

Biomécanique et cinématique au football

Rayane Sahi, Adam Bekri

Introduction

Frapper le ballon efficacement est l'essence même du football. Parmi les nombreuses façons de botter, les joueurs choisissent normalement celle qui leur convient le mieux en fonction de leur intention. En général, le tir aux lacets est le plus utilisé, particulièrement lors des coups francs. Cette technique peut engendrer des effets particuliers et parfois imprévisibles sur la trajectoire du ballon. Il est notamment possible d'observer cela avec le coup franc de Roberto Carlos au tournoi de France de 1997, qui sera d'ailleurs le principal sujet d'expérience de ce rapport. Cet article examinera les principes biomécaniques impliqués dans chaque phase du tir et s'attardera sur les répercussions qu'elles produiront sur la trajectoire du ballon. Celui-ci inspire ainsi à comprendre la trajectoire du tir de Carlos et à déterminer la meilleure façon d'optimiser les coups de pied dans le sport du football. Il sera ainsi possible d'avoir une meilleure compréhension des rapports entre les projectiles sphériques et les fluides, et une meilleure connaissance des mouvements dynamiques du corps humain.

Théorie

Biomécanique

Le coup de pied étant le mouvement qui définit le jeu du football, il est important de revoir les recherches scientifiques qui soutiennent notre compréhension de cette capacité. Pour ce faire, l'accent de cette partie est mis sur les principes biomécaniques impliqués dans chaque phase de l'habileté.

La biomécanique a un large éventail d'utilisations dans l'athlétisme. Elle peut être utilisée pour étudier les dangers douloureux liés à des mouvements sportifs spécifiques, pour identifier les causes de réussite d'un mouvement, pour améliorer les mouvements d'un athlète ou pour classer et ainsi distinguer un mouvement sportif. Elle joue aujourd'hui un rôle de plus en plus important dans le monde du sport en termes d'amélioration de la performance. Dans le cas présent, elle sera utilisée pour quantifier et analyser la frappe d'un joueur de football (Roberto Carlos).

Pour exécuter le tir au lacet, les mouvements et les schémas cinétiques peuvent être décomposés en cinq phases majeures à savoir : l'approche, l'ajustement, l'armement, le contact du pied, et le suivi.

L'approche

À une distance de quelques centimètres seulement (2-4 pas), la plupart des joueurs habiles tentent un coup de pied de coude en formant un angle par rapport à la direction de la trajectoire du ballon. Une telle approche incurvée amène le corps à s'incliner vers son centre de rotation ce qui permet au pied incliné de la jambe de frappe à être plus à même de se placer sous le ballon pour mieux le toucher (Plagenhoef, 1971). Cet élan engendre aussi une plus grande extension du genou de la jambe de frappe à l'impact et donc une plus grande vitesse du pied. Il offre également une position stable pour exécuter le coup de pied, contribuant ainsi à la précision et à la cohérence de l'exécution du coup de pied (Lees, Steward, Rahnema, & Barton, 2009). Isokawa et Lees (1988) ont d'ailleurs étudié l'influence de différentes méthodes d'angle sur les vitesses du pied et du ballon pendant l'élan. Selon leurs résultats, la vitesse maximale de l'élan de la jambe de frappe a été atteinte avec un angle d'approche de 30°, et la vitesse maximale du ballon a été atteinte avec un angle d'approche de 45°.

Afin de gagner plus d'énergie lors d'un déplacement, le talon doit toucher le sol en premier, suivi des orteils, ce qui donne lieu à deux impulsions différentes. En raison du contact du talon avec le sol, une force ou une impulsion est d'abord exercée vers l'avant, puis une force de réaction au sol vers l'arrière. Ces impulsions sont vitales pour le coup de pied, car ils définissent le momentum de celui-ci, et peuvent conséquemment entraîner une plus grande vitesse et une plus grande force placée sur le ballon (Blazevich, 2013). Le dernier pas de l'approche doit aussi être le plus grand pour maximiser la force du tir. Celui-ci permet un plus grand degré de rétraction pelvienne, ce qui permet une plus grande amplitude de rotation du côté du pied.

L'ajustement : jambe d'appui et pelvis

La jambe d'appui est un élément central dans la frappe du ballon. Elle permet d'abord une plus grande puissance de tir. Selon la troisième loi de Newton, affirmant l'existence d'une réponse égale et opposée à tout mouvement, plus la force appliquée au sol par la jambe d'appui est longue et importante, plus la force appliquée au ballon lors de l'impact est importante, ce qui se traduit par une force et une accélération plus importantes (Blazevich, 2013).

