

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté d'éducation physique et sportive

Département d'éducation physique et sportive



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Entraînement Sportif.

Spécialité : Biomécanique des activités physiques et sportives.

Par

BESSENOUCI HADJ AHMED ISLEM

Thème :

ANALYSE DE QUELQUES VARIABLES BIOMECHANQUES INFLUENTES SUR LA PRÉCISION DU TIR DES COUPS FRANCS DIRECTS DANS LE FOOTBALL.

Soutenue le 21/02/2019, devant le jury composé de :

Mouissi Farid
Sba Bouabdellah
Benour Maamar
Dassa Badreddine
Zerf Mohamed

Professeur, Université Hassiba de Benbouali Chlef.
Professeur, Université de Hassiba Benbouali Chlef
MCA, Université de Hassiba Benbouali Chlef
MCA, Université de M'hamed Bougara Boumerdes
MCA, Université de Abdelhamid Benbadis Mostaganem

Président
Rapporteur
Membre
Membre
Membre

Année universitaire 2018/2019

DÉDICACE

Ce travail est dédié à :

Mon cher père, Monsieur BESSENOUNI Adjel, qui a toujours cru en moi et a mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour que je réussisse dans mes études.

Ma chère mère, KHEDDAOUNI Mokhtaria, que je ne cesse de remercier pour tout ce qu'elle m'a donné. Elle m'a porté 9 mois dans son ventre et a fait de moi l'homme que je suis aujourd'hui.

Que Dieu la récompense pour tous ces bienfaits.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à ALLAH, le tout puissant, et à son prophète MOHAMED (paix et salut sur lui) pour la chance qui m'a été offerte pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier mes parents pour le soutien inconditionnel dont ils ont fait preuve depuis que mon projet de fin d'étude est défini. Merci pour le soutien financier, moral, psychologique et matériel. Si je suis arrivé à ce stade, c'est bien grâce à vous !

Je tiens ensuite à remercier le docteur Sba Bouabdellah et le docteur Reguig Madani, pour toute l'aide et l'orientation, qu'ils m'ont apportées ainsi que pour leurs précieux conseils et encouragements lors de la réalisation de cette thèse.

Je remercie aussi tous les enseignants de l'institut d'éducation physique pour avoir bien tenue leur rôle du messager du savoir, ainsi que les responsables, administrateurs, agents ... etc. De l'institut pour leurs honorables services.

Je souhaite aussi remercier tous les membres de ma famille, mes frères et sœurs pour leur appui sans faille.

J'offre toute ma gratitude également à Benckekroun. M, médecin de formation et poète dans l'âme qui m'a fait un don précieux de son temps pour la correction de cette thèse.

Enfin, je remercie mes amis et camarades de promotion pour ces années passées ensemble, dans les meilleurs moments comme dans les pires.

Table des matières

DEDICACE	I
REMERCIEMENTS	II
Table des matières	III
Liste des tableaux	XI
Liste des figures	XII
Liste des symboles	XIV
Avant-Propos	XV

Partie 01

Chapitre 01

Cadre de la problématique.

1. Introduction	1
2. Problématique	3
3. Hypothèses	5
4. Objectifs	6
5. Les concepts définis dans la recherche	6
5.1. La Biomécanique	6
5.2. La Cinématique	6
5.2.1. Le déplacement et la distance parcourue	7
5.2.2. La trajectoire	7
5.2.3. La distance parcourue	7
5.2.4. Le déplacement	7
5.2.5. La vitesse	8
5.2.6. L'accélération	8
5.2.7. Le mouvement de projectile	8
5.2.7.1. Equation horaire (paramétrique)	9
5.2.7.2. Equation de la trajectoire	9

5.2.7.3.	Temps d'envol	9
5.2.7.4.	Hauteur	9
5.2.7.5.	Portée Maximal	9
5.3.	La cinétique ou la dynamique	9
5.3.1.	L'accélération gravitationnelle	10
5.3.2.	Les forces	10
5.3.3.	Energie	10
5.3.4.	Le travail	11
5.3.5.	La puissance	11
5.3.6.	La quantité de mouvement	12
5.3.7.	L'impulsion	12
5.4.	La Précision	13
5.4.1	Précision spatiale	13
5.4.2	Précision temporelle	13
5.4.3	Le Timing	13
5.5.	Le Coup Franc	13
6.	Les études antérieures et similaires	14
-	Etude de la trajectoire de l'envol des ballons de football (2018).	14
-	Analyse cinématique des coups de pied de football à l'aide d'un système de capture de mouvement (2017).	14
-	Les buts sur coup franc en football : un succès improbable entre échec et embarras (2017).	15
-	Un coup franc idéal (2017).	16
-	Une topographie des coups francs dans football (2016).	16
-	Déterminer les vitesses et les angles pour le problème du coup franc (2015).	17
-	Recherche stratégique sur les statistiques de probabilité des scores directs de coup franc basés sur des principes biomécaniques (2014).	18
-	Précision du coup franc direct pour atteindre le but en football : concentration sur la différence de point de tir (2014).	18
-	Mécanismes influençant la précision du coup de pied de football (2013).	19
-	Caractéristique de l'envol du ballon lors d'un tir courbé en football (2013).	20

– Modélisation du vol d'un ballon de football sur coup franc direct (2011).	_____	21
– Analyse des moments et forces appliqués sur les membres et les articulations des membres inférieurs lors d'un coup franc dans le football (2010).	_____	21
– La biomécanique du coup de pied au foot : revue de littérature (2010).	_____	22
– Caractéristiques cinématiques du corps entier lors du coup de pied de ballon par les joueurs de football masculins et les paramètres liés à la qualité du coup de pied (2007).	_____	23
– Cinématique de la phase d'impact du coup de pied dans le football (2007).	_____	24
– Juger où ira un ballon : le cas des coups francs courbés en football (2006).	_____	25
– Le coup de pied courbe d'un ballon I : impact avec le pied (2002).	_____	25
– Le coup de pied courbé d'un ballon de football II : vol dans les airs (2002).	_____	26
– Cinématique tridimensionnelle du coup franc direct en football face à un mur défensif (1993).	_____	27

7.Synthèse des études antérieures et similaires :	_____	27
----------------------------------------------------------	-------	-----------

Chapitre 02

La biomécanique du coup franc direct.

1. Analyse technique	_____	29
1.1. Préparation	_____	29
1.1.1. Le facteur cognitif	_____	29
1.1.2. Le facteur moteur (déplacement et approche du ballon)	_____	30
1.1.3. Le facteur décisionnel	_____	30
1.2. Mise en tension	_____	30
1.3. Exécution	_____	30
1.3.1. L'impact	_____	31
1.3.2. La finition	_____	31
2. Analyse biomécanique	_____	31
2.1. La phase d'approche	_____	32
2.2. Placement de la jambe d'appui	_____	33

2.3.	Balancement de la jambe de frappe et rotation de la hanche	33
2.4.	Contact du pied avec le ballon	34
2.5.	Le suivi	35
3.	Enchaînement segmentaire	35
3.1.	Description de l'enchaînement segmentaire	35
3.2.	L'enchaînement segmentaire du coup de pied	37
4.	Les forces Appliquées sur le ballon	40
4.1.	Poids	41
4.2.	Les forces aérodynamiques	42
4.2.1.	Origine physique de la traînée	42
4.2.2.	Origine physique de la portance (Effet Magnus)	42
5.	Les trajectoires du ballon	43
5.1.	Lignes droites et zigzags	43
5.2.	La spirale	45
	Conclusion	47

Chapitre 03

La précision du tir au football.

1.	Le tir	50
2.	La précision	50
3.	Types de précision	51
3.1.	Précision spatiale	51
3.2.	Précision temporelle	51
3.3.	Timing	51
4.	Les facteurs affectants la précision du tir	52
4.1.	Précision et force du tir	52
4.2.	La hauteur du tir	52

4.3.	Le timing du tir	53
4.4.	L'angle du tir	54
4.5.	Le facteur psychologique	54
4.6.	Le facteur physique	54
4.1.	Le facteur technique	55
Conclusion		55

Partie 02

Chapitre 01

Méthodologie et procédures d'investigations.

1.	Méthodologie	59
2.	Echantillon	59
3.	Domaines de l'étude	60
4.	Les variables de L'étude	60
4.1.	La variable indépendante	60
4.1.1.	Phase d'approche	61
4.1.1.1.	Temps d'approche	61
4.1.1.2.	Distance d'approche	62
4.1.1.3.	Nombre de pas	62
4.1.1.4.	Vitesse d'approche	63
4.1.1.5.	Accélération d'approche	63
4.1.2.	Le placement de la jambe d'appui et le balancement de pied de frappe	64
4.1.2.1.	Vitesse angulaire de la cuisse	64
4.1.2.2.	Vitesse angulaire de la jambe	65
4.1.2.3.	Vitesse de la cuisse	66
4.1.2.4.	Vitesse de la jambe	67
4.1.2.5.	Vitesse du pied	67
4.1.3.	Contact du pied avec le ballon	67
4.1.3.1.	Angle d'inclinaison du corps	68
4.1.3.2.	Angle d'attaque du pied de frappe	68
4.1.3.3.	Quantité du mouvement du pied de frappe	69
4.1.3.4.	Energie cinétique du pied de frappe	69

4.1.4.	Trajectoire du ballon	69
4.1.4.1.	Temps d'envol	70
4.1.4.2.	Angle d'envol	71
4.1.4.3.	La vitesse horizontale	71
4.1.4.4.	La vitesse verticale	71
4.1.4.5.	La vitesse	71
4.1.4.6.	Accélération horizontale	72
4.1.4.7.	Accélération verticale	72
4.1.4.8.	L'accélération	72
4.1.4.9.	Quantité de Mouvement	72
4.1.4.10.	Energie Cinétique	72
4.2.	La variable dépendante	72
4.3.	La variable parasite	73
5. L'instrument de collecte des données (Test de précision de tir du coup franc direct)		73
5.1.	Objectif du test	73
5.2.	Outils du test	74
5.3.	Déroulement du test	74
5.4.	Calcul des points du test :	74
6. Pré-enquête		74
7. Les critères de qualité du test		74
7.1.	La validité	75
7.2.	La fidélité ou fiabilité	75
7.3.	Objectivité	76
8. Collecte et analyse des données		76
8.1.	L'analyse vidéo a été réalisée par	77
8.1.1.	Dartfish	77
8.1.2.	Tracker	78
9. Traitement Statistique		79
9.1.	Formule Moyenne arithmétique	79

9.2.	Formule Ecart type	79
9.3.	Formule T Student	80
9.4.	Formule Coefficient de corrélation	80
9.5.	Formule Coefficient de détermination	80

Chapitre 02

Analyses et Interprétations des Données.

1.	<i>Présentation descriptive des données</i>	82
1.1.	Phase d'approche	82
1.2.	Le placement de la jambe d'appui et le balancement de pied de frappe	83
1.3.	Contact du pied avec le ballon	83
1.4.	L'envol du ballon	84
2.	<i>Présentation des corrélations entre les variables de l'étude</i>	85
2.1.	Phase d'approche	85
2.2.	Le placement de la jambe d'appui et le balancement de pied de frappe	86
2.3.	Contact du pied avec le ballon	87
2.4.	L'envol du ballon	87
3.	<i>Présentation des taux de contributions des variables de l'étude</i>	89
3.1.	La phase d'approche	89
3.2.	Le placement de la jambe d'appui et le balancement du pied de frappe	89
3.3.	La phase de contact du pied avec le ballon	90
3.4.	La phase de l'envol du ballon	90
4.	<i>Discussions</i>	92
4.1.	Hypothèse 01	92
4.1.1.	La phase d'approche	92
4.1.2.	Phase de placement du pied d'appui et le balancement de la jambe de frappe	93
4.1.3.	Phase de contact du pied avec le ballon	93

4.1.4. Phase d'envol du ballon	94
4.2. Hypothèse 02	95
4.2.1. La phase d'approche	96
4.2.2. Le placement de la jambe d'appui et le balancement du pied de frappe	96
4.2.3. La phase de contact du pied avec le ballon	97
4.2.4. La phase de l'envol du ballon	98
5. Conclusion	98
6. Recommandations, Limites et Perspectives	99
Bibliographies	101
ANNEXE 01	
ANNEXE 02	
ANNEXE 03	
ANNEXE 04	
Résumé en français	
Résumé en arabe	
Résumé en anglais	

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Indique des vitesses enregistrées en match lors de grosses frappes.</i>	44
<i>Tableau 2 : Caractéristiques générales de l'échantillon.</i>	60
<i>Tableau 3 : Représente les moyennes, les écarts type et le T Student des deux croupes.</i>	75
<i>Tableau 4 : Représente les moyennes, les écarts types et le coefficient de corrélation du teste et pré-test.</i>	76
<i>Tableau 5 : Représente les moyennes et les écarts types des variables biomécanique de la phase d'approche.</i>	82
<i>Tableau 6 : Représente les moyennes et les écarts types des variables biomécaniques des phases du placement de la jambe d'appui et le balancement du pied de frappe.</i>	83
<i>Tableau 7 : Représente les moyennes et les écarts types des variables biomécaniques de la phase du contact du pied avec le ballon.</i>	83
<i>Tableau 8 : Représente les moyennes et les écarts types des variables biomécaniques de la phase d'envol du ballon.</i>	84
<i>Tableau 9 : Représente la corrélation et le taux de contribution des variables biomécaniques de la phase d'approche et la précision du ti du coup franc direct.</i>	84
<i>Tableau 10 : Représente la corrélation et le taux de contribution des variables biomécaniques des phases du placement de la jambe d'appui et le balancement du pied de frape et la précision du tir du coup franc direct.</i>	85
<i>Tableau 11 : Représente la corrélation et le taux de contribution des variables biomécaniques de la phase de contact du pied avec le ballon et la précision du tir du coup franc direct.</i>	86
<i>Tableau 12 : Représente la corrélation et le taux de contribution des variables biomécaniques de la phase d'envol du ballon et la précision du tir du coup franc direct.</i>	86

Liste des figures

Figure 1 : Représente les angles de l'arme de la jambe de frappe. _____	30
Figure 2 : Les composants du coup du pied. _____	32
Figure 3 : Kinéto gramme de la jambe durant la frappe de balle. _____	34
Figure 4 : Contact du pied avec le ballon. _____	35
Figure 5 : Illustrant la vitesse angulaire des segments de la jambe durant la frappe. _____	37
Figure 6 : Représente les forces appliquées sur le ballon lors de son envol. _____	41
Figure 7 : Écoulement de l'air autour d'un ballon se déplaçant à une vitesse U , sans rotation. _____	42
Figure 8 : Écoulement de l'air autour d'un ballon se déplaçant à une vitesse U , avec rotation. _____	43
Figure 9 : Écoulement de l'air autour d'un ballon se déplaçant à une vitesse U , (a) sans rotation, (b) avec rotation. _____	45
Figure 10 : Trois types de coups de pied arrêtés. (a) Penalty à 11 m ; (b) coup franc « aux 18 mètres » ; (c) coup franc lointain. _____	46
Figure 11 : Coup franc de Roberto Carlos, tiré contre la France en 1997. _____	47
Figure 12 : Une illustration schématique des essais de coups de pied sur différentes cibles _____	53
Figure 13 : Circuit d'intensité influant sur la vitesse et la précision du tir _____	55
Figure 14 : Représente la phase d'approche. _____	61
Figure 15 : Représente le temps d'approche. _____	62
Figure 16 : Représente le distance d'approche. _____	62
Figure 17 : Représente le nombre de pas lors de la phase d'approche. _____	63
Figure 18 : Représente la phase du placement de la jambe d'appui et le balancement de pied de frappe. _____	64
Figure 19 : Représente l'angle de la cuisse lors de la phase du placement de la jambe d'appui et le balancement de pied de frappe. _____	65
Figure 20 : Représente l'angle de la jambe lors de la phase du placement de la jambe d'appui et le balancement de pied de frappe. _____	66
Figure 21 : Représente la phase du contact du pied avec le ballon. _____	68
Figure 22 : Représente l'angle d'inclinaison du corps lors de la frappe du ballon. _____	68

Figure 23 : l'angle d'attaque du pied de frappe. _____	69
Figure 24 : Représente la trajectoire du ballon lors du tir du coup franc direct. _____	70
Figure 25 : Représente le temps d'envol du ballon. _____	70
Figure 26 : Représente l'angle d'envol du ballon. _____	71
Figure 27 : Représente la division du but en quinze rectangles et les points du test de précision du tir du coup franc direct. _____	73
Figure 28 : Représente les procédures de collectes des données. _____	77
Figure 29 : Représente l'analyse vidéo par Dartfish 9. _____	78
Figure 30 : Représente l'analyse vidéo par Tracker 4.95. _____	79
Figure 31 : Représente le taux de contribution des variables biomécanique de la phase d'approche. _____	88
Figure 32 : Représente le taux de contribution des variables biomécaniques des phases du placement de la jambe d'appui et le balancement du pied de frappe. _____	89
Figure 33 : Représente le taux de contribution des variables biomécaniques de la phase de contact du pied avec le ballon. _____	89
Figure 34 : Représente le taux de contribution des variables biomécaniques de la phase d'envol du ballon. _____	90

Liste des symboles

θ : Angle.

a : Accélération.

E : Energie.

E_c : Energie cinétique.

E_p : Energie potentielle.

F : Force.

ΣF : Force résultante.

g : Accélération de la gravité.

I : Impulsion.

m : Masse.

ω : Vitesse angulaire.

\vec{p} : Quantité de mouvement.

P : Puissance.

r : Rayon.

d : Distance parcourue.

t : Temps.

V : Volume.

v_f : Vitesse finale.

v_i : Vitesse initiale.

x_f : Position finale.

x_i : Position initiale.

Avant-Propos

Tout travail académique et/ou scientifique, ne peut être exhaustif, car avant et après tout, est un effort humain. Ses imperfections sont les opportunités qui font la recherche vivante, car la perfection absolue est immobile par nature.

Face à un tel travail, on peut trouver deux propensions de l'esprit : celle qui veut détruire tout son édifice au prétexte qu'il n'est pas complet, et celle qui veut lui ajouter sa pierre. La première fait la connaissance morte. La seconde fait la connaissance vivante.

#LePenseur.

Partie 01

Chapitre 01

Cadre de la problématique.

1.Introduction

Le football est le sport le plus populaire au monde (Lees & Nolan, 1998), avec 211 associations affiliées à la FIFA à ce jour. L'organe directeur du football mondial est surnommé à juste titre les "Nations Unies du Football" (FIFA, 2018), plus de 200 millions de joueurs actifs à travers le monde (Wikipédia, 2018), et un public cumulé de plus de 3,2 milliards de téléspectateurs ayant regardé les 64 matchs de la Coupe du monde 2014 dont 1 milliard ont suivi la finale (FIFA, 2015).

Ce sport planétaire a vu récemment un développement remarquable dans tous ses aspects physiques, techniques et tactiques conduisant à un changement dans la nature du jeu et dans ses méthodes d'entraînement.

Comme les facteurs les plus importants qui ont contribué à cette évolution et la planification programmée et précise, l'appui sur les sciences liées aux domaines sportifs ainsi que le développement des dispositifs, d'outils et de techniques scientifiques permettant d'enregistrer et d'analyser le mouvement sportif afin d'améliorer et d'atteindre un meilleur niveau avec le moins de temps et d'effort possibles.

Parmi tous ces facteurs ; la biomécanique est l'une des sciences qui aide les sportifs à trouver les meilleurs moyens d'atteindre une performance athlétique idéale , car elle s'intéresse à l'application de toutes les connaissances, les informations et les méthodes de recherches liées à la structure et au fonctionnement de l'appareil locomoteur humain, elle révèle ses erreurs et de trouver des solutions (Din, 1993). L'analyse biomécanique du mouvement dans le football peut être définie comme étant les caractéristiques d'une habileté quantitative ainsi, quantifier le mouvement de certaines tâches comme le coup franc peut être utilisé pour améliorer les performances de cette habileté. (Bases, 2008).

Le football au niveau d'élite est généralement un jeu à faible score et la façon dont les buts sont marqués, la réussite des stratégies d'attaque et l'identification de leurs caractéristiques sont des questions de recherche importantes. Des recherches antérieures ont révélé qu'environ un tiers des buts sont marqués directement ou indirectement à partir d'un coup de pied arrêté (Ensum, Williams et Grant, 2000; FIFA, 2006,2007; Grant et Williams, 1999; Grant,

Cadre de la problématique.

