



Available online at <https://www.asjp.cerist.dz/en/PresentationRevue/548>

Journal of Physical Activity and Sport, Society, Education and Health

مجلة النشاط البدني الرياضي المجتمع التربوية و الصحة.

Volume 02 Issue 01 Year 2019

ISSN: 2602-747X



Etude aérodynamique du ballon de football ; L'analyse de la trajectoire du tir du coup franc direct.

BESSENOUCI Hadj Ahmed Islem¹, SBA Bouabdellah²

^{1,2}Laboratoire APS, Société, Education et Santé, Institut d'Education Physique et Sportive, Université Hassiba Benbouali Chlef, Algérie.

E-mail : i.bessenouci@univ-chlef.dz / bessenouci.islem@gmail.com

ARTICLE INFO

Reçu le : 22/01/2019
Accepté le : 09/02/2019
Publié le : 19/03/2019

Mots-Clés :

Aérodynamique
Ballon
Coup franc direct.

RESUME

L'aérodynamique est une branche de la dynamique des fluides qui porte principalement sur la compréhension et l'analyse des écoulements d'air, dans le domaine sportif étudier ce phénomène physique mène à la compréhension des facteurs influents sur la performance athlétique, dans le football en particulier cet aspect est primordiale, ce qui nous a mené à examiner les forces appliquées sur le ballon durant son envol ; le poids, la force de traînée, et la portance (effet Magnus), en mettant le point sur l'origine physique et la forme des différentes trajectoires du ballon lors de l'exécution du coup franc dans le football, en l'absence de gravité et d'air celle-ci est une droite. Avec la gravité, la droite s'incurve vers la parabole galiléenne. L'aérodynamique enrichit ces deux comportements classiques et fait apparaître des zigzags, des paraboles tronquées et des spirales. Cela pour apporter aux entraîneurs et aux joueurs des indices biomécaniques afin d'optimiser la réussite du tir du coup franc direct dans le football.

دراسة أيروديناميكية لكرة كرة القدم؛ تحليل مسار الركلة حرة مباشرة.

بسنوسي الحاج أحمد اسلام¹، سبع بوعبدالله²

1،2 مخبر النشاط البدني والرياضي، المجتمع، التربية والصحة

جامعة حسيبة بن بوعلي بالشلف، الجزائر.

i.bessenouci@univ-chlef.dz / bessenouci.islem@gmail.com

الملخص

معلومات متعلقة بالمقال:

تاريخ الاستلام: 2019/01/22

تاريخ القبول: 2019/02/09

تاريخ النشر: 2019/03/19

الكلمات المفتاحية:

الديناميكا الهوائية

الكرة

ركلة حرة مباشرة.

الديناميكا الهوائية (أيروديناميكية) هو فرع من ديناميكات السوائل التي تركز على فهم وتحليل تدفق الهواء، في مجال الرياضة دراسة هذه الظاهرة الفيزيائية يؤدي إلى فهم العوامل التي تؤثر على الأداء الرياضي، في كرة القدم على وجه الخصوص هذا الجانب مهم، الأمر الذي أدى بنا إلى دراسة القوى المطبقة على الكرة أثناء طيرانها؛ الوزن، قوة السحب، والرفع (تأثير ماغنوس)، مع التركيز على الأصل المادي وشكل المسار المختلفة للكرة أثناء تنفيذ ركلة حرة في كرة القدم، في غياب الجاذبية والهواء يكون في خط مستقيم، مع الجاذبية يكون مسار الكرة على شكل المنحنيات. وهذا لتوفير للمدربين واللاعبين أدلة بيوميكانكية لتطوير مهارة م الركلة الحرة المباشرة في كرة القدم.

1-Introduction:

Les sports de balles en générale et le football en particulier sont le sujet de diverses études aérodynamiques (Carré & Asai, 2004; Goff, 2013; Hong & Asai, 2017; Hong, Chung, Nakayama, & Asai, 2010a; Kothmann, 2007; Mehta, 1985; Oggiano & Sætran, 2010; Sakashita, 2007), afin de comprendre ce phénomène de la mécanique des fluides et son effet sur le ballon de football, nous allons, à travers une étude de littérature, percer les secrets des grands tireurs du coup franc direct, qui par leur talents athlétiques, impriment des trajectoires phénoménales au ballon (Dupeux et al., 2012).

