vol des différents volants. L'axe de rotation du volant étant colinéaire à sa vitesse, il est souvent considéré que l'effet Magnus [13] n'existe pas au Badminton [14], contrairement à d'autres sports de balles tels que le baseball, le volley-ball et le football [15]. Des mesures de la force latérale sur le volant ont suggéré que la rotation du volant induit un effet Magnus, qui pourrait être à l'origine de la "dérive" du volant remarquée par les joueurs lors de dégagements [6, 16]. Dans de nombreuses études, les mesures ne sont pas faites sur des coups réalisés par des joueurs car la trajectoire initiale du volant après impact avec la raquette sont difficiles à reproduire avec précision.

L'étude présentée ici porte sur une analyse qualitative des trajectoires du volant après des coups slicés exécutés par des droitiers et des gauchers. La technique du slice au badminton est connue pour faire tourner le volant et modifier l'angle de retour. Ici nous nous focalisons sur les slices croisés (figure 3). Les droitiers ont joué le slice dans le coin droit du court, tandis que les gauchers ont joué le slice dans le coin gauche du court. Une caméra haute vitesse *Phantom Miro 3a10* a été utilisée sur le terrain de badminton, afin de capturer des vidéos à haute fréquence d'images (3700 ips) les trajectoires du volant en conditions réelles. À cette fréquence d'images, la résolution des vidéos a été maximisée à 1024x768 pixels et le temps d'exposition pour chaque image a été fixé à 268 μ s. Nous avons utilisé des volants Yonex AS 20 pour les slices.

Les [liens vers les vidéos réalisées](#) sont donnés en fin d'article. Les vidéos ayant été collectées sur le terrain (3D), il n'a pas été possible d'extraire des mesures précises de distances et de vitesses. Elles ont été estimées approximativement en mettant à l'échelle les longueurs en fonction de la taille du volant (9 cm) ou de la raquette (68 cm).

Compte tenu du lectorat attendu, les choix est fait d'utiliser des unités courantes pour la vitesse linéaire (km/h) et la vitesse angulaire (rotation par seconde : rps) du volant, afin de rendre cet article accessible. Nous discutons ensuite 1) du retournement du volant après le smash, 2) de la rotation dans le sens anti-horaire pour les slices de droitiers et de la rotation d'horaire à anti-horaire pour les slices de gaucher, 3) de la déviation du volant par effet Magnus après les slices de gauchers et droitiers et 4) des trajectoires du volant sur les slices de droitiers et gauchers.

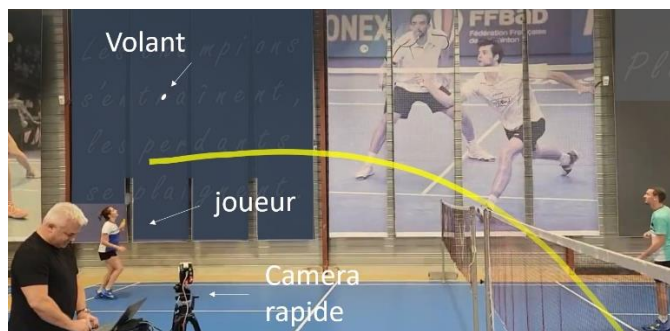


Figure 3. Une caméra à grande vitesse a filmé les trajectoires du volant à 3 700 images par seconde sur le terrain de badminton, alors que les joueurs effectuaient différents slices sur le court.

1. Retournement du volant après le smash

Il est bien connu qu'en raison de leur structure chirale particulière, les volants de badminton tournent lorsqu'ils volent. Cette spécificité par rapport aux sports de balles a fait l'objet d'une recherche intensive du point de vue de l'aérodynamique [5-12], avec des applications inattendues telles que l'amélioration de la précision d'atterrissage des véhicules lors de rentrées dans l'atmosphère [17]. La valeur du coefficient balistique des volants de badminton est faible, ce qui traduit leur capacité à vaincre la résistance de l'air en vol [5]. Un volant génère une traînée aérodynamique importante, de sorte qu'une vitesse initiale de ≈ 240 km/h après un smash est typiquement réduite en ≈ 0.6 s à une vitesse de ≈ 25 km/h [16, 18-20], proche de la vitesse terminale. Le record féminin du smash le plus rapide en badminton est actuellement de 438 km/h et il appartient à P. Tan, tandis que le record masculin de 565 km/h appartient à S. Rankireddy. Tous deux sont droitiers. Les volants étant des particules légères et étendues, ils volent avec une trajectoire à forte traînée. Kitka et al. [5] ont comparé les trajectoires de volants en plumes tournants et statiques et ont conclu que les volants tournants présentaient une traînée légèrement plus importante. Cohen et al ont étudié l'effet des forces de pression aérodynamiques sur le volant, avec une force de traînée globale appliquée au point central au niveau des plumes [8], qui dépend du profil de pression environnant.

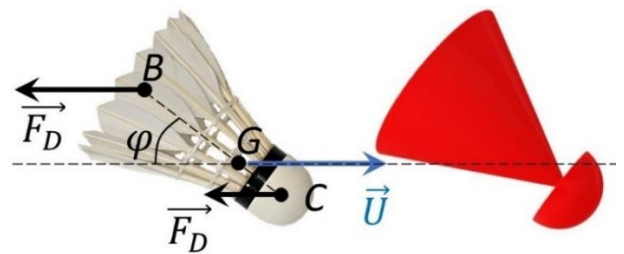


Figure 4. A gauche : les forces de traînée F_D appliquées sur les plumes et le bouchon génèrent un couple, stabilisant l'axe du volant le long de sa vitesse \vec{U} (voir ref [8]). À droite : représentation schématique utilisée dans la figure 6.