Williams, Reilly et Borrie, 1998; Horn, Williams et Grant, 2000; Yiannakos et Armatas, 2006).

Selon Carling et ses collègues (**Carling, Williams et Reilly, 2005**), il y a eu une augmentation de l'efficacité des coups de pieds arrêtés dans le football national et international, les équipes qui réussissent sont plus efficaces que leurs adversaires pour marquer des buts à partir de coup de pied arrêté. Par conséquent, la préparation et la planification des coups de pieds arrêtés du point de vue offensif et défensif sont importantes pour gagner les matchs.

Le coup de pied au football est décrit comme étant une habileté motrice complexe comportant six étapes importantes : l'approche, l'implantation de la jambe d'appui, l'oscillation de la jambe frappante, la flexion et l'extension de la hanche et du genou, le contact du pied avec le ballon et le suivi (**Barfield, 1998**). La procédure du coup de pied peut également être divisée en cinq aspects essentiels : l'approche, la fixation de la jambe d'appuis, l'oscillation de la jambe de frappe, l'impact entre le pied et le ballon et l'envol de la balle (**Lees, Asai, Andersen, Nunome, & Sterzing, 2010**).

De tous les coups de pied arrêtés, les coups francs sont systématiquement les plus efficaces pour marquer des buts (**Carling, et al, 2005**). Cette habileté fait partie intégrante du football et est considéré comme une compétence cruciale, en particulier pour ceux qui tentent de marquer des buts (**BRAY & KERWIN, 2003**). Cependant, plusieurs facteurs influencent le succès d'un coup franc mais les trois facteurs prédominants à prendre en compte sont ; le positionnement du corps, la précision et la puissance (**Hong, Kazama, Nakayama, & Asai, 2012**). Il existe de nombreux principes biomécaniques qui peuvent être manipulés pour améliorer ces facteurs (**Davids, Button, & Bennett, 2008**).

L'analyse des Championnats d'Europe masculins en 2000 a montré que les tirs directs sur le but à partir de coups francs dans les zones centrales du terrain étaient plus efficaces qu'une passe courte suivie d'un tir au but (**Ensum, et al, 2000**). Un coup franc direct est généralement défendu par un mur de joueurs mis en place pour empêcher un tir droit au but.

Cependant, pour les joueurs qui peuvent frapper une balle avec un spin (un tir courbé) cela donne l'occasion de contourner le mur pour que la balle aille directement dans le but.

Cadre de la problématique.

Un petit nombre de footballeurs professionnels masculins tels que David Beckham, Roberto Carlos et Cristiano Ronaldo sont réputés pour leur maîtrise de cette technique. Ces derniers ont changé les résultats de nombreux matchs en se basant sur un seul tir de coup franc.

En utilisant un modèle mathématique d'envol du ballon, **Bray et Kerwin (2003)** préconisent qu'un tir direct bien exécuté sur le but à partir d'un coup franc donne peu de chances au gardien de sauver un but.

La connaissance des attributs d'un coup franc réussi et des endroits du terrain où les joueurs d'élite sont en mesure de marquer permet d'obtenir des renseignements sur les terrains qui offrent le plus de possibilités de marquer des buts.

En outre, il pourrait faciliter la prise de décision sur les endroits où les coups francs devraient être pratiqués pendant l'entraînement et le moment un tir direct sur le but devrait ou non être tenté en compétition.

Pour que ces informations soient utiles aux entraîneurs et aux joueurs, il est important qu'elles soient quantitatives et objectives afin de donner une vue impartiale des événements sur lesquels des décisions tactiques éclairées peuvent être prises (**Carling, et al, 2005**). La recherche a montré que plus la rétroaction est quantitative et objective plus elle a un effet important sur le rendement (**Franks, 1997**).

2.Problématique :

Le potentiel de réussite d'un coup franc direct dépend en grande partie de l'endroit d'où il est tiré, cela influe sur la distance que le joueur doit parcourir pour botter le ballon, sur la position du mur défensif des joueurs et sur l'angle par rapport au but.

Des recherches ont trouvé un nombre moyen de 30 à 40 coups francs par match (**Ensum, J., Williams, M., & Grant, 2000; Hernández Moreno et al., 2011; Siegle & Lames, 2012; Suárez, Dios, Boubeta, López, & Sanjurjo, 2014**).

(**Link, Kolbinger, Weber, & Stöckl, 2016**) ont effectué une étude statistique exhaustive sur les données de l'analyse des coups francs effectués dans 612 matchs qu'au cours des deux saisons de Bundesliga allemande (2013/14, 2014/15) avec un accent sur la topographie

Cadre de la problématique.

du positionnement des coups francs. Ils ont déduit que ces matchs avaient en moyenne $5,8 \pm 2,48$ coups francs à moins de 35 m de la ligne de but, mais que 7,6% de ces coups francs ont permis d'atteindre les buts avec un taux de 4,1% des tirs directs.

Toutefois, plus le temps disponible est grand plus la réalisation de la frappe de balle se fera dans des conditions optimales (A. MISCHEL, 1998). En effet, des statistiques réalisées lors de la coupe du monde de 1994 aux USA, ont montré que 46 buts sur 141 inscrits l'avaient été à la suite de phases arrêtées (coup franc et penalty). 45% des buts sont marqués à plus d'une touche de balle ce qui est révélateur du temps mis à disposition du joueur. Sachant qu'à haut niveau le temps disponible est réduit au maximum par la pression défensive.

Dans la Coupe du Monde de la FIFA 1998, par exemple, des 171 buts marqués, 42 provenaient de coups de pieds arrêtés, dont 50% étaient des coups francs (Grant et al. 1999). Malgré cela, les meilleurs joueurs n'arrivent pas à convertir leurs tirs du coup franc par un but qui pourra basculer l'issue du match en faveur de leurs équipes, des statistiques ont été publiées sur le site WhoScored.com le 16/11/2015 sur la conversion des coups francs lors de la saison 2013/2014 du top 5 des championnats européens, on y trouve que Cristiano Ronaldo sur ses 73 tentatives du tir du coup franc il n'ait arrivé qu'à marquer seulement 05 avec un taux de réussite de 6.8%, Lionel Messi, 70 tentatives, 04 marqués, avec un taux de réussite de 5.7%, et en bas du tableau Zlatan Ibrahimovic sur les 61 tentatives, il a marqué 03 buts, ce qui lui donne un taux de réussite de 4.9%. Sur le même site, le 16/04/2015, on y trouve les statistiques des tirs du coup franc des mêmes joueurs cités aux dessus, et cela pour la saison 2014/2015, en intégrant cette fois le taux de précision des tirs, Lionel Messi 31 tentatives, 02 buts, 6.7% taux de conversion et 32.3% taux de précision des tirs. Zlatan Ibrahimovic, 16 Tentatives, 01 but, 6.3 % taux de conversion, et 31.3 % taux de précision. Cristiano Ronaldo, 24 tentatives ; 01 buts, 4.2 % taux de conversion, et 29.2 % taux de précision.

Le coup franc est une technique qui permet de faire basculer une rencontre à son avantage. Pour tout footballeur, marquer un but lors d'une rencontre est une chose importante qui procure une joie immense. Comme on peut le constater, que ce soit sur le plan collectif ou individuel, dans les compétitions masculines ou féminines, le coup franc est souvent décisif au cours d'une rencontre de football, toute fois il n'est pas toujours transformé par le tireur.

Cadre de la problématique.

Plusieurs études antérieures et similaires ont analysé le coup franc direct afin de percer ses secrets (Javorova & Ivanov, 2018; De Luca & Faella, 2017; Ángel-López, Segura-Giraldo, Rodríguez-Sotelo, & García-Solano, 2017; Pakdemirli, 2015; Hong, Go, Sakamoto, & Nakayama, 2013; Hong et al., 2013; Lees, Asai, Andersen, Nunome, & Sterzing, 2010; Ghochani, Ghomshe, Nejad, & Rahimnejad, 2010; Nunome, Lake, Georgakis, & Stergioulas, 2006; Shan & Westerhoff, 2005; BRAY & KERWIN, 2003).

La biomécanique traite des principes de construction du corps humain et des relations entre les structures et les fonctions du corps. Leurs complexités exigent des approches analytiques spécifiques et complexes pour décrire, analyser et modéliser le système biomécanique.

Ainsi, les connaissances de la biomécanique appliquées au football permettent une meilleure compréhension de l'efficacité mécanique des gestes lors de leur exécution et aident à l'étude des compétences nécessaires pour la pratique.

Comme le coup franc direct est une habileté importante pour marquer des buts lors des matchs de football, il est primordiale de faire une analyse biomécanique de tous ces aspects, que ça soit sur les différentes phases qui composent cette technique ou bien lors de l'envol du ballon à partir du contact du pied du joueur avec le ballon au moment de la frappe jusqu'à son entrée dans les buts afin d'en permet des comparaisons intra et inter joueurs, qui peuvent aider à la correction et à l'amélioration de cette habileté visant ainsi l'amélioration de la performance des tireurs du coup franc direct.

Dans la même suite de ces études et pour répondre à cet enjeu, le travail de cette thèse se concentrera sur la problématique suivante : **Quelles sont les variables biomécaniques influentes sur la précision du tir du coup franc direct dans le football ?**

3.Hypothèses :

Pour répondre aux questions de la problématique nous avons émis les hypothèses suivantes :

- Il y a des corrélations statistiquement significatives entre les variables biomécaniques et la précision du tir du coup franc direct.

- Il y a des taux de contributions statistiquement significatifs entre les variables biomécaniques et la précision du tir du coup franc direct.

4.Objectifs :

Les objectifs généraux de ce projet de thèse sont :

- Identifier les quelques variables biomécaniques influentes sur la précision du coup franc direct.
- Définir les phases importantes de l'exécution du tir du coup franc.
- Définir les paramètres agissant sur la trajectoire du ballon lors du coup franc direct.
- Fournir des indices biomécaniques pour réussir le coup franc direct.

5.Les concepts définis dans la recherche :

5.1.La Biomécanique :

La biomécanique est une science interdisciplinaire qui étudie les concepts de la mécanique appliqués aux sciences du vivant. (Wikipédia, 2018). Elle évolue à la frontière entre la biologie et la mécanique en s'appropriant les connaissances d'un grand nombre d'autres disciplines scientifiques. On peut la définir en étant une des sciences qui étudie le mouvement humain.

Selon (Hatze et al., 1974) La biomécanique : c'est la science qui étudie la structure et la fonction des systèmes biologiques au moyen des méthodes de la mécanique. (Roy B, 1992) définit la biomécanique comme la science qui relie les forces internes et externes aux corps humains ainsi que les effets produits par ces forces.

On peut donc définir la biomécanique en étant la science qui étudie l'application des principes de la mécanique et les lois physiques sur le mouvement du corps humain.

5.2.La Cinématique :

Selon (JAMES G. HAY, 1980), La cinématique est la partie de la biomécanique qui traite de la description du mouvement du corps.

On définit la cinématique par la science qui étudie le mouvement pour lui-même ; C'est à dire étudier le mouvement indépendamment des causes qui le produisent.

Cadre de la problématique.

Pour comprendre la cinématique d'un objet en mouvement, il faut tout d'abord connaître ses composantes de base :

5.2.1. Le déplacement et la distance parcourue :

Pour déterminer ce qu'est le déplacement et la distance parcourue, il faut d'abord déterminer le mouvement qu'un mobile a effectué, c'est-à-dire sa trajectoire.

- La trajectoire
- La distance parcourue
- Le déplacement

5.2.2. La trajectoire :

La trajectoire d'un objet en mouvement correspond à l'ensemble des positions occupées par cet objet tout au long de son mouvement.

Concrètement, la trajectoire peut aussi être définie comme une ligne qui décrit le mouvement de l'objet.

5.2.3. La distance parcourue :

La distance parcourue est la mesure de l'ensemble des positions occupées par cet objet tout au long de son mouvement.

Formule :

La distance parcourue, définie par la variable d , est calculée par la formule :

$$d = |\Delta x_1| + |\Delta x_2| + |\Delta x_3| + \dots$$

Où :

d : Représente la distance parcourue (m).

Δx : Représente les mouvements effectués par le mobile en valeur absolue (valeur positive) (m).

5.2.4. Le déplacement :

Le déplacement représente la distance orientée qui sépare le point de départ du point d'arrivée.

Formule :

Le déplacement, défini par la variable Δx , est calculé par la formule :

$$\Delta x = x_f - x_i$$

Où :

Δx : Représente le déplacement (m).

x_f : Représente la position finale du mobile (m).

x_i : Représente la position initiale du mobile (m).

5.2.5. La vitesse :

La vitesse est le rapport entre la variation de la position d'un mobile et le temps nécessaire pour faire ce changement de position.

Formule :

L'équation générale utilisée pour calculer la vitesse est la suivante :

$$v = \Delta x / \Delta t$$

Où :

v : Représente la vitesse du mobile (en $m \cdot s^{-1}$).

Δx : Représente la variation de position du mobile ($x_f - x_i$) (en m).

Δt : Représente la variation du temps ($t_f - t_i$) (en s).

5.2.6. L'accélération :

L'accélération est le rapport entre le changement de vitesse d'un mobile et le temps nécessaire pour faire ce changement de vitesse.

Formule :

L'équation générale utilisée pour calculer l'accélération d'un mobile est la suivante :

$$a = \Delta v / \Delta t$$

Où :

a : Représente l'accélération du mobile (en $m \cdot s^{-2}$).

Δv Représente la variation de la vitesse du mobile ($v_f - v_i$) (en $m \cdot s^{-1}$).

Δt : Représente la variation du temps ($t_f - t_i$) (en s).

5.2.7. Le mouvement de projectile :

Le mouvement de projectile, ou mouvement de balistique, est le mouvement d'un objet lancé avec une vitesse possédant deux composantes, une horizontale et l'autre verticale.

Le mouvement de projectile doit être analysé en considérant les éléments suivants.

Cadre de la problématique.

- À l'horizontale, on analyse le mouvement comme un MRU.
- À la verticale, on analyse le mouvement comme un objet en chute libre.
- Le mouvement de projectile est symétrique : le point de symétrie est situé au moment où le projectile atteint son point le plus haut.
- Il faut décomposer la vitesse initiale en composantes : les valeurs de vitesse obtenues au départ sont les mêmes que celles à la fin du mouvement si l'objet est à la même hauteur.
- Au point le plus haut, la vitesse verticale est nulle : l'objet possède uniquement une composante de vitesse horizontale.

Il existe deux types de mouvement de projectile :

- Un projectile lancé obliquement possède une vitesse initiale horizontale et une vitesse initiale verticale.
- Un projectile lancé horizontalement possède une vitesse initiale horizontale, mais ne possède aucune vitesse initiale verticale.

5.2.7.1. Equation horaire (paramétrique) :

$$x(t) = v_0 \cdot \cos \alpha t$$

$$y(t) = -\frac{1}{2} g t^2 + v_0 \sin \alpha t$$

5.2.7.2. Equation de la trajectoire :

$$y = \frac{-g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2 + \tan \alpha x$$

5.2.7.3. Temps d'envol :

$$t_v = \frac{2 \cdot v_0}{g} \cdot \sin \alpha_0$$

5.2.7.4. Hauteur :

$$H = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha_0}{g}$$

5.2.7.5. Portée Maximal :

$$x_{max} = \frac{v_0^2}{g} \cdot \sin 2\alpha_0$$

5.3. La cinétique ou la dynamique :

La cinétique (dynamique) est la partie de la biomécanique qui traite les causes du mouvement tel que les forces externes (gravité, frottements ... etc.), et internes (les muscle ... etc.).

Elle étudie :

5.3.1. L'accélération gravitationnelle :

L'accélération gravitationnelle est l'accélération que subirait un corps s'il était en chute libre sur un astre comme la Terre ou la Lune.

Les différents corps sont attirés par la surface de la Terre car il existe une force d'attraction entre ces corps et la Terre, soit la force gravitationnelle. Cette force produit une accélération gravitationnelle qui attire les objets vers la Terre ou, plus précisément, vers le centre de la Terre.

Important :

L'accélération gravitationnelle pour la Terre est la suivante :

$$g_T = 9,8m \cdot s^{-2} = 9,8N \cdot kg^{-1}$$

5.3.2. Les forces :

Une force est une action qui est tentée de causer ou cause un mouvement ou un changement de mouvement, son unité est le Newton (N).

Il y a deux types de forces :

- Interne : force musculaire.
- Externe : attraction terrestre.

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

\vec{F} : Représente les forces (N).

m : Représente la masse (Kg)

\vec{a} : Représente l'accélération ($m \cdot s^{-2}$).

5.3.3. Energie :

L'énergie est la capacité d'un corps à produire un travail et il y a trois types d'énergie :

- Énergie cinétique : $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$
- Énergie potentielle : $E_p = m \cdot g \cdot h$
- Énergie mécanique : $E_m = E_c + E_p$

Où :

E_c : Représente l'énergie cinétique (J).

E_p : Représente l'énergie potentielle (J).

E_m : Représente l'énergie mécanique (J).

m : Représente la masse (Kg).

v : Représente la vitesse ($m. s^{-1}$)

g : représente l'intensité du champ gravitationnel ($9,8 N. Kg^{-1}$) ou ($9,8 m. s^{-2}$).

h : Représente la hauteur (m).

5.3.4. Le travail :

Le travail est une force qui agit sur un objet, ce qui provoquera un déplacement de cet objet. Il y a donc un transfert d'énergie exercé sur l'objet. Pour qu'il y ait un travail, deux conditions doivent survenir :

- Au moins une composante de la force doit se produire dans le sens du mouvement.
- L'objet qui reçoit l'énergie doit se déplacer.

Formule :

$$W = F. \Delta x$$

Où :

W : Représente le travail (J).

F : Représente la force (N).

Δx : Représente le déplacement de l'objet (m).

Si la force n'est pas parallèle au déplacement, il faut tenir compte de l'angle :

$$W = F. \cos\theta. \Delta x$$

Où :

W : Représente le travail (J).

$F. \cos\theta$: Représente la composante de la force parallèle au déplacement (N).

Δx : Représente le déplacement de l'objet (m).

5.3.5. La puissance :

La puissance correspond à la cadence du travail effectué ou plus généralement à la cadence à laquelle l'énergie est transformée d'une forme à une autre, ou transférée d'un système à un autre. C'est un débit d'énergie. On peut l'exprimer selon la formule ci-dessous :

$$P = W / dt$$

Où :

P : Représente la puissance (W).

W : Représente le travail (J)

dt : Représente l'intervalle de temps (s).

Cadre de la problématique.

La puissance P s'exprime en watt (w). Un watt = un joule / seconde. Il est un autre moyen de calculer la puissance. Il s'agit d'un travail effectué par intervalle de temps, c'est à dire d'une force qui s'exerce sur une distance pendant un temps donné, soit à une certaine vitesse. On peut donc utiliser la formule suivante :

$$P = \int \vec{F} \cdot \vec{v}$$

Où :

P : Représente la puissance (W)

\vec{F} : Représente la force (N)

\vec{v} : Représente la vitesse ($m \cdot s^{-1}$).

5.3.6. La quantité de mouvement :

La quantité de mouvement est une grandeur physique qui est associée à la masse et à la vitesse d'un objet. On l'utilise pour étudier le comportement des objets qui entrent en collision les uns avec les autres. Tout comme l'énergie, la quantité de mouvement doit être la même au début et à la fin d'un problème.

Formule :

Pour déterminer la quantité de mouvement d'un objet, on doit utiliser l'équation suivante :

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

Où :

\vec{p} ; Représente la quantité de mouvement de l'objet ($kg \cdot m \cdot s^{-1}$).

m ; Représente la masse de l'objet (kg).

\vec{v} ; Représente la vitesse de l'objet ($m \cdot s^{-1}$).

5.3.7. L'impulsion :

L'impulsion représente la quantité de mouvement transmise à un objet. Pour modifier la quantité de mouvement d'un objet, on doit lui appliquer une force pendant un certain temps

Formule :

L'équation pour déterminer l'impulsion est la suivante :

$$\vec{J} = \vec{F} \cdot \Delta t$$

Où :

\vec{J} ; représente l'impulsion transmise (N.s).

\vec{F} ; représente la force (N).

Δt ; représente le temps (s).

5.4. La Précision :

La précision est l'une des composantes les plus essentielles dans de nombreuses disciplines sportives et en particulier dans le football, elle se mesure par les tirs du ballon dans le filet et l'atteinte du but.