Elle permet aussi le ralentissement du corps ce qui peut avoir des avantages pour stabiliser l'action, permettre de produire des forces musculaires plus importantes, ou influencer l'action de la jambe de frappe. Pour être optimal et absorber l'impact atterrissage et assurer la stabilité, le genou doit être fléchi à 26°. (Lees, Asai, Anderson, Nunome, & Sterling, 2010). Le pied d'appui doit être placé à 5-10 cm de part et d'autre du ballon de football selon le pied de frappe souhaité (Lees, Asai, Anderson, Nunome, & Sterling, 2010). Au moment du tir, le positionnement antéro-postérieur du pied par rapport au ballon déterminera la trajectoire et la précision de celui-ci. Pour le tir aux lacets, le positionnement antérieur postérieur doit être "adjacent au ballon avec la pointe du pied d'appui dirigée dans la direction prévue du mouvement du ballon" (Barfield, Kirkendall, & Yu, 2002, p. 73).

Le haut du corps joue aussi un rôle important de support. Le bassin, le tronc et les bras permettent de contrecarrer le mouvement du corps et de fournir au joueur l'équilibre

nécessaire pour accomplir le mouvement.. Le bassin pivote d'ailleurs de 30° à 36° avant que le pied d'appui ne touche le sol, jusqu'au contact avec le ballon chez les joueurs élites (Lees & Nolan, 2002 ; Lees, Steward, Rahnama, & Barton, 2009). Au moment du tir, le pelvis reste stable et ne bouge pas pour donner une meilleure perception de position du pied de frappe par rapport au pied appui.

L'armement

Durant le tir, la tête du joueur doit être placée au-dessus du ballon pour l'aider à garder son équilibre. Ce faisant, les yeux du joueur se concentreront sur le ballon, ce qui augmentera sa précision lors du contact avec le ballon. Pendant ce temps, la jambe de frappe bascule vers l'arrière et le genou est fléchi, ce qui permet de stocker de l'énergie élastique. Les fléchisseurs de la hanche instaurent la phase suivante du coup de pied, en poussant vers l'avant, permettant à la jambe de tir de commencer son élan vers le bas. L'énergie stockée est transférée vers le bas lorsque la jambe se redresse, ce qui permet d'augmenter la force du pied en direction du ballon. C'est dans cette phase du processus que se produit un mouvement de poussée. Lorsque la jambe atteint sa position la plus médiale, le genou est idéalement positionné au-dessus du ballon et il est étendu avec force, tandis que le pied est plié avec force. Comme nous l'avons mentionné précédemment, une approche angulaire du ballon permet une vitesse de rotation maximale de la jambe de frappe. Cela signifie qu'en raison de l'angle créé lors de l'approche, la jambe de frappe peut être inclinée dans le plan latéral, permettant au pied d'être placé plus loin sous le ballon, afin d'établir un meilleur contact avec lui, produisant des vitesses de balle plus élevées (Reilly, 2003 ; Lees et al., 2010).

Contact du pied

Des études ont montré que le contact entre le pied et le ballon dure 10 ms environ (Nunome, Ikegami, Kozakai, Apriantono et Sano, 2006 (cité dans Lees et Nolan, 1998)).

Au moment de ce court contact, le ballon se comprime, stockant l'énergie qui est libérée lorsqu'il quitte le pied. La proportion de l'énergie totale qui est conservée lors de cette collision est déterminée par le coefficient de restitution (Blazevich, 2013). Le coefficient de restitution lors d'un coup de pied dépend de l'endroit où s'effectue le contact avec le ballon, le plus grand coefficient de restitution provenant d'une connexion au centre du ballon. À ce point d'impact, 15 % de l'énergie cinétique stockée dans la jambe de frappe est transférée au ballon (Lees, et al. 2010). Et comme indiqué précédemment, plus la force appliquée au ballon est importante, plus l'accélération du ballon pendant le temps de vol est élevée.

En ce qui attrait les membres pivotants au point de contact, la hanche et le genou de la jambe de frappe commencent à fléchir vers le haut pour préparer le suivi du membre.

Suivi

Le suivi de la jambe de frappe et le déplacement du poids vers l'avant après le contact sont les dernières étapes vitales du tir. Le suivi de l'action permet de déterminer le type de tir qui sera effectué. Si la jambe de frappe continue le long d'un axe droit, le ballon sera le plus puissant pendant son vol. Si la jambe de frappe traverse le corps (dans un sens ou dans l'autre), le ballon aura de l'effet, se déplaçant de gauche à droite/de droite à gauche pendant son vol. Le

suivi permet également au pied de rester plus longtemps en contact avec le ballon, ce qui maximise le transfert de l'élan sur le ballon et augmente sa vitesse (Lees, et coll, 2010). Le déplacement du poids vers l'avant, quant à lui, aide le joueur à maintenir sa stabilité, ce qui garantit un tir plus précis.