Lorsque la pression est uniforme sur les plumes, le centre aérodynamique est le centroïde de l'objet. Cependant, le centre de gravité, plus proche du bouchon, diffère du centre de pression [21]. Cohen et al ont introduit un modèle expliquant le retournement du volant après l'impact avec la raquette, ce qui modifie sa direction de propagation. Ils ont montré qu'il existe un couple aérodynamique stabilisateur qui aligne le volant après l'impact. Ils ont modélisé le volant avec deux sphères (figure 4) : l'une représentant la jupe légère avec une grande section transversale (placée en B) et l'autre représentant le petit bouchon lourd avec une section transversale plus petite (placée en C) [8]. Ils ont expliqué que lorsque le projectile vole avec un angle φ par rapport à sa vitesse \vec{U} , après un impact avec la raquette, un couple de force apparaît autour du centre de gravité G, dû aux différentes forces de traînées \vec{F}_D sur la jupe et le bouchon, ce qui aligne l'axe du volant avec sa vitesse \vec{U} . Pour une vitesse initiale du volant de ≈ 10 m.s⁻¹ (36 km/h), ils ont trouvé un temps de retournement du volant de ≈ 20 ms, tandis que la stabilisation de l'axe de symétrie du volant le long de la direction de sa vitesse se produit typiquement en 150 ms et sur 1 m [8, 22]. La [vidéo 1a](#) montre ce processus de retournement pour différents coups. Par exemple, lorsque la vitesse initiale après impact de la raquette est de ≈ 50 m.s⁻¹ (290 km/h), le temps de retournement est d'environ 5 ms, tandis l'axe du volant se stabilise en ≈ 35 ms et sur ≈ 1 m (une longueur de raquette est d'environ 68 cm).

La [vidéo 1b](#) montre la déformation importante du volant après impacts avec la raquette. Lorsque la vitesse incidente du volant est perpendiculaire à la raquette, la déformation du volant s'apparente à l'éclosion d'une fleur, comme cela a été observé dans d'autres études [23], à une méduse qui nage, ou encore à la vibration de certaines molécules mise en évidence par des techniques pompe-sonde femtoseconde [24-26]. En effet, durant l'impact, une partie de l'énergie cinétique est transférée aux degrés de liberté internes du volant, qui agissent comme des amortisseurs d'énergie. Comme le montrent les chronophotographies de la figure 5a, la déformation du volant correspond à un mode de vibration de type "respiration" qui s'amortit après l'impact, avec une pseudo-période de l'ordre de $\approx 2,16$ ms. Le diamètre total de la jupe formée par les plumes passe de 6,7 cm à 8,6 cm en 1,1 ms, lors de la première oscillation. Cette respiration est amortie en typiquement 4 oscillations (≈ 8 ms). Certaines vidéos montrent que si raquette ne frappe pas le volant perpendiculairement à son axe, la déformation est plus ovale. Cependant, l'angle de vue de la caméra ne permet pas une analyse plus détaillée.

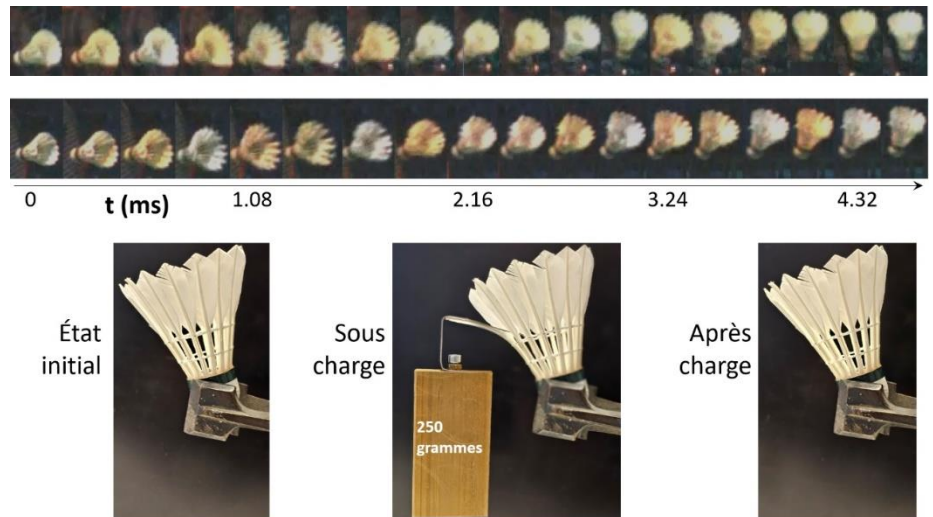


Figure 5. a) Chronophotographies du volant après impacts avec la raquette. La période de respiration est d'environ 2,16 ms. b) Flexion réversible de la plume avec une charge de 250 grammes.

Pour des impacts moins violents, où l'accélération est plus faible, il est plus difficile d'observer la déformation du volant. La respiration du volant est due à l'importante décélération à l'impact, qui plie la plume. Dans la [vidéo 1b](#), les volants passent de vitesses incidentes de l'ordre de 11 m.s^{-1} (40 km/h) à des vitesses après impact de l'ordre de 44 m.s^{-1} (160 km/h) en environ 1.1 ms. Ceci correspond à une accélération phénoménale d'environ 50000 m.s^{-2} , soit 5000 g. Durant l'impact de $\approx 1,1 \text{ ms}$, les 5 grammes du volant sont alors équivalents à un poids de 25 kg. Le poids de la partie flexible de la plume, qui est de l'ordre de 0,05 gramme, correspond de façon transitoire à un poids de 250 grammes. La figure 5b montre que la déformation de la plume subissant une charge statique de 250 grammes est similaire à celle observée lors de l'impact. Dans le régime élastique, ces déformations de la plume sont réversibles après impact ou charge.

2. Slices de droitiers vs slices de gauchers

Les [vidéos 2a](#), [2b](#), [2c](#) et les [vidéos 3a](#) et [3b](#) montrent différents slices exécutés par des joueurs droitiers et gauchers de très haut niveau. Nous avons extrait de l'analyse vidéo l'évolution temporelle de la vitesse de rotation $\omega(t)$ du volant autour de son axe de symétrie. Les slices croisés ont été exécutés comme indiqué dans les figures 3, 6a et 6b, avec des joueurs gauchers dans le coin gauche du court, envoyant le volant en diagonale vers le côté opposé, juste derrière le filet. Nous avons utilisé la situation symétrique miroir avec les joueurs droitiers effectuant les coups slicés depuis le coin droit du court vers le côté opposé derrière le filet. La figure 6c montre l'évolution de la vitesse de rotation du volant $\omega(t)$ obtenue à partir de 3 slices exécutés par des joueurs droitiers (RH1, RH2 et RH3). Le slice permet de générer une rotation très élevée, $\omega > 100 \text{ rps}$, juste après le contact avec la raquette. Le sens de rotation naturel du volant, le sens anti-horaire, est choisie ici comme positif. La figure 6c montre que la vitesse de rotation diminue rapidement, avec une décroissance exponentielle apparente. Après $\approx 300 \text{ ms}$, à l'approche du filet, la vitesse de rotation est de l'ordre de 10-20 rps. Le slice des joueurs gauchers (LH1-3) génère une rotation rapide similaire ($>100 \text{ rps}$) après le contact avec la raquette, mais la principale différence est que le volant tourne dans le sens horaire ($\omega < 0$) ! Lorsque la rotation s'accélère (décélère en absolue), le volant s'arrête de tourner après environ 100 ms, puis commence à tourner dans le sens