Abdel Maksoud (1986) indique qu'un degré élevé de précision nécessite une reconnaissance appropriée des aspects temporels et spatiales ainsi que les aspects des phases dynamiques du mouvement, et il l'a définie comme étant le degré de correspondance entre le résultat final et les objectifs qui ont été identifiés préalablement.

(Schmidt & Lee, 2005) composent la précision en trois types :

5.4.1. Précision spatiale : type de précision nécessaire aux mouvements volontaires relatifs à la localisation spatiale du point du mouvement final.

5.4.2. Précision temporelle : type de précision exigeant une vitesse de mobilité relative à l'exactitude du temps du mouvement.

5.4.3. Le Timing : type de précision exigeant une vitesse de mobilité relative à l'exactitude du poids requis locomoteur.

On définit la précision comme étant l'atteinte d'un objectif en moins de temps et d'énergie avec un degré élevé de réussite.

5.5. Le Coup Franc :

Les coups francs sont accordés pour sanctionner les fautes et comportements antisportifs définis par la Loi 12 du football. Ils peuvent être directs (fautes avec contact physique ou manque de respect envers d'autres joueurs) ou indirects (fautes sans contact physique, notamment celles des gardiens).

Pour le coup franc direct comme pour le coup franc indirect, le ballon doit être immobile au moment de la frappe, l'exécutant ne doit pas toucher le ballon une seconde fois avant que celui-ci n'ait été touché par un autre joueur.

6. Les études antérieures et similaires :

Etude de la trajectoire de l'envol des ballons de football.

Study of soccer ball flight trajectory.

Juliana Javorova, Anastas Ivanov.

Article, 13th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, 2018.

Résumé :

L'objet de cette étude est l'analyse des trajectoires du ballon de football lors des coups de pied les plus importants dans le football « un coup de pied de coin et un coup franc direct ». Le ballon est modélisé comme une sphère creuse et rigide avec six degrés de liberté, effectuant un mouvement général dans une zone donnée. Les paramètres de l'air ambiant sont constants. La modélisation en 3D est déterminée par les trois angles cardinaux. L'aérodynamique des forces et des moments agissant sur le ballon est pris en compte. Deux zones dangereuses pour marquer un but sont définies sur les bois. Les équations différentielles du mouvement du ballon sont résolues numériquement par Matlab-Simulink.

Mots-clés : *Trajectoire ; Envol ballons ; Football.*

Analyse cinématique des coups de pied de football à l'aide d'un système de capture de mouvement.

Kinematic Soccer Kick Analysis Using a Motion Capture System.

Juan Pablo Ángel-López, Belarmino Segura-Giraldo, Luz Dary Rodríguez-Sotelo & Karol

Bibiana García-Solano.

Article, VII Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB, 2017.

Résumé :

Cet article présente une analyse cinématique du penalty et du coup franc en football pour écrire un algorithme afin d'identifier les phases du mouvement lors de l'exécution des coups de pied. Au début de l'article, il y a une brève revue de littérature des études antérieures qui servent de fondement à ce travail. Ensuite, l'utilisation du système de capture de mouvement (MoCap) pour développer cette recherche en appliquant la méthodologie de détection des phases du mouvement. Et enfin, les résultats du processus MoCap pour la mise en œuvre des descriptions

Cadre de la problématique.

mathématiques. Ces résultats visent une tendance sur l'exécution du coup de pied en termes de phases de mouvement décomposé comme suit : approche, contre-mouvement, le basculement de la jambe attaquante, l'impact avec le ballon et la phase post-impact. Un algorithme est écrit pour détecter précisément les phases du mouvement en utilisant les informations de la capture de mouvement.

Mots-clés : Cinématique ; Biomécanique ; Capture de mouvement ; Football ; Coup Franc.

Les buts sur coup franc en football : un succès improbable entre échec et embarras.

Free kick goals in football: an unlikely success between failure and embarrassment.

Sørensen, Søren Nørgaard, Rasmussen John.

Article, Sports Engineering, 2017.

Résumé :

Il a été développé et utilisé un modèle numérique pour étudier la fenêtre d'opportunités des coups francs dans le football associatif. Le modèle planaire multi-corps dynamique avant est composée d'un modèle de jambe à deux segments avec manœuvres articulées, d'un ballon de football, d'un mur et du gazon. La mécanique des contacts est définie pour modéliser l'impact du pied et l'interaction de la balle avec les différents éléments de l'environnement. Le tir optimal est déterminé à l'aide de l'évolution différentielle de l'algorithme global d'optimisation qui nécessite des millions de simulations de tir. La sensibilité de diverses solutions aux perturbations paramétriques est étudiée. Il est conclu que les coups de pied d'orteils sont théoriquement supérieurs aux coups de pied dans les pieds, mais sont difficiles à exécuter de façon fiable. Les résultats montrent également que de petites perturbations dans les paramètres peuvent entraîner des échecs gênants.

Mots-clés : Coup franc ; Dynamique ; Prédiction de mouvement ; Simulation par ordinateur ; Football.

Un coup franc idéal.

An ideal free kick.

R. De Luca and O. Faella.

Article, European Journal of Physics, 2017.

Résumé :

La cinématique d'un coup franc est étudiée comme étant un mouvement de projectile. Le coup franc est idéal puisque on suppose que le ballon est un point qui se déplace en absence de la résistance de l'air. Les résultats montrent que la vitesse initiale du ballon est dans les alentours de $v_0 = 20,4 \text{ m. s}^{-1}$ soit $(73,4 \text{ km. h}^{-1})$, et que le ballon peut atteindre une vitesse d'environ $34,4 \text{ m. s}^{-1}$ soit $(123,8 \text{ km. h}^{-1})$, afin qu'il parcourt toute la distance du coup franc en un temps minimum allant de 0,70 s à 1,63 s.

Mots-clés : Cinématique ; Trajectoire ; Coup franc.

Une topographie des coups francs dans le football.

A topography of free kicks in soccer.

Daniel Link, Otto Kolbinger, Hendrik Weber, Michael Stöckl.

Article, Journal of Sports Sciences, 2016.

Résumé :

Cette étude s'est intéressée à la relation spatiale des variables de performance pour les coups francs dans le football. Afin de suggérer des façons d'optimiser les performances des joueurs, des données ont été collectées sur les coups francs (<35 m jusqu' à la ligne de but) de deux saisons de Bundesliga allemande (2013/14,2014/15) (n = 1624). Dans l'analyse, les chercheurs ont appliqué l'approche ISO-map en utilisant des dégradés de couleurs pour visualiser les valeurs moyennes d'une variable sur une carte 2D du pitch. De plus, des variogrammes ont été utilisés pour décrire le degré de dépendance spatiale des variables du coup franc. Les résultats montrent que ; la densité, le type de jeu, le nombre de joueurs dans le mur, distance au mur et fautes commises étaient fortement dépendants de l'espace. La centralité et la proximité du but ont augmenté les variables suivante ; joueurs dans le mur, violations des règles, temps d'interruption et le ratio des buts marqués est passé de 5,9% (loin du centre) à 10,9% (près du centre). Dans 70,9% des tirs, les joueurs ont préféré une latéralité décalée, ce qui ne s'est pas

Cadre de la problématique.

traduit par un taux de succès plus élevé. De plus, il n'y avait aucun avantage statistique pour l'équipe défensive lorsque la distance au mur était inférieure à 9,15 m ou lorsqu'il y avait une faute commise. Les tirs de balles croisés ont eu un taux de réussite de 20,8 %. Tandis que les tirs latéraux ont eu 5% de taux de réussite. Les passes croisées du côté droit à l'extérieur de la surface de réparation ont eu 10 % de réussites plus que celles du côté gauche. Par conséquent, il pourrait être intéressant de pratiquer la défense des ballons venant de ce côté-ci.

Mots-clés : Topographie ; Coup franc ; Football.

Déterminer les vitesses et les angles pour le problème du coup franc.

Determining the velocities and angles for a free kick problem.

Mehmet Pakdemirli and Yiğit Aksoy.

Article, Canadian Journal of Physics, 2015.

Résumé :

Nous étudions la dynamique du coup franc pour trois différents cas : (i) sans trainée ni poussée aérodynamique, (ii) avec trainée linéaire, (iii) avec poussée et trainée en régime linéaire. Dans le premier cas, nous développons des formules analytiques pour différentes valeurs de la vitesse initiale et d'angle initial. Dans le second cas, nous obtenons deux équations algébriques couplées pour la trajectoire et elles sont solutionnées numériquement pour différentes conditions initiales de vitesse et d'angle. Dans le troisième cas, les équations du mouvement sont solutionnées approximativement par techniques perturbatrices en supposant que le coefficient de poussée est faible devant celui de trainée. Puisque la variable de temps ne peut pas être éliminée des équations, quatre équations algébriques couplées sont solutionnées numériquement pour différentes conditions initiales. Nous comparons les trois cas et soulignons l'effet des coefficients de trainée et de poussée.

Mots-Clés : Vitesses ; Angles ; Coup Franc.

Cadre de la problématique.

Recherche stratégique sur les statistiques de probabilité des scores directs de coup franc basées sur des principes biomécaniques.

Strategic research on the probability statistics of free kick direct score based on biomechanical principles.

Deding Tang, Ling Xu.

Article, BioTechnology: An Indian Journal, 2014.

Résumé :

Pour étudier les clés du succès du coup franc direct, cet article a étudié le mouvement de la trajectoire du coup franc tourbillonnant à partir des modèles physiques et des statistiques de probabilité. Il a été considéré qu'il y a beaucoup de facteurs influençant le gardien de but et le tireur : la vitesse du ballon, la rotation, le mur des joueurs, la façon dont le ballon passe à travers le mur, l'état psychologique du gardien de but, la façon dont le gardien de but plonge, la difficulté du tir, la condition physique et l'expérience du gardien de but, la puissance du tireur, la précision du tir. Après avoir analysé la portée que le gardien de but peut atteindre dans un certain temps et en considérant la probabilité que le gardien puisse sauver un but, il a été démontré qu'il y a une stratégie optimale afin de marquer un but sur coup franc direct.

Mots-Clés : Coup franc ; Statistiques probabilistes ; Principes biomécaniques ; Modèle mathématique.

Précision du coup franc direct pour atteindre le but en football : concentration sur la différence de point de tir.

Accuracy of the direct free kick for hitting the target in soccer: Focusing on the difference of kick point.

Toru KONISHI, Masato MAEDA.

Article, The Proceedings of the Symposium on Sports and Human Dynamics, 2014.

Résumé :

Le but de cette étude était d'élucider les techniques permettant de donner des coups de pied le long de différentes trajectoires sur des coups francs directs à partir de différentes positions. Les sujets étaient quatre joueurs d'un club de football universitaire. Ces derniers devaient tirer sur chacune des quatre cibles à différentes hauteurs et positions dans le but (3,5 m à gauche et 3,5 m à droite du centre du but ; 1,2 m et 2,2 m du sol) derrière un mur placé à 9,15 m devant le

Cadre de la problématique.

tireur. Les performances ont été enregistrées par six caméras vidéo à vitesse normale. Le comportement du ballon botté a été enregistré par deux caméras vidéo à vitesse normale placées derrière le tireur et deux autres caméras vidéo à vitesse normale placées à côté du tireur et analysées en utilisant la méthode de transformation linéaire directe tridimensionnelle. La cinquième caméra vidéo a été placée face au tireur pour capturer les variables liées à la rotation du ballon. La sixième caméra vidéo a été placée à côté du tireur pour capter le ballon au moment du coup de pied. Les résultats ont montré :

- 1) Dans l'axe des X, la direction initiale du ballon juste après avoir été frappé est le paramètre le plus important pour tous les sujets et les conditions à atteindre le but.
- 2) Dans l'axe Z, non seulement la direction initiale du ballon est importante, mais aussi d'autres paramètres concernant la rotation du ballon sont des paramètres importants pour l'efficacité du tir des coups francs.

Mots-Clés : Précision ; Coup franc direct ; But ; Football.

Mécanismes influençant la précision du coup de pied de football.

Mechanisms that influence accuracy of the soccer kick.

Athanasios Katis, Emmanouil Giannadakis, Theodoros Kannas, Ioannis Amiridis, Eleftherios Kellis, Adrian Lees.

Article, Journal of Electromyography and Kinesiology, 2013.

Résumé :

Les buts marqués représentent la finalité ultime au football et ceci est atteint lorsque les joueurs exécutent des coups de pied précis. L'objectif de la présente étude était de comparer des coups de pied de football précis et imprécis visant les cibles supérieures et inférieures. Vingt et un joueurs de football ont effectué des coups de pied consécutifs contre des cibles supérieures et inférieures (0,5 m²) placées au centre du but. Les essais de coups de pied ont été classés comme étant exacts ou inexacts. L'activation du tibia antérieur (TA), du rectus fémoral (RF), du biceps fémoral (BF) et du muscle gastrocnémien (GAS) de la jambe oscillante et les forces de réaction au sol (GRF) de la jambe de soutien ont été analysées. Les GRF ne différaient pas entre les conditions de coup de pied ($P > 0,05$). L'AT et le BF étaient significativement plus élevés et l'activité EMG du GAZ était plus faible pendant les coups de pied précis à la cible supérieure ($P < 0,05$) par rapport aux coups de pied imprécis. De plus, il y a eu une activation de TA et RF significativement plus faible lors des coups de pied précis contre la cible inférieure ($P < 0,05$)

Cadre de la problématique.

par rapport aux coups de pied imprécis. Le renforcement de l'activation musculaire du TA et du BF et la réduction de l'activation du GAZ peuvent aider les joueurs à donner des coups de pied précis contre les cibles supérieures. En revanche, les joueurs qui affichent une activation TA et RF plus élevée peuvent être moins précis par rapport à une cible inférieure. Il a été conclu que l'activation musculaire de la jambe qui donne des coups de pied représente un mécanisme important qui contribue largement à la précision des coups de pied de football.

Mots-clés : Mécanisme ; Précision ; Coup de pied ; football.

Caractéristiques de l'envol du ballon lors d'un tir courbé en football.

Characteristics of ball impact on curve shot in soccer.

Sungchan Honga, Youngjun Gob, Keiko Sakamoto, Masao Nakayama,

Takeshi Asaic.

Article, Procedia Engineering, 2013.

Résumé :

Le but de cette étude était d'analyser les caractéristiques de balancement de la jambe de frappe afin d'élucider les mécanismes du tir courbé. L'orientation de l'articulation de la cheville au point d'impact avec le ballon ressemble étroitement à l'orientation lors d'un tir en courbe générale. De plus, pour l'articulation de la cheville il y a moins de mouvement médiolatéral (direction y) par rapport à un tir flottant, et plus de mouvement dans la direction verticale (direction z). Basé sur le fait que l'angle de l'axe de rotation vertical à ce point est plus grand que celui des autres tirs. Ceci est probablement l'un des facteurs qui génèrent le top spin (tir courbé) sur la balle. Par conséquent, nous croyons que certaines des caractéristiques les plus importantes et les plus fondamentales des tirs courbés est un petit angle d'attaque et un plus grand mouvement vertical de l'articulation de la cheville au point d'impact par rapport à un tir flottant.

Mots-clés : Tir courbé ; Coup de pied ; Top spin ; Impact ; Football.

Modélisation du vol d'un ballon de football sur coup franc direct.

Modelling the flight of a soccer ball in a direct free kick.

KEN BRAY & DAVID KERWIN.

Article, Journal of Sports Sciences, 2011.

Résumé :

Cette étude comportait une étude théorique et expérimentale du coup franc direct dans le football. L'objectif était d'élaborer un modèle mathématique du vol de la balle intégrant des forces aérodynamiques de portance et de traînée pour explorer cet important "set-play". Les trajectoires dérivées du modèle ont été comparées à celles obtenues par une analyse vidéo détaillée des coups de pied expérimentaux. Des valeurs représentatives des coefficients de traînée et de portance ont été obtenues, ainsi que l'orientation implicite de l'axe de rotation de la balle en vol. Le coefficient de traînée variait de 0,25 à 0,30 et le coefficient de portance de 0,23 à 0,29. Ces valeurs utilisées avec un modèle simple de mur défensif ont permis de simuler des coups francs dans des conditions réalistes, typiques d'un match de football. Les résultats révèlent à quel point les attaquants doivent être très attentifs à la dynamique d'un coup de pied réussi. Pour un coup franc central à environ 18,3 m du but avec un mur et une vitesse initiale de $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, l'élévation initiale du ballon doit être limitée entre $16,5^\circ$ et $17,5^\circ$.

Mots-Clés : Aérodynamique, Vol de ballons, Murs défensifs, Modèle, Football.

Analyse des moments et forces appliqués sur les membres et les articulations des membres inférieurs lors d'un coup franc dans le football.

Analysis of torques and forces applied on limbs and joints of lower extremities in free kick in football.

*Azade Ghochania, FarhadTabatabaee, Ghomsheb Seyed, Kamal Addin Rezvani Nejad,
Maedeh Rahimnejadd.*

Article, Procedia Engineering, 2010.

Résumé :

Un modèle à 3 segments a été mis en place pour simuler les forces et moments linéaires et rotatifs de la jambe pendant le coup de pied est présenté. L'effet de ces forces et moments sur

Cadre de la problématique.

les articulations des extrémités inférieures est étudié. Selon la période de temps de l'impact appliqué et les changements dans les moments de la balle et le pied avant et après l'impact, la force d'entrée au système est calculée. Ensuite, en résolvant les équations dynamiques du système, on calcule les forces et les moments appliqués à chaque membre et articulation des membres inférieurs. Selon les résultats de cette étude, il est possible d'examiner les lésions des articulations des membres inférieurs.

Mots-Clés : Coup de pied ; Blessures sportives ; Biomécanique.

La biomécanique du coup de pied au football : revue de littérature.

The biomechanics of kicking in soccer: a review.

Lees A, Asai T, Andersen TB, Nunome H, Sterzing T.

Article, Journal of Sports Sciences, 2010.

Résumé :

Le coup de pied est une action déterminante au football, il convient donc de passer en revue les travaux scientifiques qui forment la base de notre compréhension de cette compétence. Cet examen est de nature biomécanique et s'appuie sur les examens précédents et les prolonge. Bien que l'on sache beaucoup de choses sur la biomécanique de la jambe de frappe, il y a plusieurs autres aspects du coup de pied qui ont fait l'objet de travaux d'exploration récents. Les chercheurs ont élargi leur intérêt pour considérer le coup de pied à partir de la façon dont un joueur approche le ballon jusqu'à la fin du vol du ballon ; le point qui détermine le succès du coup de pied. Cet intérêt présente les caractéristiques encapsulées de la technique globale et les influences du haut du corps, de la jambe de soutien et du bassin sur la l'impact du ballon de football et les influences des chaussures et des ballons, les caractéristiques de lancement et l'effet de l'envol du ballon. Le présent examen évalue ces éléments et tente de fournir une orientation pour les recherches futures.

Mots-Clés : Coup de Pied ; Biomécanique ; Technique ; Football.

Cadre de la problématique.

Caractéristiques cinématiques du corps entier lors du coup de pied du ballon par les joueurs de football masculins et les paramètres liés à la qualité du coup de pied.

Full-body kinematic characteristics of the maximal instep Soccer kick by male soccer players and parameters related to kick quality.

Gongbing Shan & Peter Westerhoff.

Article, Sports Biomechanics, 2007.

Résumé :

De nombreuses études tentent de comprendre les habiletés fondamentales du football, la plupart se concentrent sur les coups de pied. Cependant, l'analyse d'un coup de pied efficace demeure incomplète en raison des contraintes liées à la conception des tests et des difficultés de synchronisation et d'analyse de l'information générée par les techniques d'évaluation multiples. Les études scientifiques antérieures peuvent généralement être classées dans les catégories suivantes : analyse cinématique bidimensionnelle à l'aide de caméras à grande vitesse, études de l'activité musculaire à l'aide de l'électromyographie, analyse tridimensionnelle de la jambe de frappe à l'aide d'un modèle de corps partiel et études cinétiques à l'aide de mesures de force et de modélisation. Aucune enquête existante n'a utilisé la capture et la modélisation tridimensionnelle des mouvements du corps entier pour examiner les coups de pied. La présente étude comble cette lacune et définit un modèle corporel complet capable de révéler des caractéristiques plus détaillées du coup de pied. De plus, il révèle les effets de l'entraînement à long terme en comparant les novices avec les athlètes habiles et explore de nouveaux paramètres qui ont le potentiel d'aider les évaluations quantitatives de l'habileté. Les résultats montrent que le mouvement efficace du haut du corps est un facteur clé dans la création de meilleures conditions initiales pour une contraction musculaire plus explosive pendant le coup de pied. Il permet un mouvement plus puissant de la jambe qui donne des coups de pied. Enfin, le changement en temps opportun de la distance entre la hanche et l'épaule du côté opposé au coup de pied fournit un moyen quantitatif de mesurer la qualité du coup de pied.