Potentiel d'action et muscles recrutés.

Lorsqu'un effort est requis, le cerveau utilise les nerfs pour envoyer un signal électrique aux muscles pour qu'ils se contractent. Ce signal se transmet et produit son action grâce au potentiel d'action.

Le potentiel d'action est un court phénomène durant lequel une cellule, souvent neuronale ou musculaire, voit son potentiel électrique fluctuer au niveau de sa membrane plasmique. Cette fluctuation électrique se produit par le mouvement d'ions sodium et potassium de part et d'autre de la membrane de la cellule. Ces mouvements d'ions sont essentiels pour tout événement électrique des neurones et constituent la force derrière toutes actions et ressentis humains. Elles permettent notamment le transfert d'une commande du cerveau à travers le corps et la contraction des muscles.

Ces signaux neuronaux se font d'autant plus vite à mesure qu'ils sont recrutés et permettent des mouvements plus fluides. C'est d'ailleurs ainsi que les joueurs s'améliorent à force de s'entraîner.

L'activité électrique des muscles au repos et en phase de contraction peut être mesurée par un électromyogramme. Cet appareil capte le potentiel émis par les muscles lors de leur contraction et représente leurs fréquences émises pour comparer le recrutement musculaire. Lors du tir au but, le fessier est le muscle le plus recruté dans la jambe de frappe. Pour ce qui de la jambe d'appui, le muscle dominant est le quadriceps (Brophy, R. H., Backus, S. I., Pansy, B. S., Lyman, S., & Williams, R. J., 2007).

Cinématique des fluides

Grâce à la technique reliée à la biomécanique de Roberto Carlos, celui-ci permettra de donner au ballon une trajectoire hors du commun. Pour pouvoir comprendre cette trajectoire qui peut sembler irréalisable, il faut comprendre les concepts physiques derrière celle-ci.

Cette trajectoire est notamment expliquée par la dynamique et la cinématique newtonienne, la traînée, et l'effet Magnus.

Dynamique et cinématique newtonienne

Comme tout objet, le ballon propulsé respecte également les lois de Newton. En effet, comme la première loi de Newton stipule, tout corps qui n'interagit pas avec une force ou possédant une somme des forces égales à zéro ne subit pas d'accélération qui correspond à l'équation $\Sigma F = 0$. Cela insinue donc l'inverse si la somme des forces exercées sur l'objet est égale à 0 et donc que l'objet subit une accélération. L'inverse de cette loi est appelé la seconde loi de Newton et est décrit par l'équation $\Sigma F = ma$. Lors d'un tir de ballon, une force de poussée est transmise sur le ballon. Cela est dû à la troisième loi de Newton, qui stipule que lorsqu'un corps X exerce une force sur un corps Y, le corps Y transmet immédiatement une force de même intensité, mais en direction opposée. C'est le cas avec le ballon ou la force transmise au ballon par le tir du joueur est aussi transférée immédiatement au pied de celui-ci. Cette

force vient s'ajouter dans la somme des forces que l'objet subit (dans ces cas-ci, le poids et le frottement de l'air vu que le lancer n'est pas effectué dans le vide). La somme des forces ne donne plus zéro et l'objet subit donc une accélération.

Dans la cinématique, il existe trois types de mouvements primordiaux, soit le mouvement rectiligne uniforme, le mouvement rectiligne uniformément accéléré et le mouvement en projectile. Le mouvement en projectile est ici le type de mouvement qui est le plus pertinent au niveau de notre projet, mais pour comprendre ce type de mouvements, il faut comprendre les deux précédents. Le mouvement rectiligne uniforme correspond à un mouvement purement horizontal (ou verticalement dans le vide) et qui se déplace sans avoir aucune accélération. La seule équation pertinente pour ce type de mouvement est l'équation $\Delta s = v * \Delta t$. Le mouvement uniformément accéléré est différent d'une MRU, puisque dans ce cas-ci, l'objet en question subit une accélération constante au fil du temps. Ce type de mouvement peut correspondre à une chute libre ou un objet tombe en subissant seulement l'accélération gravitationnelle ($-9,8 \text{ m/s}^2$). Pour ce type de mouvement, une multitude d'équations permet de calculer les différents paramètres que peut inclure le mouvement en MRUA. Ces équations sont :