1. Les forces Appliquées sur le ballon :

Deux forces déterminent la trajectoire du ballon : son poids FG et la force aérodynamique FA . Dans cette dernière, il est d'usage de distinguer deux composantes : l'une alignée avec la vitesse (traînée FD) et l'autre perpendiculaire (portance FL). Nous suivons cet usage qui permet, comme nous le verrons, d'isoler l'effet de la rotation du ballon. Ainsi, l'équation générale de la trajectoire devient :

$$M \frac{dU}{dt} = FG + FD + FL \quad (1).$$

Dans cette équation, M est la masse du ballon et U la vitesse de son centre d'inertie.

L'origine physique et l'expression des forces FD et FL sont détaillées plus bas.

Nous allons analyser l'équation (1) en identifiant différents régimes caractérisés, chacun par une trajectoire particulière.

Pour cela nous mesurons l'importance relative des forces avec deux nombres sans dimension :

$$Dr = FD/FG \text{ et } Sp = FL/FD.$$

Nous utilisons ces deux nombres pour définir les différentes trajectoires. Lorsque la gravité domine ($Dr < 1$), on observe des trajectoires paraboliques. À l'inverse ($Dr > 1$) et en l'absence de rotation ($Sp < 1$), les trajectoires sont rectilignes ou en zigzag. Enfin, lorsque l'aérodynamique domine et que le ballon tourne ($Dr > 1, Sp > 1$), les trajectoires se courbent, comme dans les fameux coups francs de Michel Platini, et se rapprochent d'une spirale, comme dans celui de Roberto Carlos.

On peut voir sur la figure 01 les trois forces qui agissent sur un ballon de football en vol. Les forces sont représentées en bleu et comprennent le poids, la traînée, et l'effet de Magnus. Portance et la traînée sont en fait deux éléments d'une force aérodynamique agissant sur le ballon. Dans la figure, la balle se déplace de la partie supérieure droite de la partie inférieure gauche (en perspective) comme indiqué par la flèche rouge. L'action de glisser dans une direction opposée au mouvement, tandis que les actions élévatrices sont perpendiculaires au mouvement. Examinons chacune de ces forces séparément (Dupeux et al., 2012).

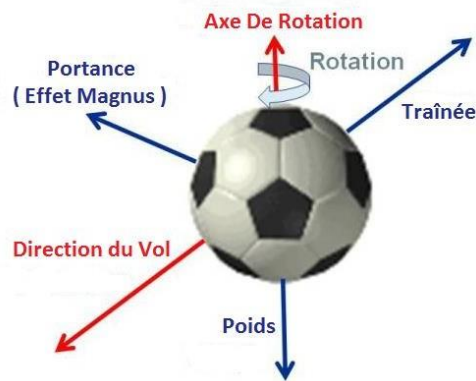


Fig. 1 Représente les forces appliquées sur le ballon lors de son envol.

1.1. Poids :

Le poids FG est une force qui est toujours dirigée vers le centre de la terre. D'une manière générale, l'importance du poids dépend de la masse d'un objet, tel que déterminé par la loi de Newton de la gravitation :

$$FG = m \cdot g^{\vec{}}$$

Où \vec{g} est l'accélération de la pesanteur ($g = \|\vec{g}\|$ est en $m \cdot s^{-2}$, qui est l'unité de l'accélération).

Un ballon de football est creux et gonflé avec de l'air à haute pression, de sorte que le poids est réparti autour de la balle. Mais on peut souvent penser au poids collecté et agissant par l'intermédiaire d'un seul point appelé le centre de gravité. Le centre de gravité est la position moyenne du poids d'un objet. Au premier ordre, le centre de gravité pour un ballon de football est situé exactement au centre de la balle. En vol le ballon tourne autour du centre de gravité. Les lois du mouvement de Newton décrivent la translation du centre de gravité.