Mots-Clés : Modélisation intégrale du corps ; Coordination multi articulaire ; Capture tridimensionnelle du mouvement.

Cinématique de la phase d'impact du coup de pied dans le football.

Impact phase kinematics of instep kicking in soccer.

Hiroyuki Nunome, Mark Lake, Apostolos Georgakis & Lampros K. Stergioulas.

Article, Journal of Sports Sciences, 2007.

Résumé :

L'objectif de cette étude était de capturer la cinématique des membres inférieurs avant et après l'impact du ballon de football en examinant l'influence de la fréquence d'échantillonnage et des procédures de lissage. Neuf joueurs de football masculins ont effectué un maximum de coups de pied et les mouvements tridimensionnels des jambes ont été capturés à 1000 Hz. Les vitesses et les accélérations angulaires et linéaires ont été déterminées à l'aide de quatre méthodes de traitement différentes : traité à l'aide d'une version modifiée d'un algorithme de filtrage temps-fréquence (WGN), lissé par un filtre passe-bas de deuxième ordre Butterworth à coupure 200 Hz (BWF), rééchantillonné à 250 Hz sans lissage (RSR) et rééchantillonné à 250 Hz mais filtré par le même filtre Butterworth à coupure 10 Hz (RSF). L'approche WGN semblait établir une cinématique représentative, alors que les autres procédures ne parvenaient pas à éliminer l'oscillation bruyante de la ligne de base du signal (BWF), perdaient les pics de changements rapides (RSR) ou produisaient des schémas de mouvement totalement déformés (RSF). Les résultats indiquent que les procédures utilisées par certaines études antérieures peuvent avoir été insuffisantes pour saisir adéquatement le mouvement des membres inférieurs près de l'impact de la balle. Il a été proposé une nouvelle technique de filtrage temps-fréquence comme meilleur moyen de lisser les données dont le contenu en fréquence varie considérablement.

Mots-Clés : Cinématique du pied et de la jambe ; Filtrage des fréquences temporelles ; Coup de pied de football ; Impact du ballon.

Juger où ira un ballon : le cas des coups francs courbés en football.

Judging where a ball will go: the case of curved free kicks in football.

Cathy M. Craig, Eric Berton, Guillaume Rao, Laure Fernandez, Reinoud J. Bootsma.

Article, Naturwissenschaften, 2006.

Résumé :

Cette étude a examiné si le fait d'ajouter un spin à un ballon en situation de coup franc dans le football affecte la perception d'un footballeur professionnel de la position future du ballon à son arrivée. À l'aide d'un dispositif de réalité virtuelle, les participants ont observé les trajectoires de vol des coups francs aérodynamiques réalistes avec ± 600 tr/min. Le point de vue étant fixé au centre du but, les participants devaient juger si le ballon se serait retrouvé dans le but ou non. Les résultats montrent que les trajectoires influencées par la force de Magnus provoquée ont entraîné un changement significatif du pourcentage de réponses des buts. Les participants ne semblent pas tenir compte de l'accélération qui en résulte et qui fait que le ballon change continuellement de direction au fur et à mesure que la trajectoire se déroule. Il a été conclu que le système visuel n'est pas adapté à un tel mouvement accéléré, ce qui peut expliquer pourquoi les gardiens de but semblent mal anticiper la trajectoire du ballon lors des tirs de coups francs courbés.

Mots-Clés : Trajectoire Ballon ; Coups Francs Courbés ; Football.

Le coup de pied courbé d'un ballon I : impact avec le pied.

The curve kick of a football I: impact with the foot.

T. Asai, M. J. Carré, T. Akatsuka, S. J. Haake.

Article, Sports Engineering, 2002.

Résumé :

Le but de cette étude est d'évaluer les caractéristiques fondamentales qui font tourner un ballon de football dans un coup de pied courbé. Le processus d'impact de la balle a d'abord été analysé avec une caméra vidéo haute vitesse fonctionnant à 4500 images par seconde pour obtenir les données de base d'un modèle de simulation numérique. Ce modèle de simulation a montré un accord convenable, bien qu'il se soit légèrement détérioré au cours de la deuxième moitié de

Cadre de la problématique.

l'impact. Il a été noté que la rotation de la balle se produit même si le coefficient de frottement cinétique est presque égal à 0 en raison de la déformation locale de la balle lors de l'impact autour du pied, ce qui permet de transmettre les forces au ballon autour de son axe. On a constaté que la rotation de la balle augmentait avec la distance de décalage entre le pied et l'axe de la balle et avec l'augmentation du coefficient de frottement cinétique. La distance de décalage entre le pied et l'axe de la balle affecte la rotation plus que le coefficient de frottement. La variation du coefficient de frottement de 0,0 à 1,0 produit une augmentation du spin de 13 rad/s au maximum. Il a été suggéré que la distance départ la plus appropriée, ce qui donne la plus grande rotation au ballon, était d'environ 100 mm. Un compromis a été trouvé entre la vitesse de la balle et le spin pour différentes distances de départ.

Mots-Clés : Coup de Pied Courbé ; Ballon ; Football ; Impact Avec le Pied.

Le coup de pied courbé d'un ballon de football II : vol dans les airs.

The curve kick of a football II: flight through the air.

M. J. Carré, T. Asai, T. Akatsuka, S. J. Haake.

Article, Sports Engineering, 2002.

Résumé :

Le but de cette étude est d'évaluer les caractéristiques fondamentales entrant en jeu dans la rotation d'un ballon de football après un coup de pied de balle lors de l'impact, puis d'examiner la manière dans le changement de rotation affecte le vol du ballon. Deux essais expérimentaux ont été réalisés pour examiner les propriétés aérodynamiques des ballons de football en vol. Dans le premier essai, un ballon de football a été projeté sans rotation à des vitesses de lancement variables et la trajectoire de chaque vol a été mesurée et analysée. Un coefficient de traînée a été calculé pour chaque essai sur la base d'un modèle de trajectoire. Le deuxième essai consistait à tirer un ballon de football avec la même vitesse de lancement, mais dans des conditions de rotation variables (axe de rotation horizontal dans tous les cas). Encore une fois, la trajectoire de chaque vol a été mesurée et des coefficients de traînée et de portance ont été calculés. Cette information a été utilisée pour simuler trois situations de jeu typiques et les effets de l'impact du pied sur la distance et les conditions météorologiques ont été examinées.

Mots-Clés : Coup de Pied Courbé ; Envol du Ballon ; Football.

Cinématique tridimensionnelle du coup franc direct en football face à un mur défensif.

Three-dimensional kinematics of the direct free kick in soccer when opposed by a defensive wall.

E. W. Brown, D. J. Wilson, B. R. Mason, J. Baker.

Article, 11th International Symposium on Biomechanics in Sports, 1993.

Résumé :

L'objectif de cette étude était d'étudier certains paramètres cinématiques des techniques de coups de pied utilisées pour effectuer un coup franc face à un mur défensif. L'échantillon de cette étude se composait de quatre joueurs hautement qualifiés (tous droitiers) en formation à l'Australian Institute of Sport (AIS). Ils ont été sélectionnés parmi 18 joueurs de l'équipe comme étant les meilleurs tireurs du coup franc direct. Les données cinématiques ont été enregistrées par deux caméras cinématographiques 16mm synchronisées à 100 Hz. Les résultats ont montré que tous les joueurs s'approchaient du ballon d'une manière semblable. Cependant, il y eu peu de corrélations entre les paramètres d'approche et la précision des tirs du coup franc, ceux qui existaient déjà ne présentent pas une tendance constante chez tous les sujets. Au moment de l'impact, les joueurs ont également une orientation similaire des segments corporels ainsi que plus au moins les mêmes caractéristiques de la trajectoire du ballon. En général, il semble y avoir des similitudes relativement étroites dans les caractéristiques de performance dans les coups francs qui ont été évalués.

Mots-clés : Cinématique Tridimensionnelle ; Football ; Coup Franc Direct ; Mur défensif.

7. Synthèse des études antérieures et similaires :

Les études antérieures et similaires présentées plus haut sur le tir du coup franc, nous ont d'ores et déjà permis d'identifier quelques variables biomécaniques importantes à étudier afin de comprendre la relation entre les paramètres entrant en jeu dans la réussite du coup franc direct dans le football. Telles que l'angle et la vitesse d'approche (De Luca & Faella, 2017; Lees, Asai, Andersen, Nunome, & Sterzing, 2010; Pakdemirli, 2015), les vitesse du pied avant et après l'impact avec le ballon (Ángel-López, Segura-Giraldo, Rodríguez-Sotelo, &

Cadre de la problématique.

García-Solano, 2017; Hong, Go, Sakamoto, & Nakayama, 2013; Nunome, Lake, Georgakis, & Stergioulas, 2006; Shan & Westerhoff, 2005), la vitesse et l'angle initial de l'envol du ballon (BRAY & KERWIN, 2003; De Luca & Faella, 2017; Hong et al., 2013; Javorova & Ivanov, 2018), la force et la puissance des frappe (Ghochani, Ghomshe, Nejad, & Rahimnejad, 2010; Lees et al., 2010).

Cette synthèse a également permis de constater qu'il est possible de quantifier l'efficacité du tir du coup franc. Cette efficacité est jugée par l'intermédiaire de critères de performance indirects telle que la vitesse des segments et du ballon ou bien la durée du geste (Andersen, Dorge, & Thomsen, 1999; Ishii, Yanagiya, Naito, Katamoto, & Maruyama, 2009; Lees et al., 2010), ainsi que la qualité et la précision du tir du coup franc (Katis et al., 2013; KONISHI & MAEDA, 2014; van den Tillaar & Ulvik, 2014). Il est alors possible de mettre en relation cette efficacité avec les paramètres du mouvement mesurés lors de l'analyse cinématique et cinétique.

Différentes méthodologies ont été utilisées afin d'étudier cette habileté, allant de la modélisation numérique (BRAY & KERWIN, 2003; Craig, Berton, Rao, Fernandez, & Bootsma, 2006; De Luca & Faella, 2017), à l'analyse bidimensionnelle (Katis et al., 2013; KONISHI & MAEDA, 2014; Pakdemirli, 2015; Shan & Westerhoff, 2005) et l'analyse tridimensionnelle (Asai, Carre, Akatsuka, & Haake, 2002; Javorova & Ivanov, 2018; Link, Kolbinger, Weber, & Stöckl, 2016).

Cependant, le faible nombre d'études consacrées à ce mouvement sportif ne permet pas de considérer que tous les paramètres de performance ont été déterminés et que les analyses cinématiques et cinétiques sont complètes.

A partir de cette constatation et en s'inspirant des méthodes mises en œuvre dans ces études, il est possible de caractériser précisément le tir du coup franc et de spécifier les paramètres de la performance propres à cette habileté sportive.

Chapitre 02

La biomécanique du coup franc direct.

Nous allons aborder dans ce chapitre la biomécanique du coup franc direct en mettant l'accent sur l'aspect technique et l'analyse biomécanique, sans pour autant oublier la description de l'enchaînement segmentaire entrant en jeu dans l'exécution du coup franc direct et enfin les forces agissantes sur le ballon lors de son envol.

Nous allons discuter des propriétés techniques du coup de pied en parlant de la phase de préparation, de la mise en tension et enfin de l'exécution décrits en détail au cœur du chapitre.

L'analyse biomécanique consiste à adopter un point de vue horizontal sur les différentes études de l'exécution du coup franc dans la littérature scientifique, en mettant sous la loupe les phases importantes de l'habileté du tir du coup franc, passant de la phase d'approche jusqu'au suivi.

La description de l'enchaînement segmentaire du coup de pied, et l'importance du coefficient de restitution du ballon lors du tir du coup franc.

Pour finir on parlera de 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.

1. Analyse technique :

1.1. Préparation :

La préparation est constituée d'une course d'élan et d'une prise d'informations qui se composent de trois facteurs :

1.1.1. Le facteur cognitif :

C'est le moment dit « de perception » (faculté d'observer vite ce qui se passe autour de soi). Cette prise d'informations se fait par rapport au but, aux adversaires et bien sûr par rapport au ballon. Avec l'anticipation et le contrôle (maîtrise de la balle) cette qualité est à la base de l'exécution correcte de la frappe de balle. Un bon joueur est capable d'anticiper la trajectoire du ballon et de deviner son point de chute, on parlera alors de perception sensorielle et motrice ; savoir se trouver au bon endroit au bon moment (anticipation).

1.1.2. Le facteur moteur (déplacement et approche du ballon) :

La coordination est nécessaire pour réaliser des mouvements cohérents par rapport à des objectifs préalables. Nous pouvons aussi remarquer que celui-ci correspond à un ajustement des foulées qui seront de plus en plus courtes à l'approche du ballon en vue de préparer son mouvement.

1.1.3. Le facteur décisionnel :

C'est la fonction du temps disponible et des informations extérieures qui induisent eux aussi des ajustements (ajustement de trajectoires : horizontales, verticales,...).

1.2. Mise en tension :

Cette seconde phase intervient juste avant la frappe de balle et correspond à la mise en position et à la sollicitation des muscles utilisés lors du tir.

Le regard est centré sur le ballon, la ceinture scapulaire est orientée en direction du but, il y a une dissociation entre la ceinture pelvienne et la ceinture scapulaire, on a alors un angle de rotation d'environ 40° . Cet angle de rotation est dû à une mise en tension de la jambe de frappe, cela permet d'augmenter la force de frappe.

La jambe d'appui est légèrement fléchie ce qui permet un meilleur équilibre (mise en tension des muscles). La position du pied d'appui par rapport au ballon est parallèle et se trouve non loin de celui-ci, le pied étant orienté dans la direction du but. Pour la jambe de frappe on observe une ouverture de la cuisse sur le tronc, une fermeture de la jambe sur la cuisse et une extension du pied. Cette phase correspond à l'arme de la jambe de frappe.



Fig. 1 Représente les angles de l'arme de la jambe de frappe.

1.3. Exécution :

Dans cette partie nous différencierons deux moments différents. Nous aurons tout d'abord l'impact puis la finition.

1.3.1. L'impact :

- La jambe d'appui reste dans la même position que lors de la mise en tension.
- La ceinture scapulaire ne bouge pas, mais il y aura une fermeture de l'angle de rotation qui passe de 40° à 0°. On observera alors un alignement de la ceinture scapulaire, de la ceinture pelvienne et du pied d'appui selon le plan frontal.
- Un alignement selon un axe sagittal du pied de frappe, genou de frappe et du scapula du côté de la jambe de frappe sachant que la position du tronc par rapport à la verticale est inclinée de 15 à 20°.
- La jambe de frappe au moment de l'impact est très légèrement fléchie du fait de l'inclinaison et de la flexion de la jambe d'appui.

1.3.2. La finition :

- La jambe de frappe continue sa course, elle va accompagner le ballon. Elle sera en extension totale (extension du pied et extension de la jambe sur la cuisse). Nous aurons alors une fermeture du membre inférieur sur le tronc.
- Extension de la jambe du pied d'appui.
- La ceinture scapulaire va avoir un mouvement d'équilibration dû en partie aux membres supérieurs qui l'entraînent.

Il est à noter que lors de la préparation, mise en tension et exécution on observe que les membres supérieurs ont un rôle d'équilibrage.

2. Analyse biomécanique :

Lorsque nous commençons à examiner les mécanismes d'un coup franc en football, nous devons d'abord décomposer le coup de pied en cinq étapes ([Barfield et al, 1998](#)). Cette analyse étape par étape est utilisée pour décomposer le coup de pied en actions plus petites à partir de l'approche du ballon et en terminant par le suivi. Ces cinq étapes sont les suivantes :

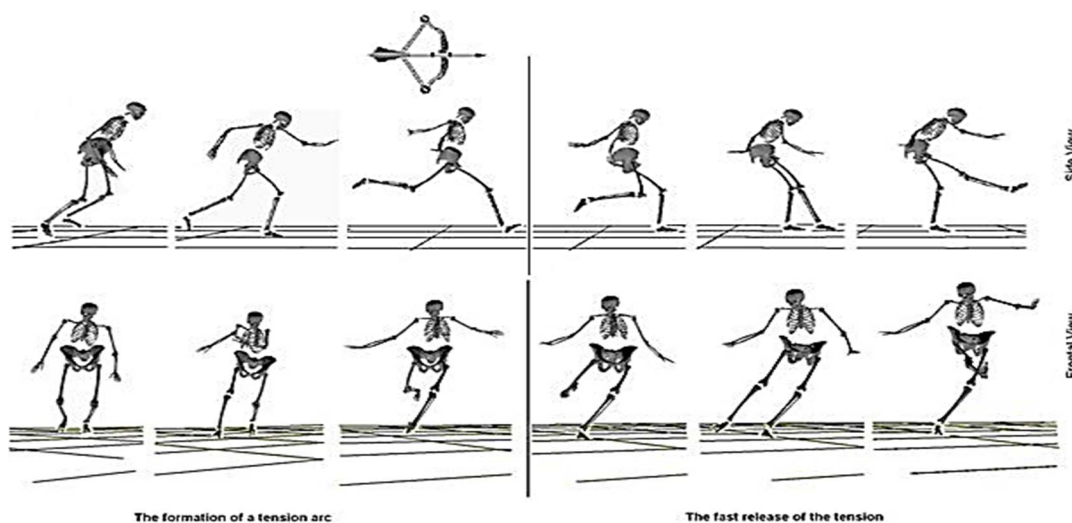


Fig. 2 Les composant du coup du pied (Lees & Nolan, 1998).

2.1. La phase d'approche :

Des études ont montré que les coups de pied arrêtés sont généralement caractérisés par une approche plus rapide afin de générer de la vitesse à travers les hanches (Alison Alcock, Gilleard, Brown, Baker, & Hunter, 2012). Cependant pour les trajectoires courbées du ballon la vitesse d'approche est plus lente. (A. M. Alcock, Gilleard, Hunter, Baker, & Brown, 2012). Ainsi pour avoir cette trajectoire courbée du ballon, le joueur devrait approcher le ballon avec un grand angle. Des études ont montré qu'un angle d'approche compris entre 30 et 45 degrés est efficace pour atteindre une vitesse optimale. La littérature met également en évidence l'importance de la phase d'approche pour créer une dynamique horizontale qui est transférée à travers la chaîne cinétique segmentaire afin de produire un coup de pied à grande vitesse (Alison Alcock, 2010). (Alison Alcock et al., 2012) a constaté qu'une grande vitesse a été obtenue en utilisant une course d'approche avec 6 à 8 pas. (Lees & Nolan, 1998) soulignent également qu'une course incurvée est conseillée pour l'optimisation d'une vitesse maximale du ballon pour permettre à la cuisse d'atteindre une vitesse maximale et augmenter la vitesse de pied avant le contact avec le ballon.

(Scurr & Hall, 2009) constatent que l'angle d'approche de 45° et 60° peut augmenter la rotation du ballon et ce grâce à la cuisse pelvienne et l'abduction de la jambe de frappe au moment de l'impact avec le ballon.

La course permet au joueur d'acquérir une certaine vitesse horizontale. Elle passe par

une poussée complète de la jambe d'appui. Le joueur doit se propulser vers l'avant et se pousser, l'action des bras semi-fléchis à 90° est vers l'avant. Il y a gainage du bassin en rétroversion avec un déplacement du centre de gravité en sinusoïde.

2.2. Placement de la jambe d'appui :

Un placement correct de la jambe d'appui est essentiel pour maintenir la distribution du poids corporel et la production de force tout au long du mouvement de coup de pied. Lorsque la jambe d'appui entre en contact avec le sol, elle produit une force vers l'avant qui s'exerce dans le sol. Ceci est ensuite rencontré par une force de réaction au sol remontant la jambe qui fait référence à la troisième loi de Newton dans chaque action produisant une réaction égale et opposée (Anthony J. Blazeovich, 2007).

Par conséquent, la position optimale de la jambe d'appui est celle perpendiculaire au centre de gravité de la balle avec la position d'atterrissage suggérée 5 à 10 cm derrière ou 5 à 28 cm à côté de la balle (JAMES G. HAY, 1980). En gardant cela à l'esprit, (Barfield, 1998) explique également que si la jambe de soutien du botteur est à plus de 10 cm du ballon, l'équilibre du botteur sera affecté, par conséquent, la direction du ballon s'affectera.