$$1. v_0 = at$$

$$2. \Delta x = \frac{v + v_0}{2} t$$

$$3. \Delta x = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

$$4. v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x$$

où

v_0 : la vitesse initiale

Δx : le déplacement

t : l'intervalle de temps

v : la vitesse finale

a : l'accélération

Enfin, lorsqu'un objet est lancé, on appelle son mouvement le mouvement parabolique ou mouvement d'un projectile. Ce type de mouvement est distinct du mouvement rectiligne ou d'une MRUA, puisque celui-ci effectue un déplacement horizontal et vertical simultanément. Cela veut dire que le déplacement horizontal d'un projectile correspond à un mouvement uniforme rectiligne tandis que son déplacement vertical correspond à une chute libre, soit un mouvement en MRUA. Dans cette situation, il faut donc pouvoir décomposer le mouvement en deux parties, soit le déplacement vertical et horizontal afin de calculer les paramètres nécessaires (les équations de MRUA pour le déplacement vertical et équations MRU pour le déplacement horizontal). Les mouvements de projectile sont très fréquents dans nos vies. En effet, les tirs de canons, de balles de fusil ou d'obus sont tous des situations où le mouvement de projectile est appliqué. Cependant, dans le tir de Roberto Carlos, on distingue un changement de trajectoire soudain lors du tir. Ce phénomène est justifié par la traînée de l'air et la rotation donnée au ballon par Roberto Carlos.

La traînée

En mécanique des fluides, la traînée (aussi appelé frottement) est une force qui s'oppose au mouvement relatif de tout matériau se déplaçant par rapport à un fluide environnant. Cela peut se produire lorsque deux couches (ou surfaces) de fluide entrent en collision, ou lorsqu'un fluide entre en collision avec une surface solide. La force de traînée dépend de la vitesse, contrairement à d'autres forces résistives telles que la friction sèche, qui sont presque indépendantes de la vitesse. Dans un écoulement laminaire, la traînée est proportionnelle à la vitesse ; dans un écoulement turbulent, la traînée est proportionnelle à la vitesse au carré. Lors d'un lancer de projectile, la vitesse du fluide est souvent réduite par rapport à celle d'un objet solide dans la direction du fluide en raison des forces de traînée.

La force de traînée peut être calculée par l'équation suivante :

$$F_P = \frac{1}{2} C_L \rho A v^2$$

où

C_L : le coefficient de traînée

ρ : la densité du fluide

A : la section transversale de l'objet

v : la vitesse de l'objet

L'effet Magnus

L'effet Magnus est un phénomène physique bien connu qui se produit lorsqu'un objet en rotation se déplace dans l'air ou un autre fluide. La force produite par cet effet dévie la trajectoire du projectile et lui prête une forme incurvée. Cette déviation s'explique entre autres par l'interaction entre le fluide et la rotation du projectile. En effet, lorsqu'un objet en rotation se propage dans un fluide, il crée une couche d'air autour de lui qui tourne dans un sens équivalent. Cette couche d'air faisant face à l'air environnant crée deux pôles de pression autour de l'objet. Un pôle de basse pression, où l'air est dirigé dans le même sens que la rotation de la couche d'air, et un autre pôle de haute pression, où la couche d'air est en sens inverse de l'air environnant. Le projectile étant alors attiré vers le pôle de basse pression ou la rotation se fait plus vite, il se produit une force nette agissant perpendiculairement à la direction du vol. Cette force crée la courbure sur la trajectoire.

La force Magnus peut être calculée par l'équation suivante :

$$\overrightarrow{F_M} = s(\hat{w} \times \hat{v})$$

où

s : le coefficient de résistance à l'air sur la surface de l'objet

w : la vitesse angulaire de l'objet

v : la vitesse de l'objet

Méthodes

Analyse vidéo de la biomécanique

Les vecteurs biomécaniques du joueur au moment du tir ont été tracés sur le logiciel Kinovea. Ils relient entre eux les différents points de stabilité du joueur et permettent de trouver les angles d'inclinaison entre eux et le centre de gravité du joueur. Ceux-ci nous permettent donc de recueillir de l'information sur le mouvement athlétique de Carlos et d'ainsi l'analyser à travers une analyse biomécanique.

Par contre, le logiciel nous permet seulement de travailler avec des images et non pas avec des vidéos enregistrées par des caméras en mouvement. D'ailleurs, la précision du logiciel varie selon la qualité de l'image et peut altérer les résultats en réduisant notre précision sur la prise de données.