anti-horaire, en raison du frottement que l'air sur le volant chirale. Environ 300 ms après impact avec la raquette, le volant tourne à $\approx 15 \text{ rps}$, ce qui est similaire à la rotation observée chez les joueurs droitiers. Comme les données expérimentales montrent une décroissance exponentielle rapide apparente de la vitesse de rotation, suivie d'une décroissance plus linéaire, le modèle empirique suivant est utilisé pour ajuster les courbes :

$$\omega(t) = \omega_i \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \omega_0 - at \quad (1).$$

$\omega_i + \omega_0$ correspond à la vitesse de rotation initiale, juste après impact avec la raquette, et τ à la constante de décélération de la rotation. Elle dépend du volant, de la densité de l'air... La décroissance exponentielle rapide correspond à l'équilibre entre la vitesse de rotation du volant et sa vitesse de propagation dans l'air. La diminution presque linéaire de la vitesse de rotation montrée dans la figure 6c ($\omega_0 - at$) correspond à la diminution naturelle de la vitesse de rotation du volant quand sa vitesse linéaire diminue. Nous avons effectué des ajustements indépendants pour différents slices (RH1-3 et LH1-3) en fixant $\omega_0=23 \text{ rps}$ et $a=34 \text{ rps.s}^{-1}$ et les résultats sont présentés dans le tableau 1.

	RH1	RH2	RH3	<RH>	LF1	LF2	LF3	<LF>
ω_i (rps)	103 (6)	112 (13)	120 (20)	112 (13)	-131 (3)	-121 (5)	-133 (7)	-128 (6)
τ (s^{-1})	33 (3)	32 (6)	32 (8)	32 (6)	55 (6)	80 (7)	49 (2)	61 (10)

Table 1. Paramètres d'ajustement de l'équation (1) pour les différents slices de droitiers (RH1-3) et gauchers (LH1-3).

La rotation initiale moyenne après le contact avec la raquette est similaire pour les droitiers et les gauchers ($\approx 120 \text{ rps}$). Les constantes de temps de décélération sont similaires pour les 3 slices de droitiers ($\approx 32 \text{ (6) ms}$) et globalement plus longues pour les gauchers (61 (10) ms). Ces différentes constantes de temps de décélération de la rotation sont dues à l'aérodynamisme. La figure 6d montre que pour une rotation du volant dans le sens des aiguilles d'une montre, le flux d'air est parallèle aux plumes, alors que pour une rotation dans le sens inverse le flux d'air entre en collision avec les bords des plumes. La friction avec l'air est donc plus importante pour les rotations dans le sens inverse des aiguilles d'une montre induites par les slices de droitiers, ce qui entraîne une décélération angulaire plus rapide que pour les slices de gauchers. Ces changements très rapides de vitesse de

rotation sont visibles dans la [vidéo 4b](#) ralentie 500 fois. Pour mettre en évidence la différence entre les slices de gauchers et droitiers, la symétrie du miroir est utilisée dans la [vidéo 4a](#), qui montre que le volant ralentit davantage sur un slice de gaucher que sur un slice de droitier. Les joueurs et les entraîneurs ont aussi remarqué des sons différents lors des slices effectués par les gauchers et les droitiers.