La jambe d'appui est fléchie à environ 26° au contact avec le sol et s'étend à environ 42° au moment du contact avec la balle (A Lees, Asai, Andersen, Nunome, & Sterzing, 2010). La jambe d'appui est continuellement fléchie au niveau de l'articulation du genou pour absorber la force de réaction du sol et à son tour provoque la décélération du mouvement vers l'avant du corps. Ceci agit comme un décalage pour que le corps se stabilise et permet aux membres inférieurs de produire et de transférer de la puissance pour donner un coup de pied au ballon (Anthony J. Blazeovich, 2007; Kellis & Katis, 2007; A Lees, Asai, Andersen, Nunome, et al., 2010).

2.3. Balancement de la jambe de frappe et rotation de la hanche :

L'étape suivante du coup de pied a lieu en même temps que la plante du pied. Il s'agit de l'élan vers l'arrière de la jambe en préparation au contact du pied avec le ballon. Dans cette étape du processus, la jambe frappante de l'autre côté du bras sont levés et pointés vers l'endroit où l'on souhaite que le ballon aille, ce qui favorise l'équilibre et la rotation du corps (Chysowych, 1979). Cette dernière s'étend maintenant avec le genou complètement fléchi. Lorsque le genou passe de cette position pliée avec l'élan arrière à une position tendue avant le coup de pied il permet un plus grand transfert de force à la balle.

La rotation de la hanche (pelvienne) du coup de pied fournit la priorité pour la génération

La biomécanique du coup franc direct.

de l'accélération maximale et le transfert de la puissance par l'extension du genou dans la jambe et le pied. L'articulation de la hanche agit comme un point de pivot pour les membres inférieurs et est comparable au genou en ce qui concerne la production de couple.

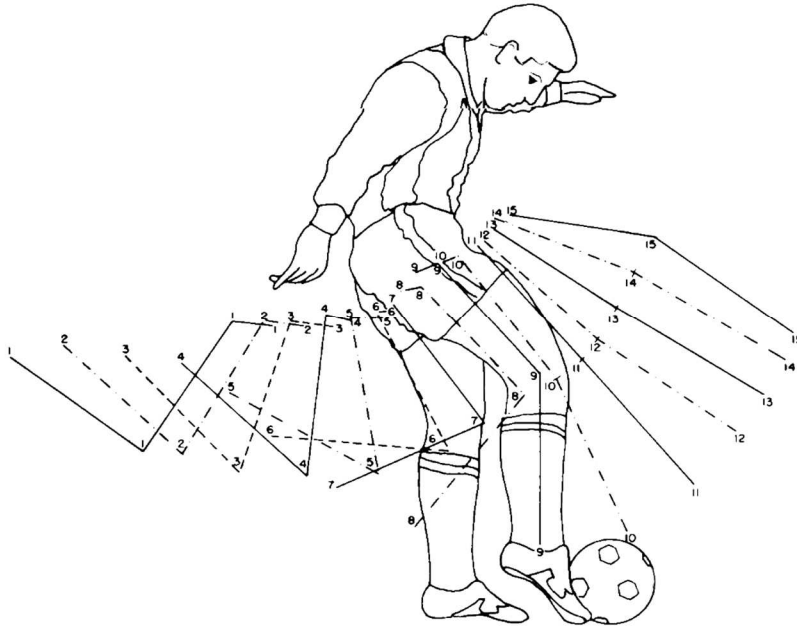


Fig. 3 Kinétoqramme de la jambe Durant la frappe de balle (Plagenhoef, 1971).

2.4. Contact du pied avec le ballon :

La qualité générale du coup de pied est déterminée par l'impact du pied avec le ballon au moment du contact. Une vitesse de rotation plus élevée produite par le pied avant l'impact se traduira par une vitesse de rotation plus élevée et un temps de contact inférieur à 10 millisecondes. Au moment de l'impact, seulement 15 % de l'énergie cinétique produite par le membre oscillant est déplacée vers la balle tandis que le reste se disperse de la jambe vers les différents groupes musculaires pour ralentir le mouvement.

Pour une technique optimale l'impact avec le ballon devrait idéalement être frappé vers l'extrémité distale du pied où la flexion involontaire de la planteuse est causée. La proportion totale d'énergie restante après contact est quantifiée par le coefficient de restitution variant de 0,463 à 0,681 (Kellis & Katis, 2007). La restitution globale peut être affectée par l'endroit où

la balle a été frappée, la rigidité des membres du joueur, les chaussures et la qualité de la balle.



Fig. 4 Contact du pied avec le ballon.

2.5. Le suivi :

Le suivi du coup de pied est essentiel pour maintenir un contact prolongé avec le ballon et se prémunir contre d'éventuelles blessures. L'obtention d'un temps de contact pied-balle plus long permettra d'assurer le transfert maximal d'énergie dans le ballon, ce qui se traduira par une augmentation de la vitesse, car la jambe qui frappe reste allongée tout en continuant à avancer et commence à fléchir. La vélocité angulaire maximale peut se produire au contact pied-balle ou juste après, le segment décélérera angulairement et atteindra une accélération angulaire négative lorsque la balle quittera le pied. Ceci justifie le prolongement du contact pied-balle pour assurer la protection du corps contre les blessures car les forces élastiques et cinétiques sont progressivement dissipées.

3. Enchaînement segmentaire :

3.1. Description de l'enchaînement segmentaire :

Dès les années 60, divers auteurs suggèrent que pour créer la plus grande vitesse possible à l'extrémité d'une chaîne segmentaire, et ce quelle que soit l'activité, la « **théorie de la chaîne cinétique** » doit être respectée ([Mc Cloy 1960](#), [Bunn 1972](#), [Dyson 1973](#), [Kreighbaum et Barthels 1985](#)). D'après ces auteurs, que ce soit pour un saut, un lancer ou une frappe, une chaîne cinétique est employée pour générer le transfert d'énergie des segments les plus lourds aux segments les plus légers. L'ordre séquentiel de mobilisation des segments entraîne par

La biomécanique du coup franc direct.

conséquent une activation des muscles proximaux larges et forts suivis par les plus petits et moins forts, les muscles distaux (Bunn 1972, Zernicke et Roberts 1976, Kreighbaum et Barthels 1985, Robertson et Mosher 1985).

Plus tard, des travaux centrés sur les pics de vitesses démontrent que cet enchaînement segmentaire se traduit par une succession des pics de vitesse angulaire des segments proximaux à distaux (Putnam 1983, 1991, Marshall et Wood 1986, Feltner 1989) ou linéaire (Jöris et coll. 1985, Elliott et coll. 1986-b, Elliott et Armour 1988).

Par la suite, des auteurs considèrent que cet enchaînement segmentaire et donc cette théorie de la chaîne cinétique respecte d'autres principes. Ainsi, des études sur le swing au golf (Milburn 1982, Neal et Wilson 1985), sur le coup de pied de karaté (Cavanagh et Landa 1976) mais aussi sur le tir au football (Roberts et coll. 1974) suggèrent qu'en plus d'une succession des pics de vitesse des segments proximaux à distaux, un principe de sommation des vitesses existe. D'après ce principe, les vitesses des segments inclus dans une action effectuée pour obtenir une vitesse maximale de l'extrémité, se développent de manière précise. Ainsi, le pic de vitesse du segment distal doit être plus important que celui du segment proximal et intervenir après. Enfin, cette vitesse doit être orientée dans la direction de l'objectif (Bunn 1972).

A partir de ces observations, d'autres auteurs ont formulé un principe appelé principe de « **coordination optimale des moments partiels** » (Jöris et coll. 1985, Van Gheluwe et Hebbelinck 1983). Ce principe stipule que pour obtenir une vitesse linéaire maximale à l'extrémité d'une chaîne segmentaire, les vitesses angulaires de chacun des segments doivent atteindre une valeur maximale au même instant. Ceci est justifié par le fait que la vitesse linéaire de l'extrémité d'un solide en rotation est égale à sa vitesse angulaire que multiplie son rayon.

Cependant, bien que ce phénomène soit vérifié dans quelques mouvements tels que le smatch au volley-ball ou le service au tennis (Deporte et coll. 1990), la plupart des autres études n'observent pas ce phénomène (Putnam 1993). Des auteurs ont également expliqué la succession des pics de vitesse par l'analyse des accélérations des segments (Plagenhoef 1971, Koniar 1973, Kunz 1974, Ariel 1975). Ariel (1975) et Plagenhoef (1971) soutiennent que la séquence correcte requiert une accélération positive suivie d'une accélération négative du

segment proximal. Pour ces auteurs, l'accélération négative du segment proximal favorise l'accélération positive du segment distal. Ceci est vrai pour chaque segment de la chaîne.

Par contraste, **Koniar (1973)** établit que les accélérations positives des segments doivent intervenir de manière simultanée pour obtenir une force maximale. De la même manière, **Hudson (1986)**, dans son étude sur le saut vertical, observe une simultanéité des accélérations. Les auteurs ont alors conclu que le principe de sommation des vitesses ne peut pas être appliqué de manière universelle et doit tenir en compte de la nature de l'activité (**Neal et coll. 1991**).

Par conséquent, les auteurs considèrent que la théorie selon laquelle les pics de vitesse linéaire ou angulaire se succèdent des segments proximaux à distaux et s'applique seulement à certains mouvements humains tel que le coup du pied au football (**Plagenhoef, 1971**).

3.2. L'enchaînement segmentaire du coup de pied :

Pour pouvoir effectuer une frappe puissante, il faut communiquer au pied une grande vitesse. Pour que la vitesse soit maximale au moment de l'impact, le pied doit pouvoir accélérer sur une grande distance avant d'entrer en contact avec le ballon.

Pour ce faire, le genou est fléchi et le pied est amené en arrière. Pour augmenter d'avantage l'accélération du pied et du tibia, il y a contraction des muscles de la jambe et des hanches pour permettre le pivotement de la cuisse autour de la hanche. Au moment de la frappe, la jambe se redresse et le pied est fermement bloqué. La progression de la frappe peut être fractionnée en quatre étapes principales comme le montre la figure ci-après.

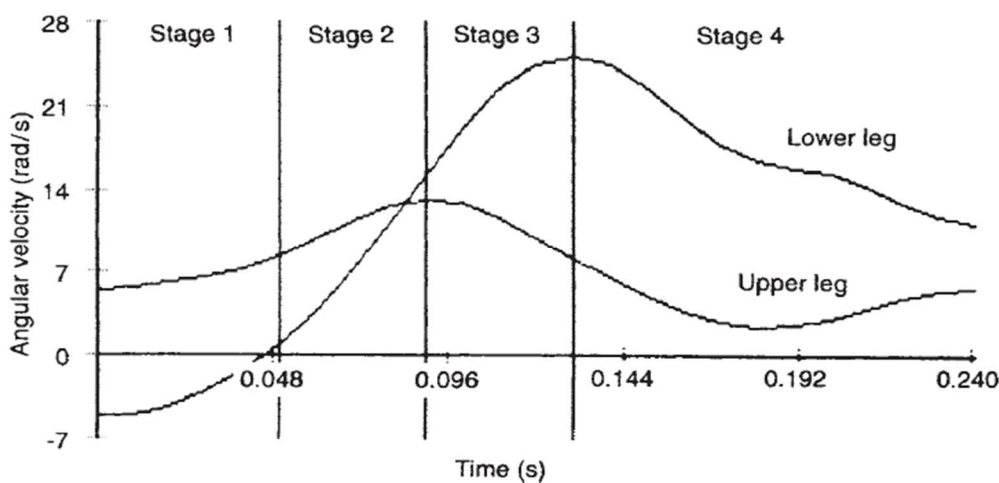


Fig. 5 Illustrant la vitesse angulaire des segments de la jambe durant la frappe. La vitesse angulaire de 10 radians/seconde correspond à un peu moins de 2 tours par seconde (**Adrian Lees and Nolan 1998**).

La biomécanique du coup franc direct.

La première étape correspond à la tension lors de laquelle on peut observer une flexion du genou. Dans la deuxième étape, la cuisse et la jambe prennent de plus en plus de vitesse angulaire. Cependant, la cuisse commence à ralentir à la fin de cette phase. Durant la troisième partie, la jambe continue d'accélérer jusqu'à atteindre son maximum lors du contact avec le ballon. La dernière étape correspond simplement à l'accompagnement de la jambe juste après que le ballon ait quitté le sol. La cuisse et le mollet décélèrent jusqu'à s'immobiliser. 50 % de la vitesse de la jambe lors de l'impact est produite durant la deuxième phase, le 50 % restant est fourni par la rotation de la cuisse. Ainsi, si on regarde la vitesse des différents segments de la jambe, on peut remarquer que le segment inférieur c'est-à-dire la partie en dessous du genou accélère davantage que la partie supérieure.

La vitesse de la frappe dépend de la vitesse angulaire de la cuisse et de la jambe ainsi que de la longueur des segments, c'est à dire de la grandeur de la cuisse et du mollet.

$$\text{Vitesse de frappe} = \omega_{\text{cuisse}} \cdot R_{\text{cuisse}} + \omega_{\text{jambe}} \cdot R_{\text{jambe}}$$

Comme on l'a observé sur la figure dans la page précédente, la vitesse angulaire du segment inférieur est plus grande que la vitesse du segment supérieur. Cela s'explique principalement par le fait que les cuisses ont une masse plus importante que la partie inférieure. Dès lors, les muscles de la hanche doivent déplacer une plus grande masse et fournir beaucoup plus d'énergie, ce qui occasionnera une plus petite accélération. Une seconde raison réside dans le fait que la musculature responsable de mouvoir la partie inférieure est plus imposante que celle du muscle de la hanche. Au moment de l'impact, les deux segments sont alors alignés puisque la partie inférieure a rattrapé la cuisse grâce à son accélération plus marquée.

On peut effectuer un exemple simple de calcul de la vitesse de frappe au moment de l'impact avec la formule ci-dessus et la figure illustrée plus haut. La longueur des segments de la jambe dépend de la grandeur du joueur. Un joueur mesurant 1 mètre 85 aura une cuisse d'une longueur aux alentours de 45 centimètres et une longueur de jambe d'environ 55 centimètres. Si on regarde sur la figure 05, la vitesse de la jambe au moment de l'impact correspond approximativement à 25 rad/seconde et celle de la cuisse à 5 rad/seconde. Ainsi, avec la formule on trouve :

La biomécanique du coup franc direct.

$$\text{Vitesse de la frappe} = (0.45 * 5) + (0.55 * 25) = 16 \text{ m/s } (57.6 \text{ km/h})$$

Beaucoup de recherches ont été entreprises pour tenter de montrer une relation possible entre la force musculaire et la performance. Les muscles utilisés lors d'une frappe sont directement responsables de l'augmentation de la vitesse du pied. On a remarqué qu'une imposante musculature pour une flexion de la hanche et du genou jouait un rôle par rapport à la vitesse de frappe (**Cabri et al. 1998**). Des tests ont montré qu'une grande musculature des fléchisseurs et extenseurs du genou jouerait un plus grand rôle que celui des hanches sur la vitesse du pied lors de la frappe. Ainsi, on comprend encore mieux comment Roberto Carlos est capable de tirer des coups francs avec une telle puissance, il suffit d'observer la taille de ces cuisses.

Comme expliqué plus haut, l'impact d'une frappe lors d'un coup franc se produit au moment où la jambe atteint sa vitesse maximale lorsqu'elle s'avère pratiquement droite. Pour que la frappe soit la plus puissante possible, le coup doit être frappé plein axe, c'est-à-dire que la ligne de frappe doit traverser le centre de masse du ballon. Dans le cas contraire le ballon subirait une rotation et donc une partie de l'énergie partirait dans cette rotation. Si l'interaction entre le pied et le ballon serait parfaitement élastique et que la masse du ballon serait négligeable comparée au segment de la jambe, on pourrait calculer selon la conservation de l'énergie et du moment cinétique que la vitesse du ballon serait le double de celle de la jambe. Mais en réalité, l'impact entre le pied et le ballon est un choc mou. Cela signifie que l'énergie n'est pas conservée durant la collision. Le pied est ralenti et des pertes en chaleurs dues à la déformation du ballon entraînent une diminution supplémentaire de la vitesse du ballon.

La perte de vitesse peut être calculée comme pour le rebond avec le coefficient de restitution qui varie autour de 0,7. Ce coefficient est légèrement inférieur à celui constaté lors du rebond simple sur un sol rigide. Cette différence dépend du type de chaussure mais surtout de l'os du pied qui se déforme passablement lors de l'impact. Si on fait le calcul en tenant compte de tous les facteurs ci-dessus, on observe que la vitesse du ballon augmente environ de 20 % par rapport à celle du pied. Ce résultat peut être confirmé avec l'équation de Plagenhof montrant la relation entre la vitesse du pied lors d'une frappe et la vitesse du ballon après la frappe (**Plagenhof, 1971**).

$$V_{ballon} = V_{pied} \cdot \frac{M(1+e)}{M+m}$$

Où V_{ballon} et V_{pied} représentent respectivement la vitesse du ballon et du pied, M la masse du pied et d'une partie de la jambe et m la masse du ballon. « e » est le coefficient de restitution. Le terme $M / (M + m)$ nous donne une indication de la rigidité se rapportant à la force du muscle durant l'impact. Ce rapport vaut à peu près 0,8. La masse du pied (M) est difficile à mesurer, lors d'une frappe la cheville se rigidifie tellement qu'une partie de la masse de la jambe s'additionne à la masse du pied. Le terme $(1 + e)$ dépend du taux de déformation du pied et du ballon durant l'impact.

Des études ont montré que la déformation était plus importante au bout des pieds qu'à la cheville. Plus le pied se déforme plus cela réduit la vitesse du ballon. En outre, pour une frappe puissante, on a un meilleur temps pour tirer le plus près possible de la cheville qu'au bout du pied ([Asami et Nolte 1983](#)).

4. 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 :

$$M \, dU/dt = FG + FD + FL \quad (1).$$

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

La biomécanique du coup franc direct.

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 06 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.

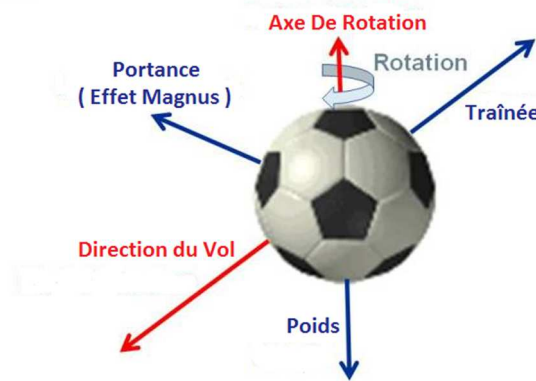


Fig. 6 Représente les forces appliquées sur le ballon lors de son envol.

4.1. 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 :

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

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.

4.2. Les forces aérodynamiques :

4.2.1. 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 7. 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 7. 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 traînée $F_D \sim \rho R^2 U^2$.

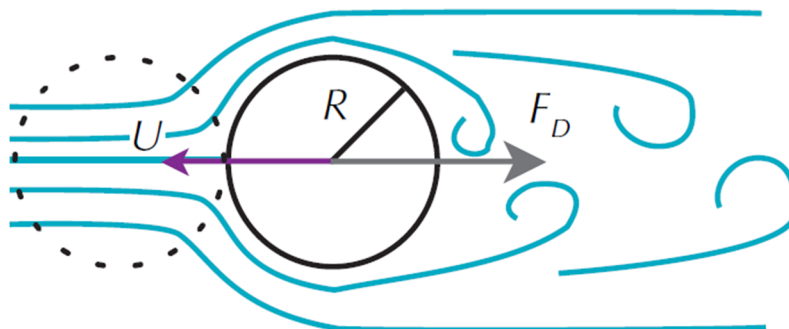


Fig. 7 Écoulement de l'air autour d'un ballon se déplaçant à une vitesse U sans rotation.

4.2.2. 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.