Analyse vidéo de la trajectoire

L'analyse vidéo s'est faite sur le logiciel Dartfish. Une modélisation 3D du terrain respectant les dimensions de celui-ci a été produite et la trajectoire du ballon a été suivie par un traqueur automatique enregistrant les coordonnées du ballon dans l'espace modélisé. Le milieu de terrain représentait l'origine du système d'axes, la longueur du stade constituait donc l'axe des x, et la largeur, l'axe des y. Les distances entre les éléments importants du tir telles que la vitesse de Carlos lors de sa course, ou la vitesse du ballon ont aussi été calculées. Ceux-ci nous ont par la suite permis de produire notre simulation sur VPython et d'effectuer nos calculs sur la trajectoire. Il est aussi à noter cependant que la précision du logiciel varie selon la qualité de l'image et peut altérer les résultats en réduisant notre précision sur la prise de données.

Simulation 3D VPython

Le logiciel de simulation VPython nous a permis de simuler la trajectoire théorique du coup franc de Roberto Carlos à l'aide de calculs numériques. Pour ce faire, nous avons tout d'abord créé un terrain de football en 3D qui respecte les dimensions du stade de Gerland, terrain où Roberto Carlos a effectué son tir. Nous avons ensuite utilisé les données pertinentes sur le tir telles que la vitesse du ballon, la distance ballon-but recueillie par le logiciel Dartfish et des études menées sur le tir, pour calculer les forces agissant sur le ballon et le changement de position en résultant. Cela nous a par la suite permis de générer la trajectoire du ballon dans le logiciel et d'enregistrer les données dans des graphiques.

La limite de cette méthode est bien sûr qu'il dépend entièrement du code. En effet, si une ligne de code est mal écrite ou possède des données erronées, celle-ci ne nous permettra pas de tracer la trajectoire souhaitée.