1.2. Les forces aérodynamiques :

1.2.1. Origine physique de la traînée :

Lorsque le ballon se déplace à la vitesse U dans l'air, la forme de l'écoulement n'est pas symétrique entre l'avant et l'arrière. Plus précisément, on voit des tourbillons derrière le ballon mais pas devant (figure 2). Ainsi, l'air qui est initialement au repos se retrouve en mouvement après le passage du ballon. Il est accéléré et cette accélération est à l'origine de la force de traînée.

De façon plus précise, on peut estimer cette force en considérant la mise en mouvement de l'air chassé par le ballon lorsqu'il se déplace d'un diamètre $2R$. La masse d'air déplacée lors de ce mouvement est contenue dans le cercle en pointillés figure 2. Cette masse m , de l'ordre de ρR^3 (ou ρ est la masse volumique de l'air), passe d'une vitesse nulle à $U(\Delta U \parallel \sim U)$ sur un temps $\Delta t \sim R/U$. La variation de quantité de mouvement par unité de temps, $m\Delta U/\Delta t$, conduit

à l'expression de la force de trainée $F_D \sim \rho R^2 U^2$.

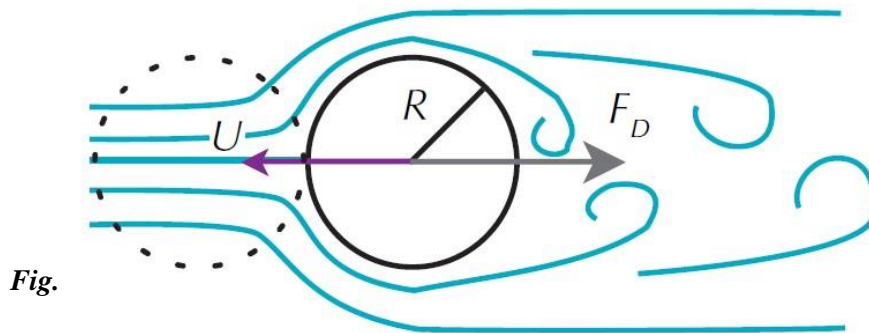


Fig.

1.2.2. Origine physique de la portance (Effet Magnus) :

Les grands tireurs du coup franc impriment au ballon des trajectoires très particulières, le ballon semble partir droit mais dévie d'un coup de sa trajectoire pour revenir vers le but.

Il existe un phénomène physique derrière ces frappes dites bananes, lors de la frappe le joueur ne touche pas le ballon en plein centre mais d'une manière décalée du centre de gravité, alors il imprime au ballon une rotation sur lui-même.

Initialement la vitesse du ballon est élevée, ce qui fait que l'air qui circule autour de lui forme ce qu'on appelle un écoulement turbulent, dans ces conditions le ballon rencontre peu de résistance et sa trajectoire est pratiquement rectiligne, en ralentissant l'écoulement de l'air se calme et glisse autour du ballon, il devient laminaire, le ballon est alors fortement ralenti.

Ensuite intervient l'effet Magnus, la rotation du ballon accélère le flux d'air d'un côté et le ralentit de l'autre, or d'après les lois de la mécanique des fluides « *plus un flux circule vite moins la pression est élevée* », il en résulte une surpression d'un côté et une dépression de l'autre, le ballon est logiquement aspiré du côté de la dépression, il dévie donc de sa trajectoire initiale (Dupeux et al., 2012).