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 08). 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 :

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

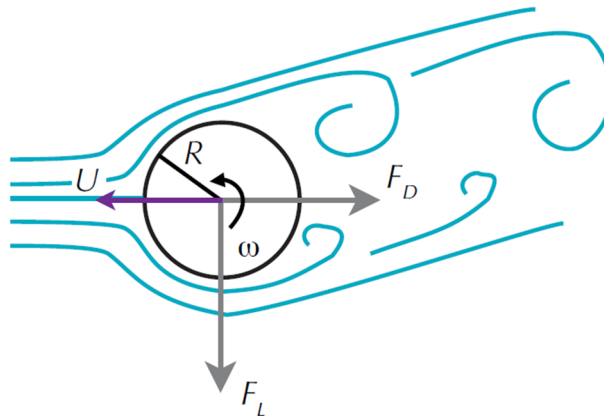


Fig. 8 Écoulement de l'air autour d'un ballon se déplaçant à une vitesse U, avec rotation.

5. Les trajectoires du ballon :

5.1. 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 $FD \sim -\rho R^2 U^2$ influence la trajectoire du ballon. Ici, $\rho \approx$

La biomécanique du coup franc direct.

$1,2 \text{ kg/m}^3$ 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, Cohen, Le Goff, Quéré, & Clanet, 2011).

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)

Ces vitesses sont supérieures à 38 m.s^{-1} , ce qui correspond bien au domaine aérodynamique. FD 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 : $U(s) = U_0 \exp(-s/\mathcal{L})$, \mathcal{L} étant la longueur caractéristique de freinage :

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

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 \mathcal{L} est ainsi de l'ordre de 50 m pour le football.

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

On présente sur la figure 9 des trajectoires de ballon observées par (Hong, Chung, Nakayama, & Asai, 2010a). Pour $U_0 \approx 28 \text{ m/s}$: 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

La biomécanique du coup franc direct.

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. 9) 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).

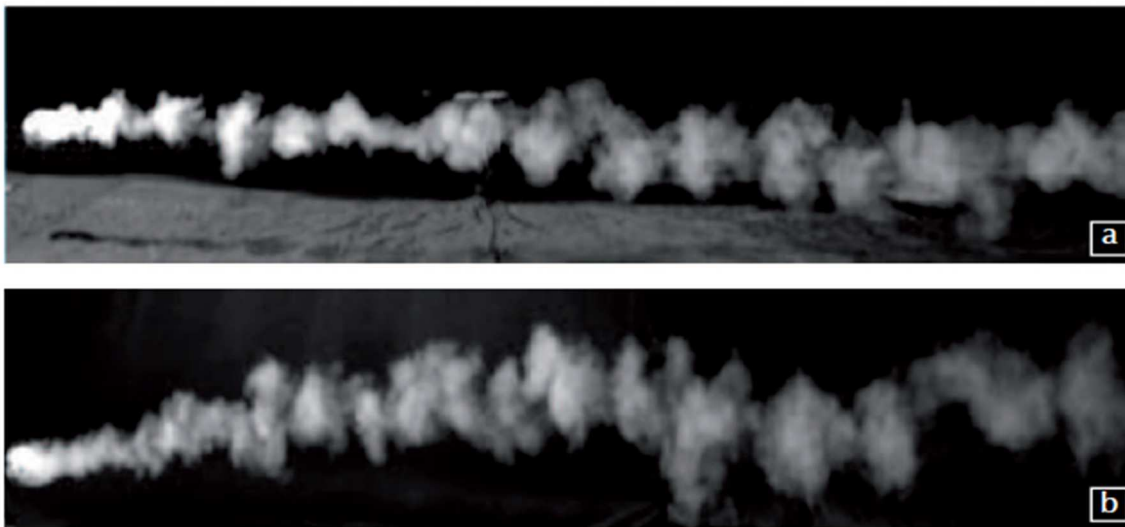


Fig. 9 Écoulement de l'air autour d'un ballon se déplaçant à une vitesse U , (a) sans rotation, (b) avec rotation.

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

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

5.2. 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 \mathcal{L} . Ceci est vrai en l'absence de rotation. Avec rotation, le ballon subit aussi la force de Magnus $FL \sim \rho R^3 \omega_0 \wedge U$, où ω_0 est le vecteur rotation.

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 :

La biomécanique du coup franc direct.

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

Cette trajectoire a été étudiée en détail par (Dupeux, Goff, Quéré, & Clanet, 2010), 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 \mathcal{E} .

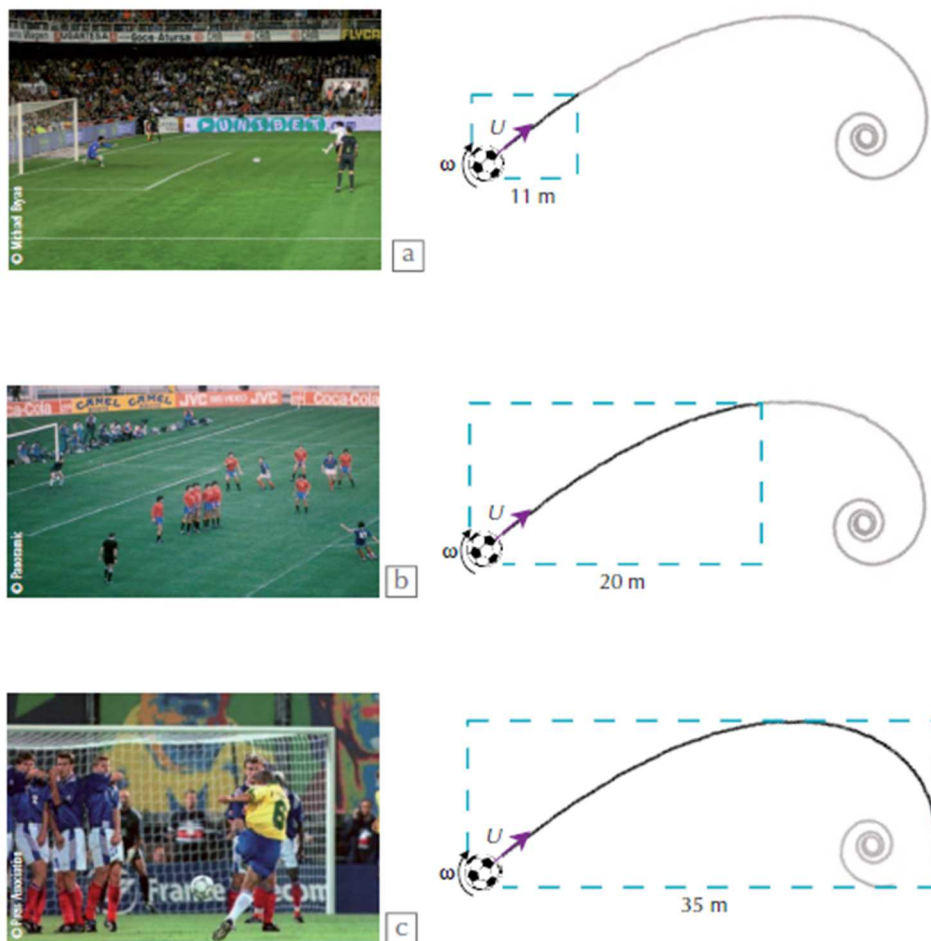


Fig. 10 Trois types de coups de pied arrêtés. (a) Penalty à 11 m ; (b) coup franc « aux 18 mètres » ; (c) coup franc lointain.

Nous discutons sur la (fig. 10) la possibilité d'observer cette spirale dans le cas de trois coups de pied arrêtés. À l'échelle du penalty (fig. 10a), 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. 10b), 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. 10c), 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

La biomécanique du coup franc direct.

de Roberto Carlos tiré contre la France en 1997. Ce coup franc est schématisé sur la (fig. 11) : 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.

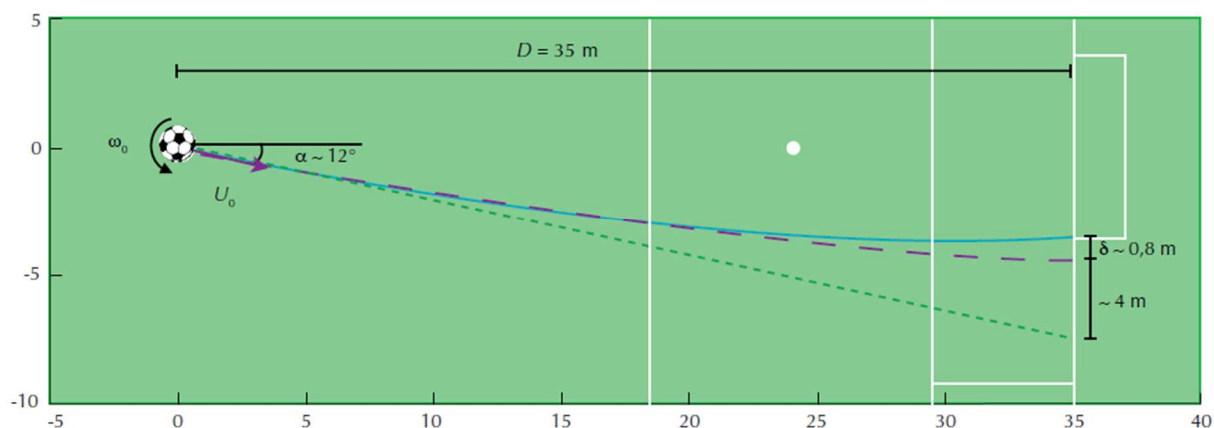


Fig. 11 (Dupeux et al, 2011) Coup franc de Roberto Carlos, tiré contre la France en 1997.

Conclusion

L'analyse biomécanique de toutes sortes d'habiletés est essentielle pour que l'entraîneur comprenne la complexité des habiletés sportives. Il est clair que l'analyse de la performance à partir des phases de mouvement démontre l'importance de chaque phase, toutes liées les unes avec les autres afin de maximiser la fluidité de l'enchaînement segmentaire du joueur tout au long du coup franc. Pour une performance optimale, un joueur doit viser à développer une chaîne cinétique plus fluide afin de maximiser la puissance et la précision. La fluidité résulte

La biomécanique du coup franc direct.

du maintien de la stabilité, d'un plus grand degré de liberté des segments et de la mobilité articulaire.

Gravité et aérodynamique sont responsables de la diversité des trajectoires du ballon de football. À faible vitesse, la gravité domine et seule la parabole galiléenne est observée. À forte vitesse, l'aérodynamique devient prépondérante et la trajectoire se met à dépendre de la rotation du ballon.

Sans rotation, celui-ci va tout droit ou zigzague, suivant la nature laminaire ou turbulente de sa couche limite.

Cette trajectoire quasi rectiligne perdure, jusqu'à ce que le ballon soit suffisamment ralenti pour que la gravité le fasse tomber, donnant lieu à des paraboles tronquées. Le dernier régime est celui des ballons en rotation qui conduit à des cercles, voire à des morceaux de spirale lorsque la distance parcourue est suffisamment grande.



Chapitre 03

La précision du tir au football.

Pour tout footballeur, marquer un but lors d'une rencontre est une chose importante qui procure une joie immense, le tir, ce geste décisif concrétise la supériorité d'une équipe et que le chasseur de but invente et réactualise au fil des compétitions.

Ce présent chapitre présente la précision du tir au football en commençant par définir cet élément pour mieux comprendre son utilité, ensuite par en analyser les différents types de précision et leurs importances afin de limiter les facteurs nuisibles à sa réussite et en améliorant la technique du tir en générale et le tir du coup franc direct en particulier.

1.Le tir :

Le tir au football c'est la tentative d'expédier le ballon dans le but adverse par une frappe de balle. Le tir est l'aboutissement de tout ce qui a été réalisé collectivement auparavant, de toutes les actions d'attaque, il est important de le travailler. Il peut s'effectuer sur une balle à l'arrêt ou en mouvement, au sol ou en l'air. La trajectoire du tir est déterminée par la surface de contact utilisée (intérieur du pied, cou-de-pied, tête...). Le tir nécessite des qualités techniques (position et orientation du corps, placement du pied d'appui, utilisation d'une certaine surface de contact, rôle du regard, précision,...) des qualités physiques (puissance, coordination et vitesse d'exécution...) et des qualités morales (confiance en soi et prise de risques,...) car ne dit-on.

2.La précision :

La précision est l'une des composantes les plus essentielles dans de nombreuses disciplines sportives et en particulier dans le football, elle se mesure par les tirs du ballon dans le filet et l'atteinte du but.

Abdel Maksoud (1986) indique qu'un degré élevé de précision nécessite une reconnaissance appropriée des aspects temporels et spatiales ainsi que les aspects des phases dynamiques du mouvement, et il l'a définie comme étant le degré de correspondance entre le résultat final et les objectifs qui ont été identifiés préalablement.

Deux critères semblent déterminants pour la précision d'un tir. Ils sont relatifs à la surface de contact pied/ballon et à l'orientation du plan pectoral.

Quelle que soit la forme du tir (linéaire ou curviligne en fonction de l'effet), la surface de contact au moment de l'impact devra être perpendiculaire à l'endroit visé.

L'autre critère déterminant la précision d'une frappe au but réside dans l'orientation du buste qui devra être dirigé vers l'endroit visé.

Un défaut dans l'un de ces critères conduira inexorablement à ce que l'on appelle un tir non cadré, ce qui ne donne aucune chance de marquer même si le gardien adverse est faible. Lors des situations d'apprentissage, il conviendra donc dans les corrections techniques apportées d'être vigilant à ces paramètres.

Enfin lors des situations visant l'amélioration des tirs, il y a souvent des problèmes de distance. Quel que soit le niveau de compétence des joueurs ou le niveau de compétition observé, l'immense majorité des buts sont inscrits grâce à des tirs de l'intérieur de la surface. Cette caractéristique est forcément à prendre en considération dans la préparation de nos séances afin de mettre les joueurs dans les conditions les plus proches d'un match afin qu'ils puissent retrouver des repères et ajuster leur comportement pour être le plus performant possible (Caballero & Gil, 2005).

On définit la précision comme étant l'atteinte d'un objectif en moins de temps et d'énergie avec un degré élevé de réussite.

3. Types de précision :

(Schmidt & Lee, 2005) composent la précision en trois types :

3.1. Précision spatiale : type de précision nécessaire aux mouvements volontaires relatifs à la localisation spatiale du point du mouvement final.

3.2. Précision temporelle : type de précision exigeant une vitesse de mobilité relative à l'exactitude du temps du mouvement.

3.3. Le Timing : type de précision exigeant une vitesse de mobilité relative à l'exactitude du poids requis locomoteur.

4. Les facteurs affectants la précision du tir :

4.1. Précision et force du tir :

La précision et la force ont un rôle clé dans la réussite du tir, bien que l'expérience du joueur est importante car elle lui permet d'envoyer des tirs puissants vers des cibles précises, certains joueurs manquent souvent des occasions en or de marquer des buts soit en raison de leur imprécision ou l'excès de la force engendrer au ballon au moment du tir, qui dans la grande majorité des cas manquent les cadres.

L'équilibre entre ces deux caractéristiques est primordial pour réussir à marquer un but, plusieurs joueurs échouent en raison de la concentration sur un élément au dépend de l'autre. Donc le joueur se doit de connaitre a juste mesure l'équité entre précision et force pour réussir son tir afin de marquer un but ([Hammad, 1986](#) ; [Abdul Qadir Zainal 1994](#) ; [Saleh Radi 1990](#) ; [Staon 1991](#) ; [Chenell, 1994](#) ; [Amish 1990](#) ; [Staunton 1991](#)).

Dans la plupart des cas des tirs à long distance la vitesse du ballon peut atteindre 120 Km/h, ce qui laisse moins de temps au gardien de réagir et d'anticiper la trajectoire du ballon. Toute fois à des tirs proches des buts et sur des angles fermés par le gardien de but, le joueur doit être très précis en ajustant suffisamment la force de son tir pour réussir à marquer ([Hammad, 1986](#)).

4.2. La hauteur du tir :

La hauteur influe sur la précision du tir, car les tirs en hauteur sont plus facile à anticiper pour le gardien du but tout comme il peut attraper le ballon qui pourra être à sa hauteur naturel, tandis que les tir a une hauteur basse est plus difficile au gardien car il aura besoin de plonger pour sauver ses cages, le tir sera plus précis parce que le ballon ne sera pas autant affecter par la force aérodynamique « effet Magnus » ([Cf. chapitre 02](#)) et aura des trajectoires imprévisibles pour gardien de but.

L'objectif de l'étude de Katis et ses collègues était de comparer des coups de pied de

football exacts et inexacts visant vers les cibles supérieures et inférieures. Vingt et un joueurs de soccer ont effectué des coups de pied consécutifs contre le haut et le bas, comme il est indiqué sur la figure 12.

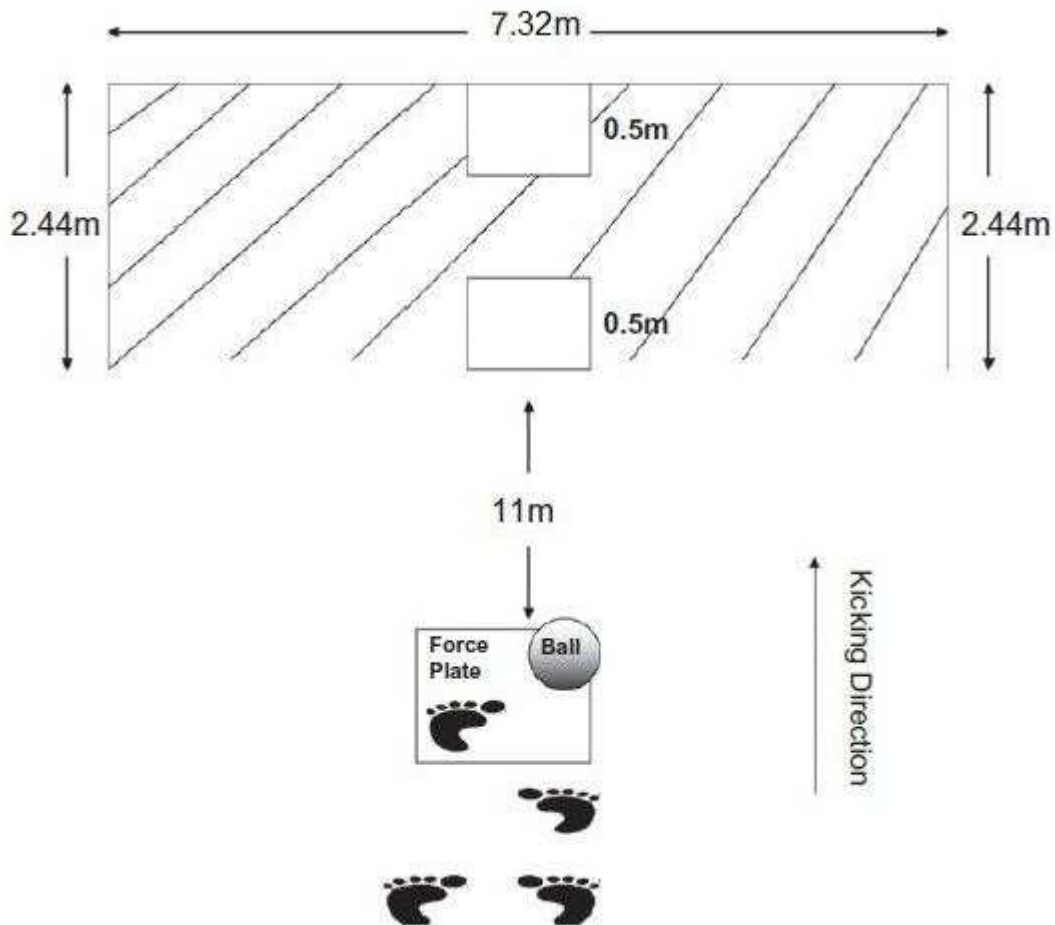


Fig. 12 Une illustration schématique des essais de coups de pied sur différentes cibles (Katis et al., 2013).

Il a été conclu que l'activation musculaire de la jambe qui donne des coups de pied représente un mécanisme important qui en grande partie contribue à la précision des coups de pied de football.

4.3. Le timing du tir :

Un bon choix de timing est l'un des éléments les plus importants de la réussite du tir. Les joueurs manquent souvent l'occasion de marquer en raison de leur rythme lent et de leur

retard, ce qui donne au gardien le temps de fermer un angle prometteur pour le joueur, ou que le retard peut amener les défenseurs à se placer en position défensive (Hammad, 1996).

4.4. L'angle du tir :

Dans le cas où le joueur est face au gardien il doit placer le ballon sur un côté ou l'autre du but par un angle de tir qui serait difficilement sauver par le gardien, cela dépend de la technique et de l'intelligence du joueur, un tir précis sur un angle plus moins ouverts et l'idéal pour marquer un but, par fois le joueur feinte la gardien sur un côté afin qu'un des angle sera bien dégager pour bien placer le ballon dans les filets. Il est primordial au joueur d'acquérir une précision spatio-temporelle pour réussir à vaincre le gardien de but. (Hammad, 1996).