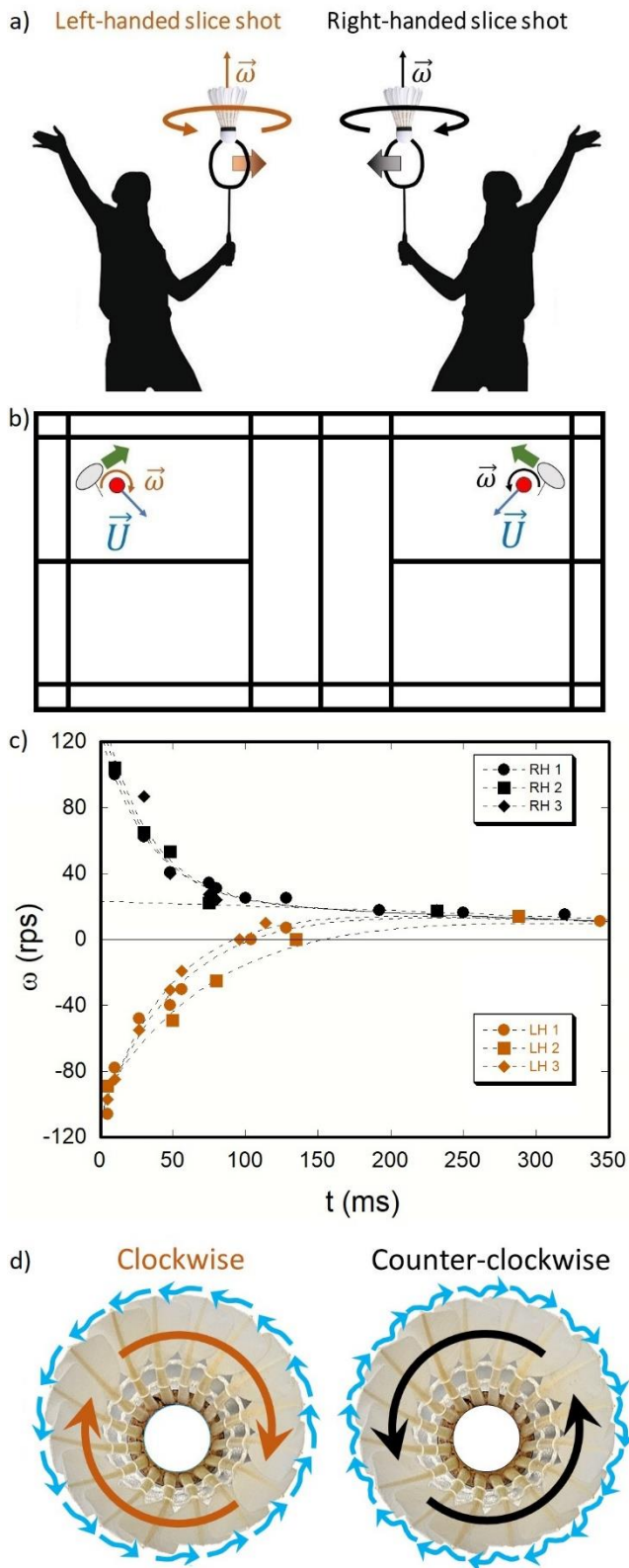


Figure 6. (a,b) Slices exécutés par des joueurs droitiers et gauchers, induisant une rotation opposée du volant après le contact avec la raquette. (c) Vitesse de rotation $\omega(t)$ après les coups slicés pour les joueurs droitiers (RH1-3) et gauchers (LH1-3). (d) Représentation schématique du flux d'air lors des rotations du volant.

Cela est aussi dû à l'orientation des plumes : la raquette frotte le volant presque parallèlement aux plumes pour les slices de droitiers et presque perpendiculairement pour les gauchers. Il se peut donc que ces derniers aient plus de facilité à faire tourner le volant, mais ce processus est trop rapide pour être étudié avec le dispositif vidéo actuel. Le slice exécuté par les gauchers et les droitiers génère une vitesse de rotation initiale du volant très élevée (≈ 100 rps), ce qui rend ce coup très différent d'un smash. Nous pouvons voir dans la vidéo 1 que, si la raquette frappe le volant perpendiculairement à la trajectoire, le smash lui-même ne génère pas de rotation rapide après l'impact avec la raquette. La rotation est induite par la friction de l'air sur les plumes, et le volant atteint typiquement ≈ 60 rps en 50 ms ([vidéo 1a](#)).

La vitesse de rotation élevée du volant génère une force centrifuge importante. La [vidéo 5a](#) montre la déformation induite par une rotation rapide perpendiculaire à la vitesse. Le coefficient de traînée d'un volant standard en rotation peut augmenter en raison de l'importance de la force centrifuge [27]. Obayashi et al ont étudié l'effet de la rotation d'un volant sur la déformation de sa jupe [5]. Ils ont montré que l'élargissement de la jupe dû aux forces centrifuges est compensé par l'effet de la traînée aérodynamique, lorsque le volant se déplace dans l'alignement de son axe de rotation. On peut voir sur les différentes vidéos qu'il n'y a pas de changement de forme significatif lorsque l'axe de rotation du volant est aligné sur la vitesse. Cependant, les plumes du volant se déforment clairement lorsque l'axe de rotation est perpendiculaire à la vitesse, car la traînée aérodynamique ne compense pas la déformation induite par la force centrifuge. La figure 7 et la [vidéo 5b](#) montrent la déformation du volant, monté sur un outil rotatif Dremel, en fonction de la vitesse de rotation. Cette déformation est caractérisée par la déviation d du rayon $R(\omega)$ de la jupe, mesurée pour une vitesse de rotation ω , par rapport au rayon au repos R_0 : $d = R(\omega) - R_0$.

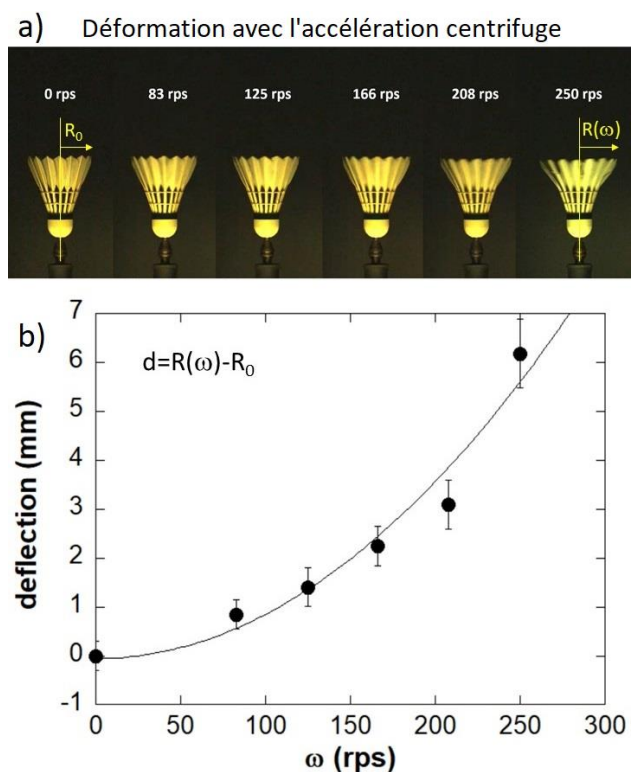


Figure 7. (a) Déformation du volant en fonction de la vitesse de rotation ω . (b) La déviation du rayon d varie en ω^2 , comme le montre la courbe en trait continu.

Cette déviation est due à la force centrifuge élevée, liée à l'accélération centrifuge a_c qui agit sur les plumes. Avec la relation $a_c=R\omega^2$, et pour $\omega=785 \text{ rad.s}^{-1}$ (125 rps) et $R=0.0335 \text{ m}$, la force centrifuge aux extrémités des plumes correspond à une accélération de 20643 m.s^{-2} , soit environ 2000 g. Même si la masse de la plume est faible, la force g très élevée agissant sur la plume est capable de la courber. Si l'on considère que la densité de la plume est homogène sur toute sa longueur, la déflexion est alors simplement proportionnelle à la force g, elle-même proportionnelle à ω^2 . L'ajustement de la figure 7, en considérant $d \propto \omega^2$ est en assez bon accord avec les données expérimentales, compte tenu de l'approximation grossière qui considère la plume comme homogène. La déformation du volant observée sur la [vidéo 5a](#) juste après un slice est similaire à celle observée autour de 125 rps sur la figure 7. Ceci confirme que l'expansion de la jupe du volant est due à la vitesse de rotation élevée du volant après le slice.