Résultats

Figure 1. Trajectoire du ballon

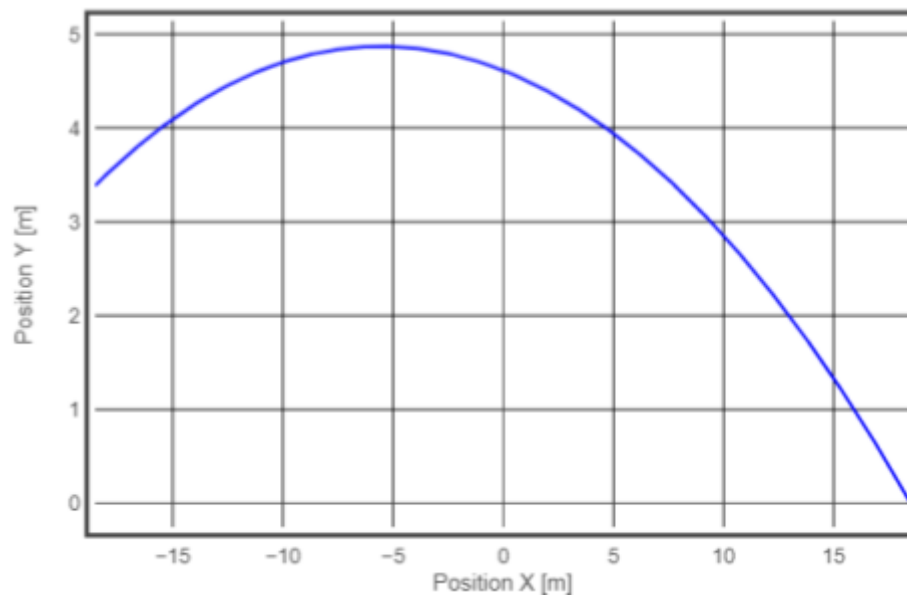


Figure 2. Vitesse du ballon en fonction du temps

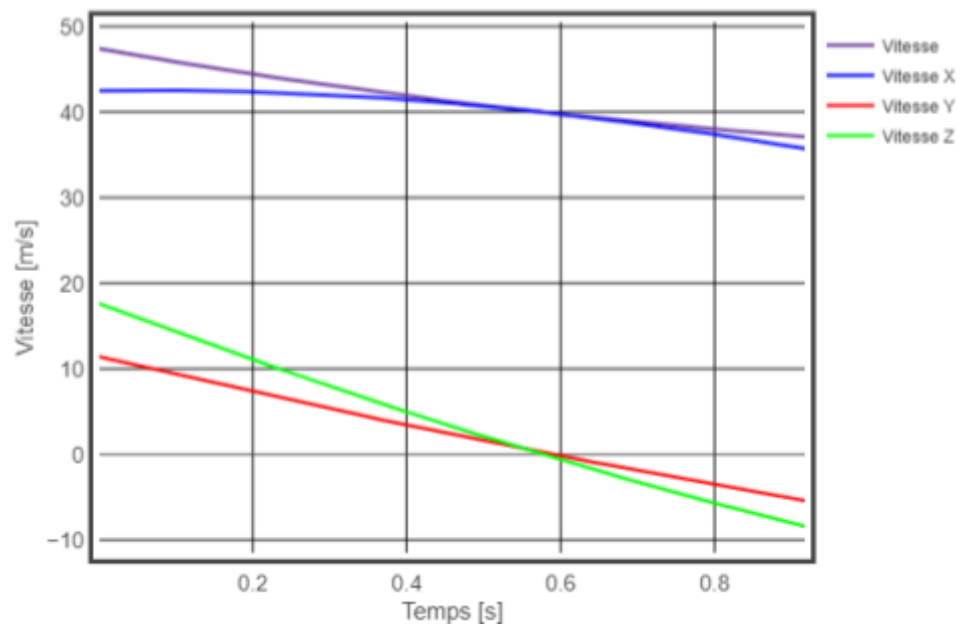


Figure 3. Schémas biomécanique du joueur

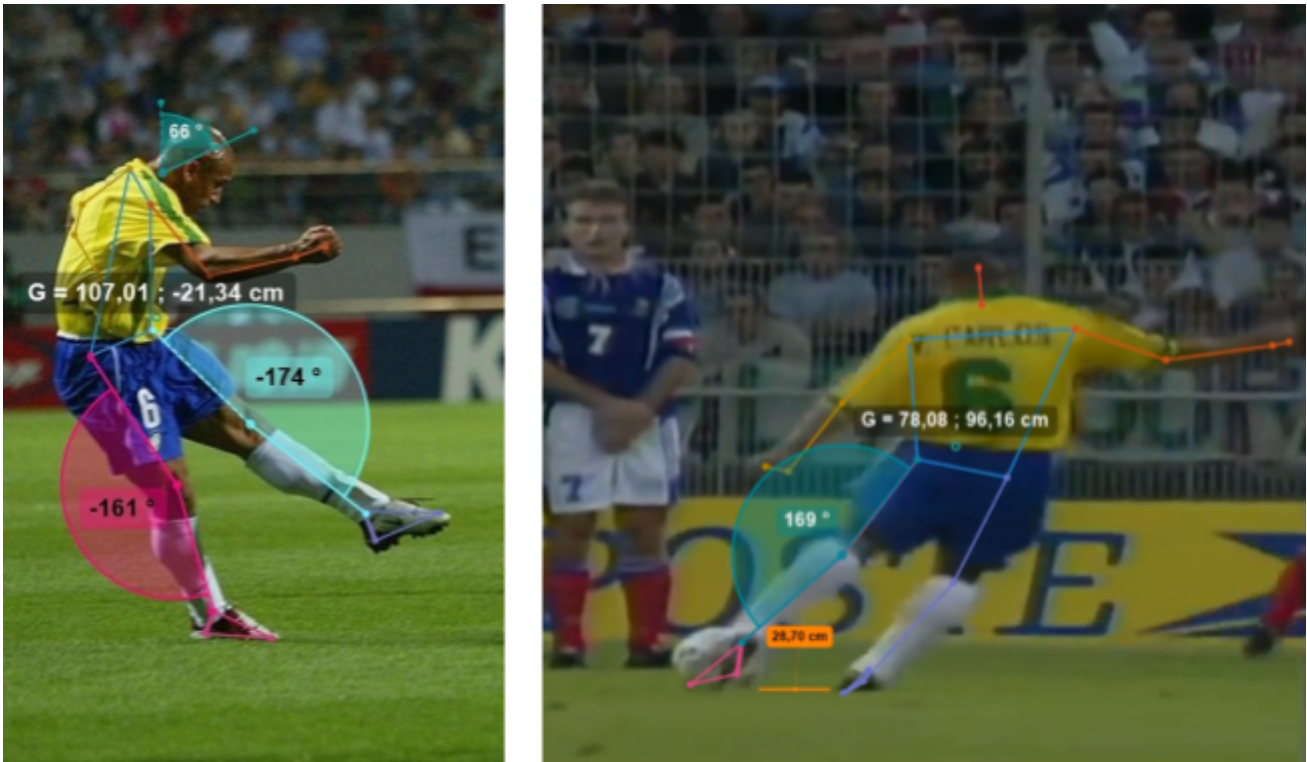


Figure 4. Distances du ballon avant le tir

Type de distance	Mesure (m)
Ballon-but	36.8
Ballon-Carlos	0.139

Figure 5. Vitesse du ballon au contact du pied

Vitesse (m/s)
47.2

Discussion

Il est possible de constater avec nos résultats l'effet de courbure créé par le tir en observant le graphique de la trajectoire du ballon (figure 1) . Au départ, le projectile se dirige vers les y positifs, mais finit par se courber vers les y négatifs à la fin. Ce phénomène est directement relié à l'effet Magnus. La balle étant attirée vers le pôle de basse pression, elle se retrouve, à la fin de son mouvement, à dévier de trajectoire. À la figure 2 est représentée la diminution de vitesse qui est justement due à l'effet Magnus. Sachant que le plan y constitue la largeur du terrain et que le milieu de terrain représente l'origine, la diminution de vitesse en y est explicable par la force Magnus poussant vers les y négatifs. En ce qui concerne la vitesse en x et en z, on peut observer une diminution de la vitesse notamment causée par la force de traînée, qui vient s'opposer au mouvement du ballon. Le mouvement est donc ralenti, notamment à cause du frottement de l'air qui produit une force inverse à la trajectoire et le mouvement est dévié par rapport à l'axe des y par l'effet de la force Magnus sur le ballon.

Analyse

Biomécanique

Lors de son coup franc, Roberto Carlos est à une distance de 36,8 mètres du but adverse. L'approche qu'il emploie se distingue nettement de celle normalement empruntée par les joueurs professionnels. En effet, il prend un élan de 13,9 mètres avant de tirer le ballon, ce qui est cinq fois plus élevé que la moyenne. Cette distance d'approche est néanmoins cohérente vu son écart face au but. Celle-ci lui permet, entre autres, d'acquérir une plus grande impulsion sur sa course et de conséquemment produire une plus grosse puissance de frappe, qui est nécessaire pour marquer à sa distance du but. Il est aussi à noter que Carlos n'est presque pas incliné face au ballon lors de sa course. Effectivement, il court droit vers la balle à un angle maximal de cinq degrés. Ce faisant, il permet à sa jambe de frappe d'avoir une plus grande