4.5. Le facteur psychologique :

Afin d'être précis dans son tir le joueur doit avoir des capacités mentales et psychologiques optimales pour l'aider à vaincre le stress engendrer par la pression du à l'importance du coup du pied arrêté, un bon tireur de coup franc doit être caractérisé sur le moment du tir d'une bonne capacité mentale ainsi qu'un sentiment de calme, haute estime de soi et une grande confiance en ses capacités.

4.6. Le facteur physique :

Il est important que les joueurs s'adaptent à la haute intensité des compétitions en développant davantage leurs capacités physiques pendant l'entraînement.

(Ferraz, van den Tillar, & Marques, 2017) ont mené une étude dans le but d'étudier l'influence des différentes intensités d'exercice induites par un protocole spécifique sur les coups de pied.

Ils ont choisie douze joueurs de football masculins semi-professionnels et en effectuant un maximum de tirs après la mise en œuvre d'un protocole d'exercice pour déterminer l'influence de différentes intensités sur la vitesse du ballon et la précision de frappe vers une cible dans le but.

Il a été conclu que la vitesse de frappe du ballon est influencée par des intensités

d'exercice élevées. Par contre n'affectent pas la précision. Sinon, il est possible que d'autres mécanismes (pas seulement physiologique) peuvent influencer les joueurs pendant le tir.

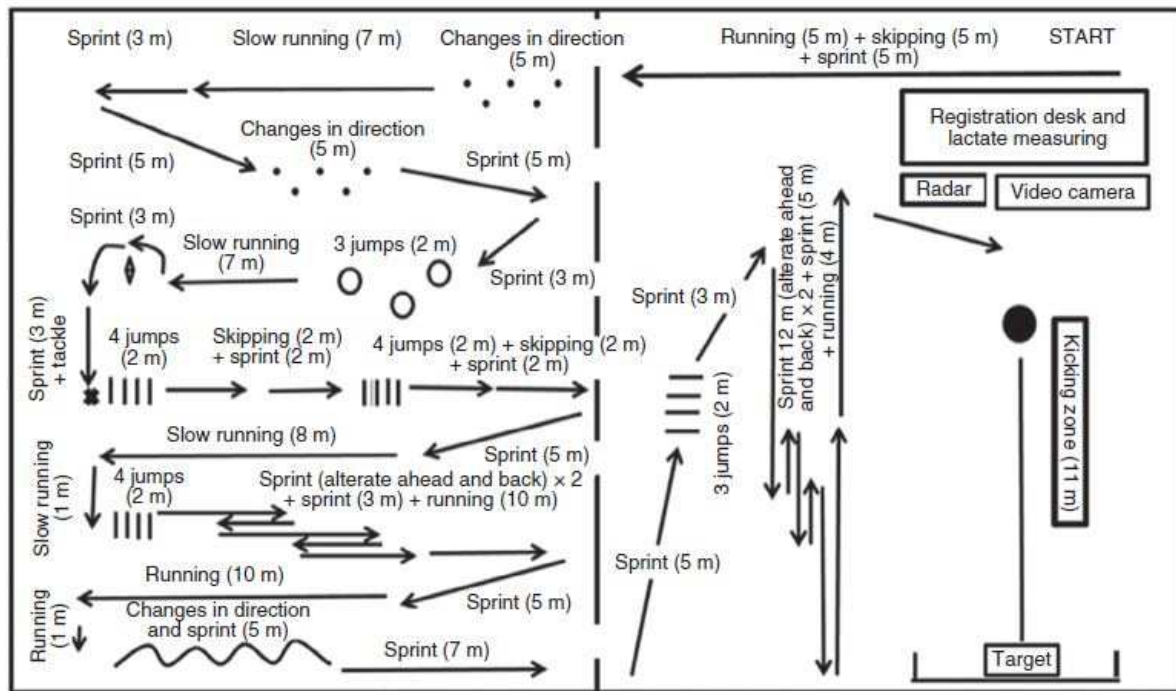


Fig. 13 Circuit d'intensité influant sur la vitesse et la précision du tir (Ferraz, van den Tillar, & Marques, 2017).

4.7. Le facteur technique :

La compétence du joueur se voit en grande partie dans ces capacité technique une bon technique de frappe est primordial pour avoir un tir précis, les plus grand techniciens sont dotés d'une capacité formidable a marquer des but sur différentes positions, certains sont même spécialistes dans le tir du coup franc direct (Lionel Messi, Cristiano Ronaldo, Roberto Carlos, David Beckham ... etc).

Conclusion

Marquer un but est l'objectif ultime de tout footballeur, le tir est l'habileté la plus utilisée pour marquer des buts. Il est primordiale que les joueurs aient un tri précis surtout lors des coups de pieds placés en générale et le coup franc direct en particulier, la précision sous toutes ses formes (spatiale, temporelle ... etc) reste un élément très important qu'il ne faut jamais

La précision du tir au football.

négliger, pour cela le tir se doit être travaillé pendant les entraînements par les joueurs, par les attaquants au premier lieu. Chaque entraîneur doit être en mesure de connaître les capacités individuelles de ses joueurs afin de déceler leurs lacunes pour pouvoir les combler et donc améliorer le tir en ajustant sa précision, en limitant les facteurs influant sur cette caractéristique, ça sera l'objet de cette étude en analysant les paramètres biomécaniques entrant en jeu dans la précision du tir du coup franc direct.

Partie 02



Chapitre 01

Méthodologie et procédures d'investigations.

Méthodologie et procédures d'investigations.

La méthodologie désigne un ensemble de règles, étapes et procédures auxquelles on a recours dans une science pour choisir l'objet d'étude. C'est une mise en forme particulière d'une démarche. Toute recherche suppose un outillage, un protocole de recherche, des instruments, un dispositif expérimental valide et des outils d'investigation fiables qui permettent de mesurer l'effet produit par la manipulation d'une variable dans une situation définie.

En outre, c'est une description sommaire des concepts et théories qui servent à appréhender le problème. Il est question de construire des dispositifs appropriés pour résoudre le problème de recherche posé au départ.

On doit indiquer comment on procèdera pour accomplir les opérations qu'implique la recherche, tester l'hypothèse et d'expliquer en quoi cette ou ces méthodes sont les mieux adaptées pour le problème posé.

Ce chapitre nous permettra de présenter tour à tour la méthodologie de l'étude, la population d'étude, l'échantillon et la méthode d'échantillonnage, l'instrument de collecte des données et la méthode statistique d'analyse des données.

1. Méthodologie :

Selon la nature de cette étude la méthode descriptive a été utilisé, comme la définie **(N'da Paul, 2002)** «*nous pouvons indiquer que la méthode descriptive consiste à décrire, nommer ou caractériser un phénomène, une situation ou un événement de sorte qu'il apparaisse familier*». Cette méthode nous a aidé dans la description du champ de travail et de notre unité d'enquête pour mieux appréhender les différentes réalités qui s'y trouvent.

2. Echantillon :

L'échantillon de cette étude se compose de cinq (05) joueurs sénior semi professionnels sur les 22 joueurs de l'équipe, choisie d'une manière systématique avec un pourcentage de 22.72%. Chaque joueur a cinq (05) tentatives de tir de coup franc direct sur trois (03) position

Méthodologie et procédures d'investigations.

différentes (à droite, centre et à gauche) ce qui donne au totale soixante-quinze (75) tentatives en tout.

Le tableau (02) décrit les caractéristiques générales de l'échantillon de l'étude :

Tableau 2 : Caractéristiques générales de l'échantillon.

Joueurs	Agés (années)	Masses Corporelles (Kg)	Tailles (m)	Expériences (années)
01	24	63	1,72	13
02	19	72	1,79	11
03	22	72	1,69	12
04	26	64	1,79	15
05	23	68	1,76	12
<i>Moyennes</i>	22,8	67,8	1,75	12,4
<i>Ecart Types</i>	2,59	4,27	0,04	1,82

3. Domaines de l'étude :

- **Humain** : Cinq joueurs sénior semi professionnelle.
- **Spatiotemporelle** : Stade BENSLIMANE, MOSTAGANEM.
- **Temporelle** : de Décembre 2015 à Mars 2018.

4. Les variables de L'étude :

La variable est un élément dont la valeur peut changer et prendre différentes autres formes dans un ensemble appelé domaine de la variable (**Landsheere 1976**).

Selon (**Meskine, 2016**), les variables sont les facteurs qui peuvent influencer les résultats d'une recherche, d'une expérience. Il existe des variables indépendantes, des variables dépendantes et d'autres dites variables contrôlées.

4.1. La variable indépendante :

Une variable est dite indépendante quand elle constitue la cause présumée d'un phénomène d'étude, dans la relation cause à effet. C'est celle que le chercheur veut mesurer, et dans cette étude les variables indépendante sont les variables biomécaniques présentés selon chaque phase que compose l'habileté du tir du coup franc, dont quelques variables sont analysées à partir du traitement des vidéos par les logiciels Dartfish et Tracker et d'autres calculées à partir des équations physiques et mathématiques selon la dynamique inversée,

comme suit :

4.1.1. Phase d'approche :

La phase d'approche se caractérise par une course qui permet au joueur d'acquérir une certaine vitesse horizontale. Elle passe par une poussée complète de la jambe d'appui. Le joueur doit se propulser vers l'avant et se pousser, pour plus de détaille (*Cf. chapitre 02*).



Fig. 14 Représente la phase d'approche.

4.1.1.1. Temps d'approche (t):

Le temps d'approche est représenté comme étant le temps qu'il faut au joueur afin de parcourir la distance qui le sépare du ballon pendant la phase d'approche, comme il est indiqué sur la figure (15).



Fig. 15 Représente le temps d'approche.

4.1.1.2. Distance d'approche :

La distance d'approche est entre la position initiale du joueur et l'emplacement du ballon pendant la phase d'approche. Figure (16).

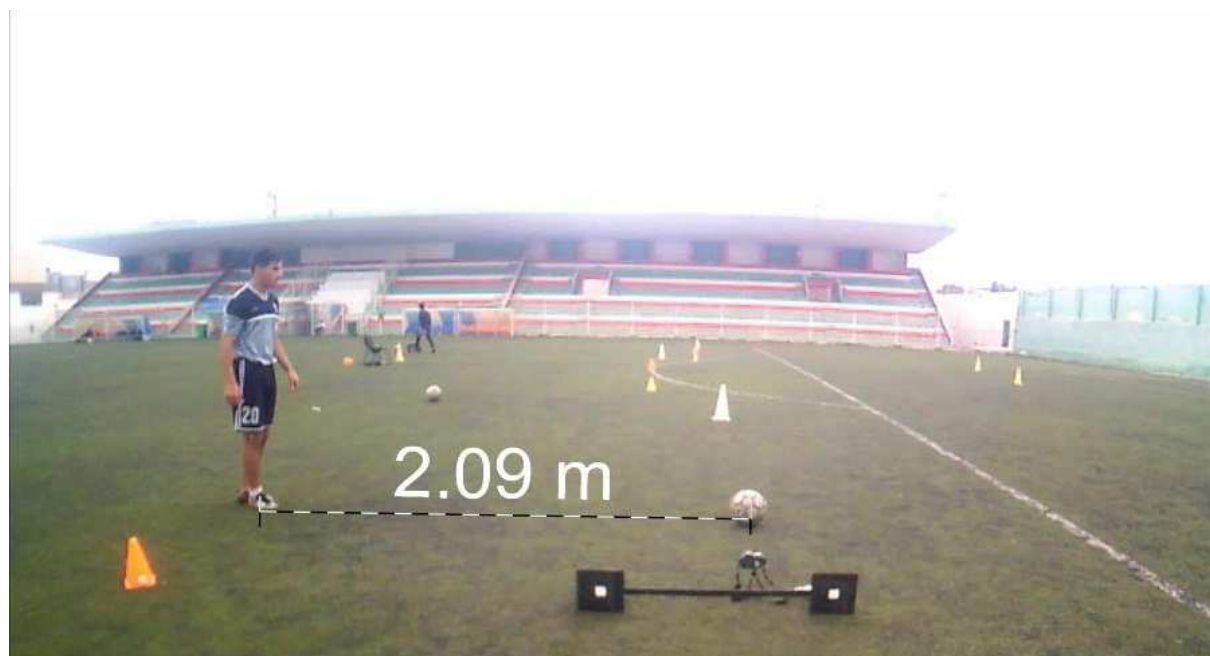


Fig. 16 Représente la distance d'approche.

4.1.1.3. Nombre de pas :

Comme on peut le voir sur la figure (17), le nombre de foulés du joueur pendant la phase

d'approche et avant la phase du balancement.



Fig. 17 Représente le nombre de pas lors de la phase d'approche.

4.1.1.4. Vitesse d'approche :

La vitesse est le rapport entre la variation de la position du joueur et le temps nécessaire pour faire ce changement de position au moment de la phase d'approche.

Formule :

L'équation générale utilisée pour calculer la vitesse est :

$$v = \Delta x / \Delta t$$

Où :

v : Représente la vitesse d'approche du joueur (en $m \cdot s^{-1}$).

Δx : Représente la variation de la distance d'approche (x) (en m).

Δt : Représente la variation du temps d'approche (t) (en s).

4.1.1.5. Accélération d'approche :

L'accélération est le rapport entre le changement de vitesse du joueur et le temps nécessaire pour faire ce changement de position au moment de la phase d'approche.

Formule :

L'équation générale utilisée pour calculer l'accélération du joueur est :

$$a = \Delta v / \Delta t$$

Où :

a : Représente l'accélération du joueur (en $m. s^{-2}$).

Δv Représente la variation de la vitesse d'approche du joueur (v (en $m. s^{-1}$).

Δt : Représente la variation du temps d'approche (t) (en s).

4.1.2. Le placement de la jambe d'appui et le balancement de pied de frappe :

Un placement correct de la jambe d'appui est essentiel pour maintenir la distribution du poids corporel et la production de force tout au long du mouvement de coup de pied. Lorsque la jambe d'appui entre en contact avec le sol, elle produit une force vers l'avant qui s'exerce dans le sol. L'étape suivante du coup de pied a lieu en même temps que la plante du pied. Il s'agit du balancement de la jambe en préparation au contact du pied avec le ballon. Dans cette étape du processus, le tireur a de le bras croisé du la jambe d'appui levé et le pied de la jambe d'appui pointé vers le but, ce qui favorise l'équilibre et la rotation du corps. Pour plus de détails (Cf. chapitre 02).



Fig. 18 Représente la phase de placement de la jambe d'appui et le balancement de pied de frappe.

4.1.2.1. Vitesse angulaire de la cuisse :

La vitesse angulaire de la cuisse est la variation de l'angle de la cuisse du joueur et le

Méthodologie et procédures d'investigations.

temps nécessaire pour faire ce changement d'angle pendant la phase du balancement, comment il est décrit sur la figure (19).

Formule :

L'équation générale utilisée pour calculer la vitesse angulaire de la cuisse est :

$$\omega_{cuisse} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

Où :

ω_{cuisse} : Représente la vitesse angulaire de la cuisse (en $^{\circ}.s^{-1}$).

$\Delta\theta$: Représente la variation de l'angle de la cuisse (en $^{\circ}$).

Δt : Représente la variation du temps (t) (en s).



Fig. 19 Représente l'angle de la cuisse lors de la phase du placement de la jambe d'appui et le balancement de pied de frappe.

4.1.2.2. Vitesse angulaire de la jambe :

La vitesse angulaire de la jambe est la variation de l'angle de la jambe du joueur et le temps nécessaire pour faire ce changement d'angle au moment de la phase du balancement, comment il est décrit sur la figure (20).

Formule :

L'équation générale utilisée pour calculer la vitesse angulaire de la jambe est :

$$\omega_{jambe} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

Où :

ω_{jambe} : Représente la vitesse angulaire de la jambe (en $^{\circ}.s^{-1}$).

$\Delta\theta$: Représente la variation de l'angle de la jambe (en $^{\circ}$).

Δt : Représente la variation du temps (t) (en s).



Fig. 20 Représente l'angle de la jambe lors de la phase du placement de la jambe d'appui et le balancement de pied de frappe.

4.1.2.3. Vitesse de la cuisse :

La vitesse de la cuisse est le produit de la vitesse angulaire en de la cuisse en $rad.s^{-1}$ et le rayon de la cuisse mesurait préalablement (mesures anthropométriques segmentaires).

Formule :

L'équation générale utilisée pour calculer la vitesse de la cuisse est :

$$v_{cuisse} = \omega_{cuisse} \cdot R_{cuisse}$$

Où :

v_{cuisse} : Représente la vitesse de la cuisse (en $m.s^{-1}$).

ω_{cuisse} : Représente la vitesse angulaire de la cuisse (en $.s^{-1}$).

R_{cuisse} : Représente le rayon de la cuisse (en m).

4.1.2.4. Vitesse de la jambe :

La vitesse de la jambe est le produit de la vitesse jambe en de la cuisse en $rad.s^{-1}$ et le rayon de la jambe mesurait préalablement (mesures anthropométriques segmentaires).

Formule :

L'équation générale utilisée pour calculer la vitesse de la jambe est :

$$v_{jambe} = \omega_{jambe} \cdot R_{jambe}$$

Où :

v_{jambe} : Représente la vitesse de la jambe (en $m.s^{-1}$).

ω_{jambe} : Représente la vitesse angulaire de la jambe (en $.s^{-1}$).

R_{jambe} : Représente le rayon de la jambe (en m).

4.1.2.5. Vitesse du pied :

La vitesse du pied est la somme des vitesses de la cuisse et de la jambe selon la théorie de la chaîne cinétique.

Formule :

L'équation générale utilisée pour calculer la vitesse de la jambe est :

$$v_{pied} = v_{cuisse} + v_{jambe}$$

Où :

v_{pied} : Représente la vitesse du pied (en $m.s^{-1}$).

v_{cuisse} : Représente la vitesse de la cuisse (en $m.s^{-1}$).

v_{jambe} : Représente la vitesse de la jambe (en $m.s^{-1}$).

4.1.3. Contact du pied avec le ballon :

L'impact du pied avec le ballon permet le transfert nécessaire de la quantité du mouvement du pied vers le ballon qu'il a acquis à partir de la vitesse de rotation des segments inférieurs pendant la phase précédente. Au moment de l'impact, seulement 15 % de l'énergie cinétique produite par le membre oscillant est déplacée vers la balle tandis que le reste se disperse de la jambe vers les différents groupes musculaires pour ralentir le mouvement.



Fig. 21 Représente la phase du contact du pied avec le ballon.

4.1.3.1. Angle d'inclinaison du corps :

L'angle d'inclinaison est l'angle au sens antihoraire du corps pendant le contact du pied avec le ballon, figure (22).



Fig. 22 Représente l'angle d'inclinaison du corps lors de la frappe du ballon.

4.1.3.2. Angle d'attaque du pied de frappe :

L'angle d'attaque est l'angle de la cheville du pied du joueur au moment de la frappe, comme décrit sur la figure (23).



Fig. 23 L'angle d'attaque du pied de frappe.

4.1.3.3. Quantité du mouvement du pied de frappe (\vec{p}):

Pour déterminer la quantité de mouvement du pied, on doit utiliser l'équation suivante :

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

Où :

\vec{p} ; Représente la quantité du mouvement du pied ($kg \cdot m \cdot s^{-1}$).

m ; Représente la masse du pied (kg).

\vec{v} ; Représente la vitesse du pied ($m \cdot s^{-1}$).

4.1.3.4. Energie cinétique du pied de frappe (E_c) :

L'énergie cinétique du pied est déterminée par l'équation suivant :

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Où :

E_c ; Représente l'énergie cinétique du pied (J).

m ; Représente la masse du pied (Kg).

v ; Représente la vitesse du pied ($m \cdot s^{-1}$)

4.1.4. Trajectoire du ballon

Pendant cette phase le ballon est en vol vers le but, et est soumis à différentes forces agissantes sur sa trajectoire ([Cf. chapitre 02](#)).