La rotation du volant dans le sens horaire induite par le slice du gaucher est donc très différente de celle induite en sens opposé par un slice de droitier, comme le laissent supposer les considérations de symétrie présentées ci-dessus, et comme le montrent clairement les vidéos en slow motion. Pour les droitiers, la rotation plus rapide peut accélérer le volant, qui subit ensuite une diminution continue de sa vitesse de rotation due aux forces de frottement dans l'air. Pour les gauchers, au contraire, la rotation initiale dans le sens horaire doit contribuer à ralentir d'avantage le volant. De plus, on observe clairement à l'approche du filet qu'avec la décélération le volant s'arrête de tourner, de façon transitoire, lors de son vol avant de reprendre sa rotation naturelle dans le sens anti-horaire. Une différence importante entre slice de gaucher et slice de droitier est donc que durant l'intervalle de temps de 100 à 300 ms (Figure 6), l'énergie de rotation augmente pour les gauchers, alors qu'elle diminue de façon monotone pour les droitiers. Cela démontre clairement un transfert d'énergie important, de l'énergie cinétique vers l'énergie de rotation dans la plage de 100 à 300 ms. Ceci contribue à ralentir d'avantage le volant pour les gauchers ([vidéo 4a](#)). Nous verrons plus tard comment ce processus affecte les trajectoires, car le lecteur aura peut-être remarqué un phénomène étrange sur les vidéos.

3. Effet Magnus après un slice

Les [vidéos 2a, 2b, 2c](#) et les [vidéos 3a et 3b](#) montrent que, pour certains slices, après le contact avec la raquette, l'axe du volant n'est plus orienté selon sa vitesse initiale \vec{U} , mais il lui est presque perpendiculairement (Figure 8a). Le volant est orienté vers le joueur, mais sa vitesse initiale vers le filet est associée à des forces de traînée (Figure 4) responsables d'un couple qui va stabiliser le volant en alignant son axe sur sa vitesse. Les [vidéos 2a, 2b, 2c](#) et la figure 8a montrent clairement qu'en plus de basculer vers son orientation stable, le volant se soulève au début du vol. Ce phénomène est dû à l'effet Magnus [13]. Lorsque le volant tourne perpendiculairement à sa vitesse pendant qu'il vole, l'air l'environnant tourne aussi. Par conséquent, la vitesse de l'air augmente d'un côté du volant et diminue de l'autre. Le théorème de Bernoulli indique qu'une augmentation de la

vitesse du fluide entraîne une diminution de la pression, ce qui se traduit par une force transverse, la force de Magnus (\vec{F}_M), agissant sur le volant. La force de Magnus est donnée par $\vec{F}_M \propto \rho V \vec{\omega} \wedge \vec{U}$, où ρ est la densité de l'air et V le volume du volant. Nous avons mentionné plus haut que l'effet Magnus est généralement négligé en badminton, car l'axe de rotation est généralement colinéaire à la vitesse. Cependant, les vidéos révèlent clairement qu'après les slices, l'axe de rotation du volant peut être quasiment perpendiculaire à la vitesse pendant les 30 premières ms. Cette orientation maximise la force de Magnus à un moment où la vitesse de rotation $\vec{\omega}$ est également très élevée (supérieur à 50 tours par minute, figure 6c). La règle de la main droite est très utile pour expliquer l'effet Magnus induit par un droitier (figure 8a) : l'index droit pointe dans la direction de la rotation ($\vec{\omega}$), le majeur pointe dans la direction de la vitesse (\vec{U}) et le pouce indique alors la direction de la force de Magnus (\vec{F}_M). La force de Magnus soulève alors le volant et cet effet s'arrête après $\approx 30 \text{ ms}$, lorsque le volant stabilise son axe de rotation $\vec{\omega}$ colinéaire à sa vitesse \vec{U} . Il est donc nécessaire d'utiliser des caméras très rapides pour observer ce très bref effet Magnus, les rapides rotation et la désorientation initiales du volant responsables de ce phénomène.

Si l'on observe la trajectoire du volant après un slice de gaucher ([vidéos 3a et 3b](#) et figure 8b), on constate qu'il se soulève également. En effet, le gaucher fait tourner le volant dans une direction opposée à celles du droitier, mais la vitesse initiale change également de direction (figure 6b). Le produit vectoriel donne donc une force de Magnus qui soulève également le volant. Pour les lecteurs gauchers, en plus de la règle de la main droite mentionnée ci-dessus, il est suggéré d'utiliser pour ce cas spécifique la règle de la main gauche (figure 8b) pour comprendre la direction de la force de Magnus : l'index gauche pointe dans la direction de la vitesse (\vec{U}), le majeur suivant le sens de la rotation ($\vec{\omega}$) et le pouce pointe vers la force Magnus (\vec{F}_M), qui soulève donc également le volant. Les trajectoires liées au soulèvement des volant durant l'effet Magnus sont similaires pour les droitiers et les gauchers. Ceci est dû au fait que pendant les deux types de slices, les vitesses de rotation initiales sont similaires ($\approx 120 \text{ rps}$) pour les gauchers et les droitiers. Lorsque le joueur donne une composante transverse importante à la vitesse initiale du volant (avec la raquette inclinée ou avec le mouvement du bras), l'axe de rotation $\vec{\omega}$ du volant tourne et se retrouve perpendiculaire à sa vitesse \vec{U} . Ceci maximise la force de Magnus qui soulève le volant. Lorsque cette composante transversale est réduite, l'amplitude de l'effet Magnus diminue. Lorsque l'axe de rotation du volant est perpendiculaire à sa vitesse, plus la rotation et les vitesses initiales sont élevées, plus l'effet Magnus est important, ce qui peut donc modifier de manière significative les trajectoires pour les gauchers et les droitiers. L'effet Magnus observé dans les [vidéos 2a, 2b, 2c](#) et les [vidéos 3a et 3b](#) soulève en effet le volant de 20 à 70 cm, et nous observons un effet Magnus plus faible pour les slices des gauchers. Une fois encore, cela est dû à l'implantation des plumes dans le volant (figure 6d), qui génère une plus grande friction avec l'air lorsque le volant tourne dans le sens anti-horaire sur les slices de droitiers que lorsqu'il tourne dans le sens horaire sur les slices de gauchers.