Donc, lorsque le ballon tourne avec la vitesse angulaire ω , les tourbillons qui sont émis n'ont plus la même intensité : celui qui est entraîné par la rotation tourne plus vite, tandis que l'autre est ralenti (figure 03). Cet effet implique que l'air est plus accéléré d'un côté que de l'autre, ce qui fait apparaître une force perpendiculaire à l'écoulement, dite « *force de Magnus* ». Pour trouver son expression, on raisonne comme précédemment en considérant cette fois la variation de vitesse dans la direction perpendiculaire à l'écoulement :

$$\Delta U_{\perp} \sim R\omega, \text{ d'ou } FL \sim m\Delta U_{\perp}/\Delta t \sim \rho R^3 \omega U.$$

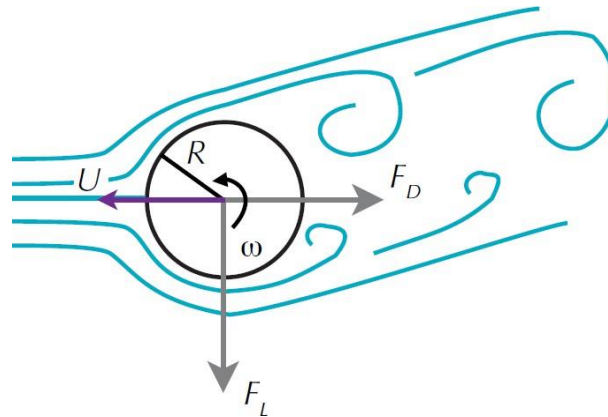


Fig. 3 Écoulement de l'air autour d'un ballon se déplaçant à une vitesse U , avec rotation.

2. Les trajectoires du ballon :

2.1. Lignes droites et zigzags :

On s'intéresse ici aux grosses frappes sans rotation, où $Dr > 1$ et $Sp < 1$. Dans cette seule limite la force de traînée $F_D \sim -\rho R^2 U^2$ influence la trajectoire du ballon. Ici, $\rho \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$ est la masse volumique de l'air, tandis que ; $R = 0,11 \text{ m}$ est le rayon du ballon et U sa vitesse. Cette force aérodynamique devient supérieure au poids au-delà de la vitesse critique $U^* \approx 20 \text{ m/s}$.

Tableau 1 : Indique des vitesses enregistrées en match lors de grosses frappes (Dupeux et al., 2012).

Ces vitesses sont supérieures à 38 m.s^{-1} , ce qui correspond bien au domaine

Joueur	U_0 (m/s)	Match
David Hirst	51	Sheffield / Arsenal (16/09/96)
David Beckham	44	Manchester Utd / Chelsea (22/02/97)
David Trézéguet	43	Monaco / Manchester Utd (19/03/98)
Richie Humphreys	42.8	Sheffield / Aston Villa (17/08/96)
Matt Le Tissier	39	Southampton / Newcastle (18/01/97)
Alan Shearer	38.3	Newcastle / Leicester (02/02/97)
Roberto Carlos	38.1	Brésil / France (03/06/97)

aérodynamique. F_D étant alignée avec la vitesse, on déduit de l'équation (1) que la trajectoire est une droite. De façon plus précise, cette équation s'intègre et l'on montre que la vitesse décroît exponentiellement avec l'abscisse curviligne (s) suivant la loi : $U(s) = U_0 \exp(-s/\mathcal{E})$, \mathcal{E} étant la longueur caractéristique de freinage :

$$\mathcal{E} \approx 7 (\rho s / \rho) R \quad (2).$$

Dans l'équation (2), $\rho s = 81 \text{ kg.m}^{-3}$ est la masse volumique du ballon et le facteur 7 est

la valeur donnée par le calcul pour nos gammes de vitesses et de tailles. La longueur ℓ est ainsi de l'ordre de 50 m pour le football.

Tant que $U(s) > U^*$ (typiquement jusqu'à $s \sim \ell$), les grosses frappes sont donc sensées suivre des lignes droites.

On présente sur la figure 4 des trajectoires de ballon observées par (Hong et al., 2010a). Pour $U_0 \approx 28$ m/s : l'écoulement d'air autour du ballon est visualisé en recouvrant la balle d'une poudre de tétrachlorure de titane.