amplitude de mouvement transversale au moment du tir et produire une plus grosse courbe sur le ballon. En effet, puisque Carlos est gaucher et qu'il veut envoyer la balle à droite avec une courbure vers la gauche, il doit produire une grande rotation horizontale avec sa jambe, ce qui est difficilement possible avec une approche inclinée. Lors de son élan, Carlos court sur la pointe des pieds pour créer ses impulsions et gagner en vitesse. Il atteint par ailleurs une vitesse de pointe de 33 km/h, pour une course lui ayant duré 2,84 secondes. Son dernier pas est 2,5 fois plus grand que les autres, ce qui lui permet de produire un plus grand degré de rétraction pelvienne, et en somme, un tir plus puissant.

Lorsque Roberto Carlos arrive au niveau du ballon, celui-ci met son pied d'appui à une distance significative de 28,7 cm du ballon. Comme mentionné précédemment, la distance optimale du pied d'appui afin d'effectuer un bon tir est entre 5 et 10 cm. Cependant, avec une distance de la jambe d'appui de 28,7 cm, cela permet à Roberto Carlos d'élargir l'amplitude de son mouvement et donc de fournir une force plus élevée. En ce qui concerne la position antéro-postérieure du pied, celle-ci est dirigée vers la droite ce qui va amener la trajectoire de base vers la droite. Le genou d'appui de Roberto Carlos est fléchi selon un angle de 19° ce qui est unique à son tir puisqu'habituellement, les genoux des joueurs effectuent des tirs

optimaux avec un angle de 26° . Tout juste avant la frappe, son pelvis produit une rotation antéro-postérieure qui va amener sa jambe de frappe vers l'avant.

Le footballeur brésilien frappe son ballon avec l'extérieur de ses lacets pour produire une rotation antihoraire et créer une courbure sur la trajectoire. Le contact ne dure qu'une fraction de seconde et crée une énorme accélération sur le ballon. En ce qui attrait les membres pivotants au point de contact, la hanche et le genou de la jambe de frappe commencent à fléchir vers le haut pour préparer le suivi du membre.

Lors du suivi, Roberto Carlos met son corps vers l'avant et incline sa tête et son torse de 66° . Ceci lui permet de conserver l'équilibre et de réduire l'angle de lancement de son tir pour contrôler l'élévation du ballon. Sa jambe de frappe traverse son corps de gauche à droite. Comme expliqué précédemment, cette rotation transversale permet au ballon de se courber en sens inverse lors de sa trajectoire.