Figure 8. Force de Magnus $\vec{F}_M \propto \vec{\omega} \wedge \vec{U}$ soulevant le volant après des slices exécutés par un droitier (a) ou un gaucher (b). L'effet Magnus se produit au début de la trajectoire, lorsque l'axe de rotation $\vec{\omega}$ du volant, tournant dans le sens anti-horaire (droitiers) ou dans le sens horaire (gauchers), est perpendiculaire à sa vitesse \vec{U} . L'effet Magnus s'arrête lorsque l'axe de rotation devient colinéaire à la vitesse, en raison du couple exercé par les forces de traînée F_D .

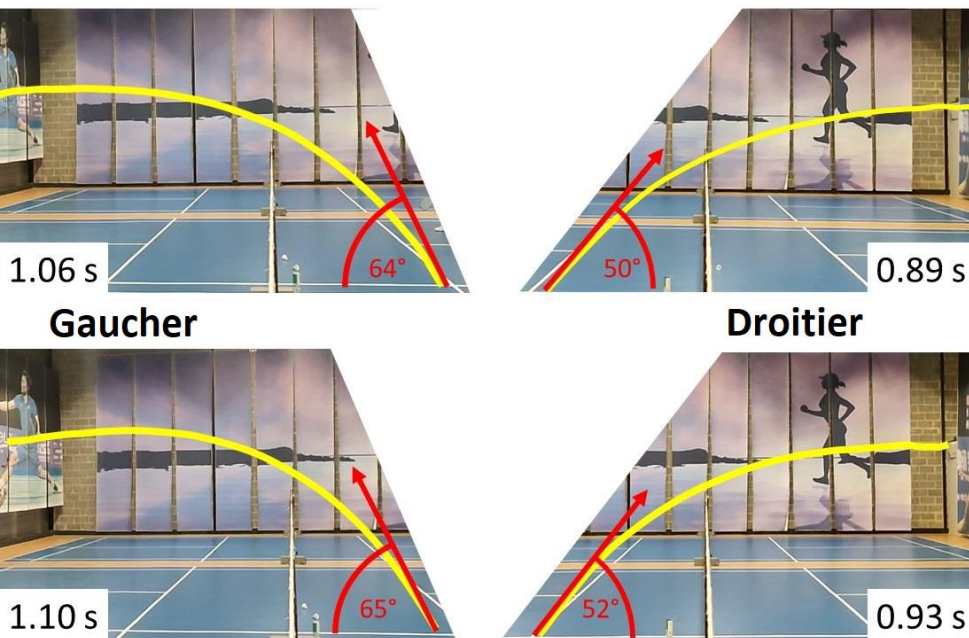
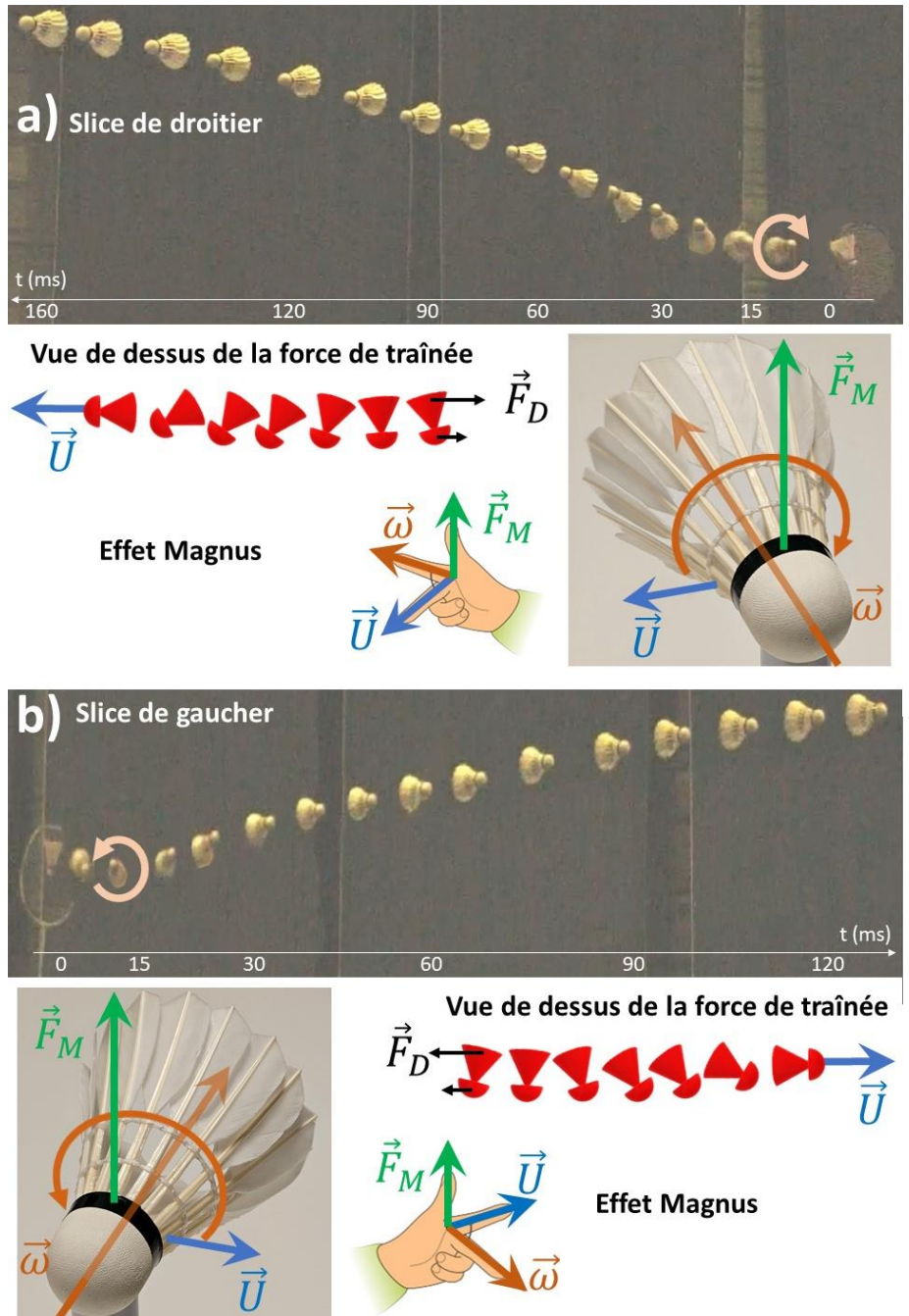