Dans ces clichés, les petites bouffées révèlent la structure tourbillonnaire complexe à l'aval du ballon et montrent que la trajectoire reste effectivement une quasi ligne droite (a), mais qu'elle peut parfois zigzaguer autour de cette droite (b). On observe aussi sur la (fig. 4) que la taille du zigzag est grande comparée à la distance qui sépare deux vortex. Cette séparation d'échelles indique que l'origine du zigzag (aussi observé au volley et au baseball) n'est pas un simple couplage entre le ballon et les tourbillons émis dans son sillage. Son origine physique est encore débattue, mais il semble que la transition turbulente de la couche limite joue un rôle essentiel (Armenti, 1992).

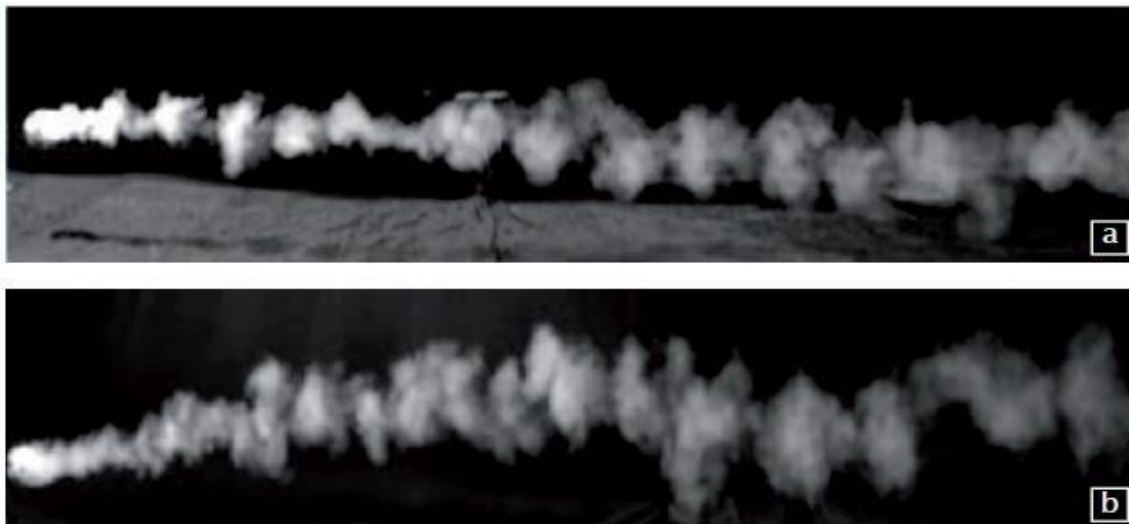


Fig. 4 Écoulement de l'air autour d'un ballon se déplaçant à une vitesse U , (a) sans rotation, (b) avec rotation.

Trajectoires de ballons de football observées par (Hong, Chung, Nakayama, & Asai, 2010b). Pour $U_0 \approx 28$ m/s.

(a) ligne droite ; (b) zigzag. Sur ces clichés, le ballon va de droite à gauche.

2.2. La spirale :

Nous retenons des deux sections précédentes que, dans la limite des grandes vitesses ($U_0 > U^*$), la gravité peut être négligée et la trajectoire est rectiligne sur des distances petites devant ℓ . Ceci est vrai en l'absence de rotation. Avec rotation, le ballon subit aussi la force de Magnus $FL \sim \rho R^3 \omega_0 A U$, où ω_0 est le vecteur rotation (Dupeux et al., 2012).

Cette force, perpendiculaire à la vitesse, dévie le ballon de la ligne droite.

Plus précisément, la courbure locale de la trajectoire $C(s)$ évolue suivant l'équation

$M U^2 C(s) = FL$. En utilisant l'expression de FL et en prenant en compte la décroissance exponentielle de la vitesse, cette équation indique que la courbure de la trajectoire augmente à partir de l'impact suivant la loi :

$$C(s) \sim (\rho/\rho_s) (\omega_0/U_0) \exp(s/E) \quad (3).$$

Cette trajectoire a été étudiée en détail par (Dupeux et al., 2012) et nous ne discutons ici que ses implications pour le football.

L'équation (3) montre que la trajectoire est une spirale dont la courbure initiale $C_0 \sim \rho\omega_0/\rho_s U_0$ augmente exponentiellement sur la longueur de freinage E .