Cinématique

Lors du coup franc de Roberto Carlos, trois forces interagissent avec le ballon soit la force gravitationnelle, la force de traînée et l'effet Magnus. En effet, le ballon effectue un mouvement de rotation dans un fluide (l'air dans ce cas) ce qui cause l'effet Magnus. La force de traînée, quant à elle, est créée par la résistance de l'air. Elle correspond au frottement de l'air avec le ballon et elle varie selon la vitesse de celle-ci. La force gravitationnelle est la force causée par l'attraction de la Terre sur le ballon et elle est constante. L'équation qui viendrait représenter la situation serait : $ma = -mg + F_p + F_M$. Cela viendrait donc modifier la trajectoire du ballon pour que celle-ci vienne effectuer une trajectoire en spirale qui, de base, subirait seulement un tir parabolique sans l'effet Magnus.

Grâce à notre simulation effectuée avec le langage de programmation Python, nous avons pu observer l'impact des différentes forces sur la trajectoire de la balle. En effet, nous avons décrit trois situations. La première situation consistait à observer le tir de Roberto Carlos dans le vide, la seconde consiste à observer le tir de Roberto Carlos dans l'air si celui-ci n'avait pas transmis un mouvement de rotation au ballon (donc un tir dans l'air, mais sans Effet Magnus) et la troisième situation consistait à observer la véritable trajectoire de la balle avec l'Effet Magnus.

Conclusion

Nous avons étudié le mouvement de frappe de Roberto Carlos et ses répercussions sur la trajectoire du ballon. Après avoir analysé celui-ci, on peut affirmer que chaque élément des cinq schémas cinématiques étudiés est primordial à la réalisation de la trajectoire du tir. Nous avons aussi étudié le mouvement d'une sphère en rotation créée par la frappe de Carlos. En faisant ainsi, nous avons trouvé que la courbure de la trajectoire de la sphère changeait au cours de son déplacement. Au début du mouvement, la vitesse et l'orientation ne varient pas, et la balle suit une trajectoire circulaire. Mais au fur et à mesure que la trajectoire augmente,

la vitesse et l'accélération sont grandement affectées et diminuent fortement. Ces fluctuations sont notamment dues à l'effet Magnus et l'effet de traînée appliqués sur le ballon.

Références

1. Batchelor, G. K. (1967) An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press, Cambridge, UK, plate 1.
2. Kellis E, Katis A. Biomechanical characteristics and determinants of instep soccer kick. J Sports Sci Med. 2007 ;6(2) :154-165. Publié le 1 Juin 2007.
2. Lees, A., Asai, T., Andersen, T. B., Nunome, H. and Sterzing, T. (2010) 'The biomechanics of kicking in soccer : A review', Journal of Sports Sciences, 28 : 8, 805 — 817, Publié le 27 Mai 2010 (iFirst)
3. Potentiel d'action. (23 janvier 2021). Consulté le 16 février 2021, à partir de : https://fr.wikipedia.org/wiki/Potentiel_d%27action
4. Barfield, W. R., Kirkendall, D. T., & Yu, B. (2002). Kinematic instep kicking differences between elite female and male soccer players. *Journal of sports science & medicine*, 1(3), 72.
5. Blazevich, A. J. (2013). *Sports biomechanics: the basics: optimising human performance*. A&C Black.
6. Hay, J (1996), Biomechanics of Sport Techniques. Prentice Hall: New Jersey.
7. Lees, A., & Nolan, L. (1998). The biomechanics of soccer: A review. *Journal of Sports Sciences*. 16(3), 211-234.
8. Lees, A., & Nolan, L. (2002). Three-dimensional kinematic analysis of the instep kick under speed and accuracy conditions. *Science and football IV*, 16-21.
9. Lees, A., Asai, T., Anderson, T., Nunome, H., & Sterzing, T. (2010). The biomechanics of kicking in soccer: A review. *Journal of Sport Sciences*. 28(8), pg 805-815.
10. Lees, A., Steward, I., Rahnama, N., & Barton, G. (2009). Lower limb function in the maximal instep kick in soccer. *Contemporary Sport, Leisure and Ergonomics*. New York: Taylor & Francis, 149-60.
11. McLean, B. D., & Tumilty, D. M. (1993). Left-right asymmetry in two types of soccer kick. *British Journal of Sports Medicine*, 27(4), 260-262.
12. Allain, R. (2018, 24 juin). *Let's Use Physics to Model a Curving Soccer Ball*. Wired. <https://www.wired.com/story/lets-use-physics-to-model-a-curving-soccer-ball/>
13. Brophy RH, Backus SI, Pansy BS, Lyman S, Williams RJ. Lower extremity muscle activation and alignment during the soccer instep and side-foot kicks. J Orthop Sports Phys Ther. 2007 May;37(5):260-8. doi: 10.2519/jospt.2007.2255. PMID: 17549955.
14. Roberto Carlos Incredible Free Kick (France 1997) (Sky Sports English Commentary) [HD]. (2018, August 15). [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=crKwlbwvr8>