Figure 9. Trajectoires typiques de slices (jaune) exécutés par des gauchers (gauche) et des droitiers (droite). Le temps de vol est plus long pour les gauchers et cette trajectoire plus lente se traduit par un angle de chute (rouge) plus élevé pour les gauchers que pour les droitiers (ici $\approx 65^\circ$ vs $\approx 51^\circ$).

4. Trajectoires des volants après un slice

La [vidéo 6](#) et la figure 9 montrent les trajectoires des volants pour des slices exécutés par des gauchers et des droitiers. Pour ces slices traversant le court sur des distances similaires, le temps de vol est plus long d'environ 15 % pour les slices des gauchers (0,91(4) s) que des droitiers (1,08(4) s). Ceci est dû à la vitesse horizontale moyenne plus faible pour les gauchers car le volant est ralenti par sa rotation initiale en sens horaire ([vidéo 4a](#)). Lorsque le volant atteint le filet, la vitesse horizontale plus faible se traduit par une trajectoire plus verticale. De nombreux paramètres peuvent affecter l'angle de chute du volant, tels que la taille du joueur, la hauteur des sauts, les composantes de la vitesse horizontale/verticale initiale, etc. Mais sur la [vidéo 6](#) ces paramètres sont similaires et l'angle de chute est plus élevé pour le gaucher ($\approx 65^\circ$) que pour le droitier ($\approx 50^\circ$). Par conséquent, le volant tombera plus près du filet pour un slice effectué par un gaucher. Des études aérodynamiques ont révélé une petite variation de la force de traînée avec ou sans rotation, ce qui peut expliquer la trajectoire plus lente sur les slices de gauchers. Cependant, dans le cas d'une rotation opposée à la rotation naturelle, la force de traînée et l'aérodynamisme peuvent changer significativement. En outre, et comme mentionné ci-dessus, sur un slice de gaucher le volant tourne en sens inverse, s'arrête, puis tourne dans le sens naturel. L'énergie cinétique (et donc la vitesse) est alors réduite, car une partie de cette énergie est convertie en énergie de rotation. Ces deux phénomènes contribuent qualitativement à ralentir le volant davantage sur un slice de gaucher.

Conclusion

Les vidéos en super slow-motion fournissent des informations clés sur les dynamiques ultrarapides, intrinsèques à la physique du badminton, induites par les contraintes extrêmes appliquées au volant. Pour les fabricants, c'est un véritable défi que de proposer des volants en plumes capables de supporter de tels impacts et rotations. En effet, il y a souvent un moment dans le jeu où les joueurs doivent effectuer des smashes ou des slices stratégiques. Les vidéos ont révélé des dynamiques de rotation très différentes après des slices exécutés par des gauchers et des droitiers. Une comparaison quantitative entre gauchers et droitiers est difficile car ces slices sont de nature différente en raison de la symétrie du volant. D'une part, les droitiers frottent le volant presque parallèlement aux plumes, tandis que les gauchers le frottent presque perpendiculairement. D'autre part, les rotations inverses induites par les droitiers et les gauchers génèrent intrinsèquement des trajectoires différentes du volant, plus tombantes sur les slices de gauchers. Bien que l'on ne sache pas dans quelle mesure ceci confère un avantage aux gauchers, il s'agit bien d'un avantage car le droitier doit avancer davantage pour jouer le volant après un slice de gaucher et il doit lui redonner plus d'énergie. Ceci est partiellement compensé par la possibilité d'effectuer des reverse slices, alors plus avantageux pour les droitiers, mais les contraintes articulaires modifient le plan de frappe ainsi que la vitesse et donc le comportement du volant. Un slice est efficace lorsqu'il frôle le filet. Les résultats présentés ici montrent donc l'importance d'équilibrer le transfert de

vitesse et de rotation au volant et l'effet Magnus. Un effet Magnus trop important soulève le volant plus que nécessaire et réduit ainsi l'efficacité du slice, aussi bien pour les droitiers que pour les gauchers.

Matériel supplémentaire

Les vidéos sont disponibles sur [une chaîne YouTube](#). Cliquez sur les liens hypertextes ci-dessous :

Video 1a & 1b: Retournement du volant et respiration.

<https://youtu.be/MxU08IsCOJs>

&

https://youtu.be/uo_bSmp8LRI

Video 2a, 2b & 2c: slices de droitiers

<https://youtu.be/9Rwyw9OSROW>,

<https://youtu.be/UgeZOBo--5M>

&

<https://youtu.be/uxcP8iKRBVc>

Video 3a & 3b: slices de gauchers

<https://youtu.be/PivDQ0f4h5k>

&

<https://youtu.be/edMxKmq-E4M>

Video 4a & 4b: évolution temporelle de la vitesse de rotation

<https://youtu.be/j-fQIZEmrMc>

& [https://youtu.be/9KGO-](https://youtu.be/9KGO-MBja6s)

[MBja6s](https://youtu.be/9KGO-MBja6s)

Video 5 a et 5b: force centrifuge sur le volant

<https://youtu.be/jNNvOnucV0Q1001>

&

<https://youtu.be/ysxnumuBaSI>

Video 6: trajectoires des volants

<https://youtu.be/5HjanVzeczE>

Les vidéos sont disponibles sur Zenodo avec le doi : [10.5281/zenodo.10469558](https://doi.org/10.5281/zenodo.10469558)

Remerciements

Eric Collet remercie les joueurs qui ont participé à cette étude pour leur soutien et leur patience (Faustine Noël, Loris Dufay, Carla Dubois, Grégoire Bodin, Herveline Crespel, Nicolas Latimier, Romane Cloteaux-Foucault et Mattéo Justel), les entraîneurs pour leurs commentaires intéressants (Marine Dureault, Jérémy Bloutin, Pierre Chagnot, Erwin Kehlhoffner et Régis Bridel) ainsi que le club Flume Ille Badminton et la Plus2Bad Arena pour leur aide lors du tournage de la vidéo. L'auteur souhaite également remercier Anaïs Gauthier, Isabelle Cantat, Patrick Houizot et Jean-François Le Guennan pour leur soutien technique lors de l'utilisation de la caméra rapide. Eric Collet souhaite également remercier tout particulièrement Michael Phomsoupha, le relecteur de l'article, avec qui il a pu échanger et réviser son article, ainsi que Gillian Clark et Steen Pedersen pour des discussions fructueuses.