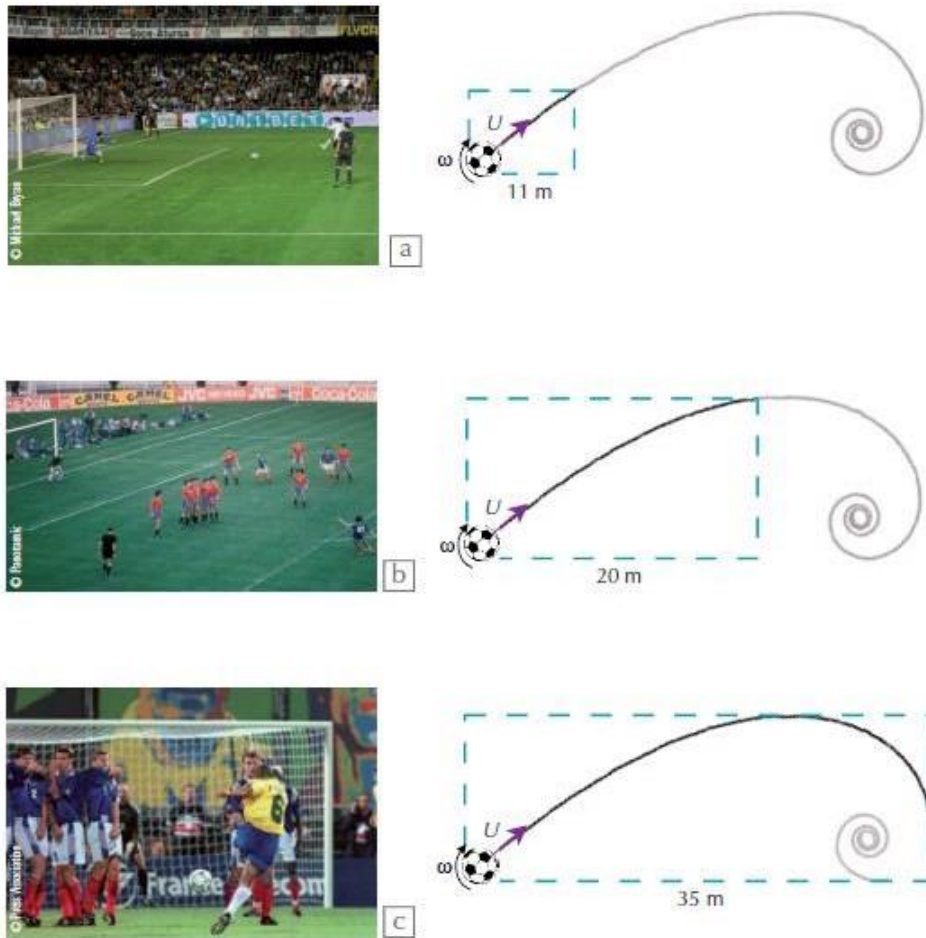


Fig. 5 Trois types de coups de pied arrêtés. (a) Penalty à 11 m ; (b) coup franc « aux 18 mètres » ; (c) coup franc lointain.

Nous discutons sur la (fig. 5) la possibilité d'observer cette spirale dans le cas de trois coups de pied arrêtés. À l'échelle du penalty (fig. 5a), la distance de 11 m est petite comparée à la taille de la spirale, et seul le début rectiligne de la trajectoire est observable. Pour un coup franc aux 18 m (fig. 5b), le cœur de la spirale n'est pas accessible, mais la trajectoire est courbée et on peut l'estimer par un cercle de courbure C_0 . Pour un coup franc lointain (fig. 5c), la trajectoire courbée dévie du cercle et l'augmentation de courbure devient observable. Selon nous, cette augmentation est à l'origine de la trajectoire surprenante observée lors du coup franc

de Roberto Carlos tiré contre la France en 1997. Ce coup franc est schématisé sur la (fig. 6) : il est tiré dès 35 mètres à une vitesse $U_0 = 38$ m/s et un angle initial α de l'ordre de 12° . Du fait de la rotation ($\omega_0 \approx 88$ rad/s ≈ 15 tours par seconde), la trajectoire du ballon s'incurve et finit par entrer dans le but sans que le gardien bouge (courbe bleue). Sans rotation, le ballon sortirait de 4 mètres (pointillés). Avec une trajectoire circulaire, le ballon manque la cage de 80 centimètres (tirets violets). Du fait de la spirale, le ballon s'écarte de la trajectoire circulaire dans les derniers mètres qui le séparent du poteau et finit par entrer, à la surprise générale.

Dans le cas du coup franc de Roberto Carlos, l'axe de rotation est vertical et le ballon dévie horizontalement vers la gauche, ce qui lui permet de contourner le mur. Un autre type de coup franc est celui où le tireur décide de faire passer le ballon par-dessus le mur et de le faire plonger ensuite. Pour cela, il choisit un axe de rotation horizontal et fait tourner le ballon de telle sorte que son sommet aille vers l'avant (tel un lift au ping-pong). Ce type de coup franc est rare, car il demande un petit pied, suffisamment petit pour passer sous le ballon et le brosser. Un des derniers grands maîtres capables de réaliser ce geste est Juninho Pernambucano (Dupeux et al., 2012).

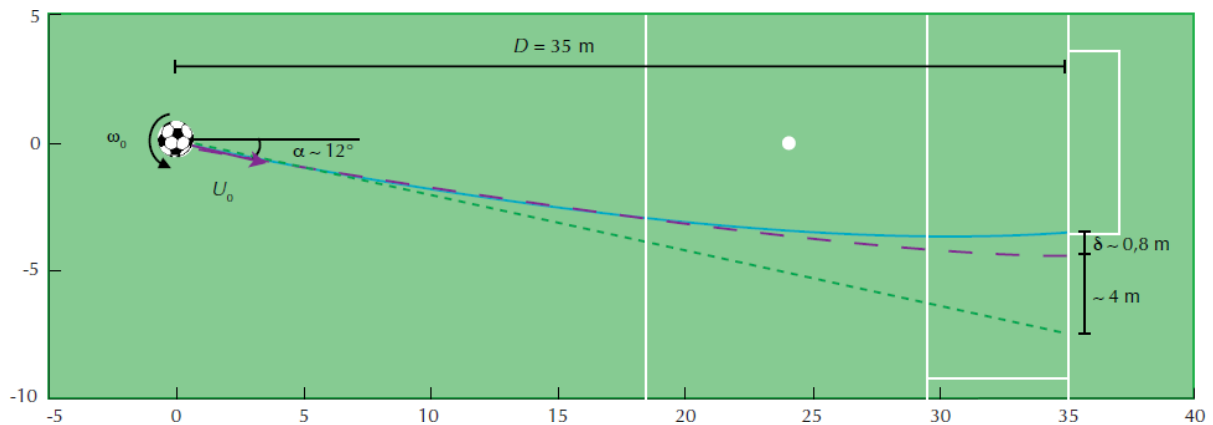


Fig. 6) Coup franc de Roberto Carlos, tiré contre la France en 1997.

Conclusion

Selon les différentes études théoriques et pratiques menées par (Armenti, 1992), (Dupeux et al., 2012), (Hong, Chung, Nakayama, & Asai, 2010b), et autres cités dans cet article, on conclut que la gravité et l'aérodynamique sont responsables de la diversité des trajectoires du ballon de football :

- 1- À faible vitesse, la gravité domine et seule la parabole galiléenne est observée.
- 2- À forte vitesse, l'aérodynamique devient prépondérante et la trajectoire se met à dépendre de la rotation du ballon ; (Sans rotation, le ballon va tout droit ou zigzague, suivant la nature laminaire ou turbulente de la couche limite. En rotation, le ballon suit une trajectoire en cercle, voire à des morceaux de spirale lorsque la distance parcourue est suffisamment grande).