Financement

Ce travail a été soutenu par l'Institut Universitaire de France et l'Agence Nationale de la Recherche, ANR-19-CE30-0004 ELECTROPHONE.

Références

- [1] M. Phomsoupha, G. Laffaye, The science of badminton: game characteristics, anthropometry, physiology, visual fitness and biomechanics, *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 45 (2015) 473-495.
- [2] A.E. Flatt, Is being left-handed a handicap? The short and useless answer is "yes and no.", *Proc (Bayl Univ Med Cent)*, 21 (2008) 304-307.
- [3] IUCr, *International Tables for Crystallography, Volume A: Space Group Symmetry*, 5. revised edition ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 2002.
- [4] J.E. Morgan, *The design and development of a shuttlecock hitting machine for training badminton players at all levels of the game.*, CRC Press, London, 1996.
- [5] S. Kitta, H. Hasegawa, M. Murakami, S. Obayashi, Aerodynamic properties of a shuttlecock with spin at high Reynolds number, *Procedia Engineering*, 13 (2011) 271-277.
- [6] C.M. Chan, J.S. Rossmann, Badminton shuttlecock aerodynamics: synthesizing experiment and theory, *Sports Engineering*, 15 (2012) 61-71.
- [7] A. Verma, A. Desai, S. Mittal, Aerodynamics of badminton shuttlecocks, *Journal of Fluids and Structures*, 41 (2013) 89-98.
- [8] C. Cohen, B.D. Texier, D. Quéré, C. Clanet, The physics of badminton, *New Journal of Physics*, 17 (2015) 063001.
- [9] R.C. Mehta, Aerodynamics of Sport Balls, Badminton Shuttlecock and Javelin, *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 11 (2023) 4-10.
- [10] L.M. Chen, Y.-J. Pan Yh Fau - Chen, Y.J. Chen, A Study of Shuttlecock's Trajectory in Badminton.
- [11] B.D. Texier, C. Cohen, D. Quéré, C. Claneta, Shuttlecock dynamics, *Procedia Engineering*, 34 (2012) 176-181.
- [12] J.E. Goff, A review of recent research into aerodynamics of sport projectiles, *Sports Engineering*, 16 (2013) 137-154.
- [13] G. Magnus, Ueber die Abweichung der Geschosse, und: Ueber eine auffallende Erscheinung bei rotirenden Körpern, *Ann Phys-Berlin*, 164 (1853) 1-29.
- [14] M.A. González Hernández, Aerodynamics performances in sports, 34 International Conference of Biomechanics in Sport (2016).
- [15] B.D. Texier, C. Cohen, D. Quéré, C. Clanet, Physics of knuckleballs, *New Journal of Physics*, 18 (2016) 073027.
- [16] A.J. Cooke, Shuttlecock aerodynamics, *Sports Engineering*, 2 (1999) 85-96.
- [17] J. Nicholas, C. Eun Jung, 2D aerodynamic analysis of a badminton shuttle for re-entry vehicle applications, *Proc.SPIE*, 2020, pp. 1137615.
- [18] C. Cohen, B. Darbois Texier, D. Quéré, C. Clanet, Physics of badminton shuttlecocks. Part 1 : aerodynamics, 2011, pp. M10.008,
- [19] M. Phomsoupha, G. Laffaye, Shuttlecock velocity during a smash stroke in badminton evolves linearly with skill level, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 17 (2014) 140-141.
- [20] M. Hubbard, *Spin dynamics of the badminton shuttlecock*, 1997,
- [21] A. Cooke, Computer simulation of shuttlecock trajectories, *Sports Engineering*, 5 (2002) 93-105.
- [22] V. Kaushik, Unique Flight Features of Shuttlecock, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4 (2017) 2395.
- [23] C.S.H. Lin, C.K. Chua, J.H. Yeo, Turnover Stability of Shuttlecocks - Transient Angular Response and Impact Deformation of Feather and Synthetic Shuttlecocks, *Procedia Engineering*, 60 (2013) 106-111.
- [24] H.T. Lemke, K.S. Kjær, R. Hartsock, T. Brandt van Driel, M. Chollet, J.M. Glownia, S. Song, D. Zhu, E. Pace, S.F. Matar, M.N. Nielsen, M. Benfatto, K.J. Gaffney, E. Collet, M. Cammarata, Coherent structural trapping through wave packet dispersion during photoinduced spin state switching, *Nat. Commun.*, 8 (2017) 15342.
- [25] S. Zerdane, L. Wilbraham, M. Cammarata, O. Iasco, E. Rivière, M.L. Boillot, I. Ciofini, E. Collet, Comparison of structural dynamics and coherence of d-d and MLCT light-induced spin state trapping, *Chem. Sci.*, 8 (2017) 4978-4986.
- [26] M. Cammarata, R. Bertoni, M. Lorenc, H. Cailleau, S. Di Matteo, C. Mauriac, S.F. Matar, H. Lemke, M. Chollet, S. Ravy, C. Lulhe, J.F. Létard, E. Collet, Sequential Activation of Molecular Breathing and Bending during Spin-Crossover Photoswitching Revealed by Femtosecond Optical and X-Ray Absorption Spectroscopy, *Physical Review Letters*, 113 (2014) 227402.
- [27] H. Hasegawa, S. Kitta, M. Murakami, S. Obayashi, Flow analysis and aerodynamic characteristics of a badminton shuttlecock with spin at high Reynolds numbers, *Sports Engineering*, 16 (2013) 91-98.