Références :

- Armenti, A. (1992). *The Physics of sports*. American Institute of Physics. Retrieved from <http://www.springer.com/us/book/9780883189467>
- Carré, M., & Asai, T. (2004). Biomechanics and Aerodynamics in Soccer (pp. 333–364). Springer, Boston, MA. http://doi.org/10.1007/978-1-4419-8887-4_13
- Dupeux, G., Cohen, C., Le Goff, A., Quéré, D., & Clanet, C. (2012). Le football et ses trajectoires. *Reflète de la physique*, 28, 10- 14. <https://doi.org/10.1051/refdp/201228010>
- Dupeux, G., Goff, A. Le, Quéré, D., & Clanet, C. (2010). The spinning ball spiral. *New Journal of Physics*, 12(9), 093004. <http://doi.org/10.1088/1367-2630/12/9/093004>
- Goff, J. E. (2013). A review of recent research into aerodynamics of sport projectiles. *Sports Engineering*, 16(3), 137–154. <http://doi.org/10.1007/s12283-013-0117-z>
- Hong, S., & Asai, T. (2017). Aerodynamic effects of dimples on soccer ball surfaces. *Heliyon*, (November), e00432. <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00432>
- Hong, S., Chung, C., Nakayama, M., & Asai, T. (2010a). Unsteady aerodynamic force on a knuckleball in soccer. *Procedia Engineering*, 2(2), 2455–2460. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.04.015>
- Hong, S., Chung, C., Nakayama, M., & Asai, T. (2010b). Unsteady aerodynamic force on a knuckleball in soccer. *Procedia Engineering*, 2(2), 2455–2460. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.04.015>
- Kothmann, B. D. (2007). Aerodynamics of Sports Balls.
- Mehta, R. D. (1985). Aerodynamics of Sports Balls. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 17(1), 151–189. <http://doi.org/10.1146/annurev.fl.17.010185.001055>
- Oggiano, L., & Sætran, L. (2010). Aerodynamics of modern soccer balls. *Procedia Engineering*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705810002729>
- Sakashita, T. A. S. K. K. S. H. N. and R. (2007). AERODYNAMICS OF KNUCKLE EFFECT IN SOCCER. *Journal of Biomechanics* 40(S2), 0(July), 2007.

- Carré, M., & Asai, T. (2004). Biomechanics and Aerodynamics in Soccer (pp. 333–364). Springer, Boston, MA. http://doi.org/10.1007/978-1-4419-8887-4_13
- Dupeux, G., Goff, A. Le, Quéré, D., & Clanet, C. (2010). The spinning ball spiral. *New Journal of Physics*, 12(9), 093004. <http://doi.org/10.1088/1367-2630/12/9/093004>
- Goff, J. E. (2013). A review of recent research into aerodynamics of sport projectiles. *Sports Engineering*, 16(3), 137–154. <http://doi.org/10.1007/s12283-013-0117-z>
- Hong, S., & Asai, T. (2017). Aerodynamic effects of dimples on soccer ball surfaces. *Heliyon*, (November), e00432. <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00432>
- Hong, S., Chung, C., Nakayama, M., & Asai, T. (2010a). Unsteady aerodynamic force on a knuckleball in soccer. *Procedia Engineering*, 2(2), 2455–2460. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.04.015>
- Hong, S., Chung, C., Nakayama, M., & Asai, T. (2010b). Unsteady aerodynamic force on a knuckleball in soccer. *Procedia Engineering*, 2(2), 2455–2460. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.04.015>
- Kothmann, B. D. (2007). Aerodynamics of Sports Balls.
- Mehta, R. D. (1985). Aerodynamics of Sports Balls. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 17(1), 151–189. <http://doi.org/10.1146/annurev.fl.17.010185.001055>
- Oggiano, L., & Sætran, L. (2010). Aerodynamics of modern soccer balls. *Procedia Engineering*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705810002729>
- Sakashita, T. A. S. K. K. S. H. N. and R. (2007). AERODYNAMICS OF KNUCKLE EFFECT IN SOCCER. *Journal of Biomechanics* 40(S2), 0(July), 2007.