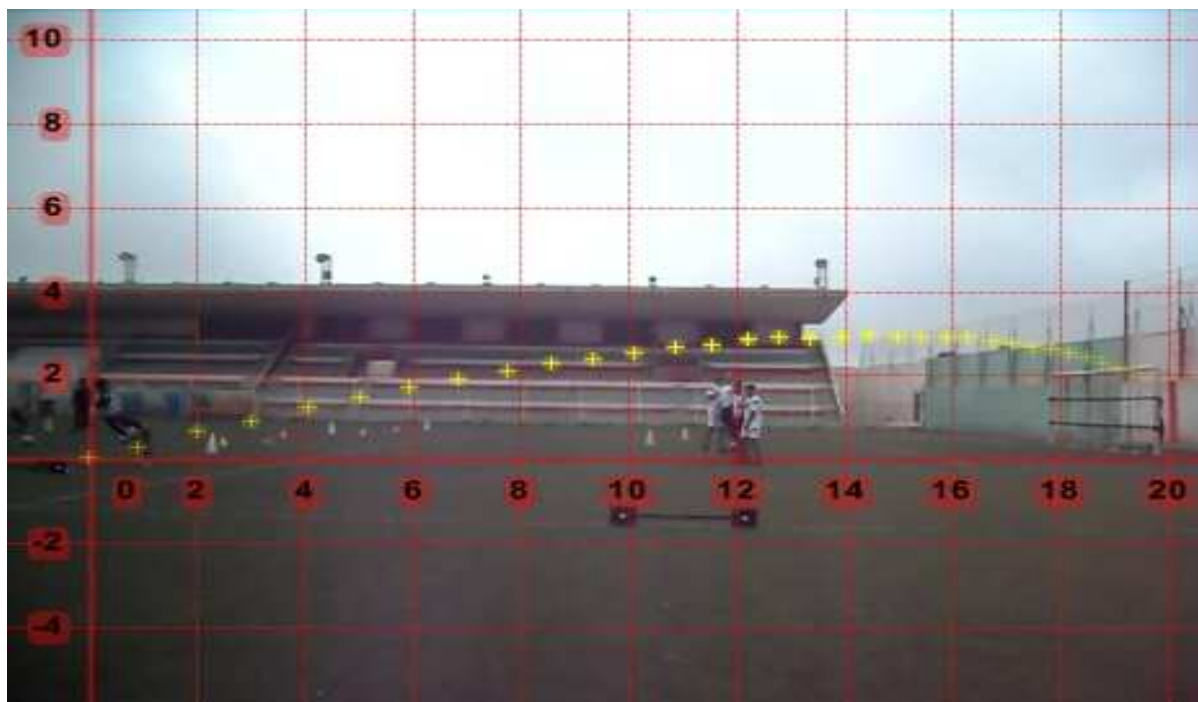


Fig. 24 Représente la trajectoire du ballon lors du tir du coup franc direct.

4.1.4.1. Temps d'envol (t):

Le temps d'envol est le temps compris entre le moment de la frappe par le joueur t_i et son arriver au but t_f , figure (25).

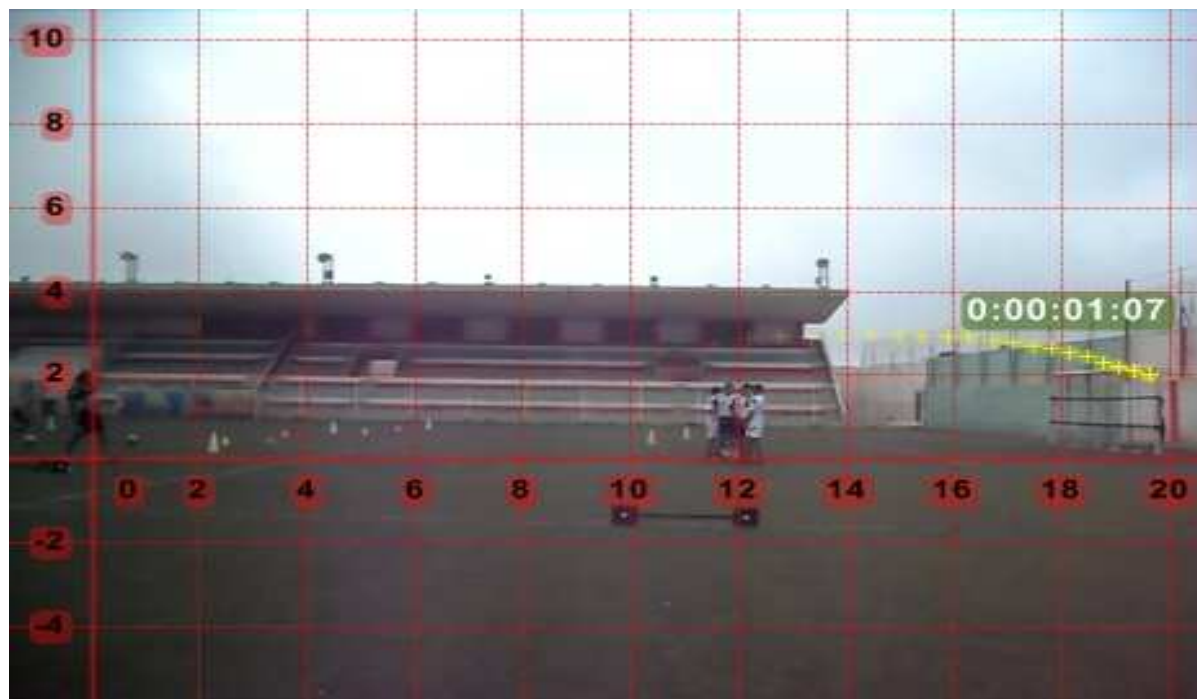


Fig. 25 Représente le temps d'envol du ballon.

Methodologie et procedures d'investigations.

4.1.4.2. Angle d'envol (θ_0):

Angle d'envol (θ_0) est l'angle initial de l'envol du ballon après la frappe du ballon par le joueur, comme on le voit sur la figure (26) représenté en bleu.

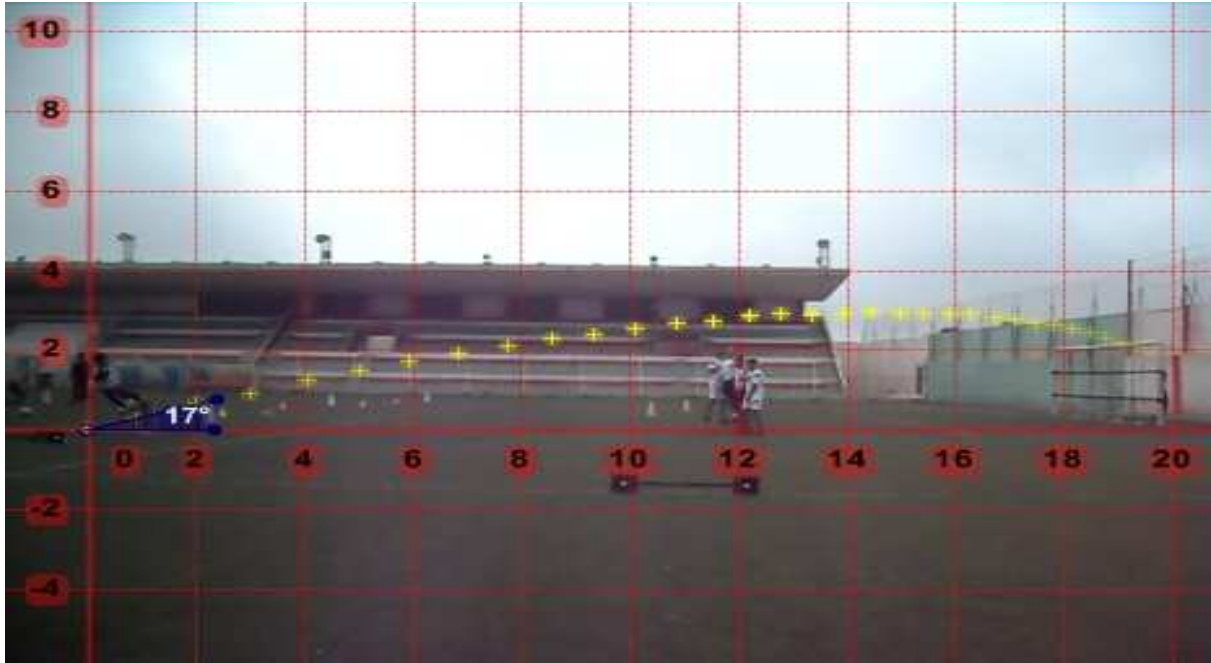


Fig. 26 Représente l'angle d'envol du ballon.

Les vitesses et accélérations sont calculées à partir des données de l'analyse vidéo avec le logiciel Tracker, et les règles trigonométriques comme suit :

4.1.4.3. La vitesse horizontale (v_x):

$$v_x = v_0 \cdot \cos \theta$$

4.1.4.4. La vitesse Verticale (v_y) :

$$v_y = v_0 \cdot \sin \theta + gt$$

4.1.4.5. La vitesse (v) :

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

Où :

- v : est la vitesse d'envol du ballon (en $m \cdot s^{-1}$)
- v_x : est la vitesse horizontale du ballon (en $m \cdot s^{-1}$)
- v_y : est la vitesse verticale du ballon (en $m \cdot s^{-1}$)
- θ : est l'angle d'envol du ballon (en $^\circ$)
- g : est l'accélération gravitaional (en $m \cdot s^{-2}$)

Méthodologie et procédures d'investigations.

t : est le temps d'envol du ballon (en s).

4.1.4.6. Accélération horizontale (a_x) :

$$a_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}$$

4.1.4.7. Accélération Verticale (a_y) :

$$a_y = \frac{\Delta v_y}{\Delta t}$$

4.1.4.8. L'accélération (a) :

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$$

Où :

a : est l'accélération d'envol du ballon (en $m \cdot s^{-2}$)
 a_x : est l'accélération horizontale du ballon (en $m \cdot s^{-2}$)
 a_y : est l'accélération verticale du ballon (en $m \cdot s^{-2}$)
 v : est la vitesse d'envol du ballon (en $m \cdot s^{-1}$).
 v_x : est la vitesse horizontale du ballon (en $m \cdot s^{-1}$).
 v_y : est la vitesse verticale du ballon (en $m \cdot s^{-1}$).
 t : est le temps d'envol du ballon (en s).

4.1.4.9. Quantité du Mouvement (\vec{p}) :

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

Où :

\vec{p} ; Représente la quantité du mouvement du ballon (en $kg \cdot m \cdot s^{-1}$).
 m ; Représente la masse du ballon (en kg).
 \vec{v} ; Représente la vitesse du ballon (en $m \cdot s^{-1}$).

4.1.4.10. Energie Cinétique (E_c) :

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Où :

E_c : Représente l'énergie cinétique du ballon (en J).
 m : Représente la masse du ballon (en kg).
 v : Représente la vitesse du ballon (en $m \cdot s^{-1}$).

4.2. La variable dépendante :

La variable dépendante est celle qui subit les effets de la variable indépendante. Voilà pourquoi elle est la conséquence présumée du phénomène d'étude. C'est le facteur que le

Méthodologie et procédures d'investigations.

chercheur essaye ou veut expliquer, dans cette étude la variable dépendante est la précision du tir du coup franc direct en football.

4.3. Les variables parasites ou contrôlées :

Une variable est dite parasite quand elle fait partie de tout facteur non désirable influant sur la variable dépendante et de ce fait nuit à l'établissement clair d'une relation entre les variables biomécaniques et la précision du tir du coup franc direct.

Afin de normaliser et contrôler ces variables parasites, les chercheurs ont procédé ainsi :

- Eliminer la pression des supporteurs en effectuant le test dans un stade vide.
- Eliminer l'enjeu en retirant le gardien de but du test.
- Donner les mêmes ballons pour tous les joueurs.
- Donner les mêmes instructions pour tous les joueurs.
- Tous les joueurs ont tiraient dans le même but.

5.L'instrument de collecte des données (Test de précision de tir du coup franc direct) :

5.1. Objectif du test :

Mesurer la précision du tir du coup franc sur une distance de 20 m du but avec mur réglementaire (9,15 m).

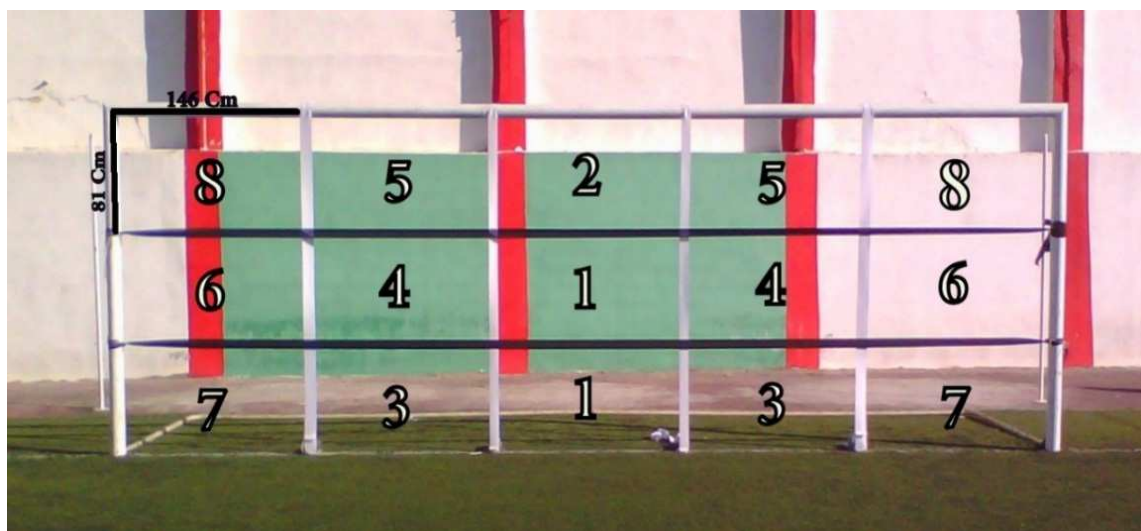


Fig. 27 Représente la division du but en quinze rectangles et les points du test de précision du tir du coup franc direct.

5.2. Outils du test :

- Un but de football est divisé avec 6 bandes élastiques de 12 centimètres, en 15 rectangles égaux d'une hauteur de 81 cm et d'une largeur de 146 cm, et numéroté de 1 à 8 selon la difficulté de la précision, voir la figure 27.

- Cinq ballons de football réglementaire.

5.3. Déroulement du test :

- L'examineur se met devant le but et derrière le tireur afin d'enregistrer le résultat de chaque tentative selon la zone de difficulté.
- Chaque joueur a cinq tentatives pour faire franchir le ballon dans le rectangle.
- Après chaque tentative les ballons sont ramassés pour ne pas gêner le déroulement du test.

5.4. Calcule des points du test :

- Les ballons qui franchissent le rectangle N° (08) ont (08) points.
- Les ballons qui franchissent le rectangle N° (07) ont (07) points.
- Les ballons qui franchissent le rectangle N° (06) ont (06) points.
- Les ballons qui franchissent le rectangle N° (05) ont (05) points.
- Les ballons qui franchissent le rectangle N° (04) ont (04) points.
- Les ballons qui franchissent le rectangle N° (03) ont (03) points.
- Les ballons qui franchissent le rectangle N° (02) ont (02) points.
- Les ballons qui franchissent le rectangle N° (01) ont (01) point.
- Les ballons qui rebondissent sur le poteau ou la barre transversale et entre dans le but ont le point du rectangle qu'ils franchissent.
- Les ballons qui rebondissent sur le poteau ou la barre transversale et n'entrent pas dans le but ont (00) point.
- Les ballons qui rebondissent sur les bandes élastiques ont le point le plus élevé du rectangle le plus proche.
- Les ballons qui sont envoyés hors du but ont (00) point.
- Après les cinq tentatives on calcule les points de chaque joueur, les points récoltés par chaque joueur peuvent varier de (00) point minimum à (40) points maximum.

6. Pré-enquête :

La pré-enquête a été réalisée le 05/03/2017 et le 15/03/2017 au stade BENSLIMANE à 10h, avec dix joueurs ; cinq joueurs sénior de football amateurs et cinq joueurs sénior de football semi-professionnels, le but de cette pré-enquête est de :

- Se familiariser avec le matériel d'enregistrement et le test de précision du coup franc direct.
- Calculer le temps nécessaire pour effectuer la collecte des données.
- Maîtriser le matériel audio-visuel utilisé pour la réalisation de cette étude.

7. Les critères de qualité du test :

Chaque test doit en principe répondre à trois critères :

- **Validité** : Le test doit mesurer ce qu'il est sensé mesurer.
- **Fiabilité** : Les résultats et l'exécution du test doivent être fiables.

Méthodologie et procédures d'investigations.

- **Objectivité** : chaque personne formée doit pouvoir effectuer et interpréter le test suivant les mêmes critères.

Un test de performance a été réalisé afin d'évaluer le niveau de précision des joueurs lors des tirs du coup franc direct.

Pour que ce test réponde aux critères de qualité exigés.

7.1. La validité :

Pour vérifier la validité de ce test, on a consulté un groupe d'experts afin de :

- Déterminer la distance du tir du coup franc direct.
- Définir différentes zones de tir.
- Identifier les zones de difficulté sur le but.
- Déterminer le nombre de joueurs effectuant le test.
- Déterminer le nombre de tentatives de chaque joueur.

On a aussi utilisé la méthode de validité différentielle pour déterminer la différence entre deux groupe de niveau différent, cinq joueurs semi professionnels, et cinq joueurs amateur ont été choisi, les résultats sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Représente les moyennes, les écarts type et le T Student des deux groupes.

	Semi professionnels		Amateurs		T Student
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	
Précision	31,99	3,62	15,16	2,01	*12,195

**T student est significatif au niveau 0,05.*

Comme on peut le voir sur le tableau (03), la valeur de T Student calculée (12,195) est significative au seuil ($p < 0,05$), cela signifie qu'il y a une différence statistiquement significative entre les deux groupes, ce qui nous dévoile que le test a une très grande validité.

7.2. La fidélité ou fiabilité :

La fidélité par test / pré-test consiste simplement à refaire le test de précision du tir du coup franc direct à nouveau aux mêmes joueurs après un intervalle de temps (Dix jours) et calculer le coefficient de corrélation entre les deux tests comme il est indiqué au tableau

suivant :

Tableau 4 : Représente les moyennes, les écarts types et le coefficient de corrélation du teste et pré-test.

Variables	Test (avant dix jours)		Pré-test (après dix jours)		Corrélation (r)
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	
Précision	32,01	3,13	31,87	2,91	*0,901

**La corrélation est significative au niveau 0,05.*

Le tableau (04) nous montre que la valeur du coefficient de la corrélation calculée (0,901) est significative au seuil ($p < 0,05$), cela traduit une corrélation statistiquement significative entre le test et le pré-test. Le test a une forte fidélité.

7.3. Objectivité :

L'objectivité s'entend comme le fait que les conclusions de l'évaluation n'ont pas été influencées par les préférences personnelles ou les positions institutionnelles des responsables de l'évaluation.

Caractéristique d'une procédure dont le résultat dépend des caractéristiques de l'individu examiné plutôt que des caractéristiques de l'examineur et ainsi, ne varie pas d'un examinateur à un l'autre. Cette procédure doit donc être explicite et standardisée de sorte que divers examinateurs utilisant un même test avec un même sujet arrivent au même résultat puisque la fiabilité du teste est élevé cela conduit également à une grande objectivité au test de cette étude.

8. Collecte et analyse des données :

Des marqueurs ont été posés à trois articulations sur les membres inférieurs des joueurs (hanche, genoux et cheville), les joueurs ont tiré un ballon avec leur jambe dominante vers un but de football (règlement FIFA ; 2,44 m de haut et 7,32 m de large) sur une distance de 20 mètres.

L'instrument de collecte des données est un test de précision du coup franc direct sur

Méthodologie et procédures d'investigations.

trois (03) positions différentes (droite, centrale et gauche) sur une distance de 20 m, comme le montre la figure 28.

Le ballon a été placé à 20 mètres devant le but. Les vidéos ont été enregistrées par trois caméras vidéos, Caméra 1 : Kodak Easy Share DX6490 ; résolution vidéo : 4 mégapixels (2304x1728 pixels), vitesse d'enregistrement : 30 ips, 2 m perpendiculaire au plan frontal de la balle, Caméra 2 : Homday X-PERT ; résolution vidéo : 1808p/720p, vitesse d'enregistrement : 25 ips / 50 ips, 5 m perpendiculaire au plan frontal du joueur et du ballon. Caméra 3 : Samsung DualView TL210 ; résolution vidéo : 12.4 mégapixel, vitesse d'enregistrement : 30 ips / 60 ips, 30 m perpendiculaire au plan frontale de la trajectoire du ballon Figure 28.

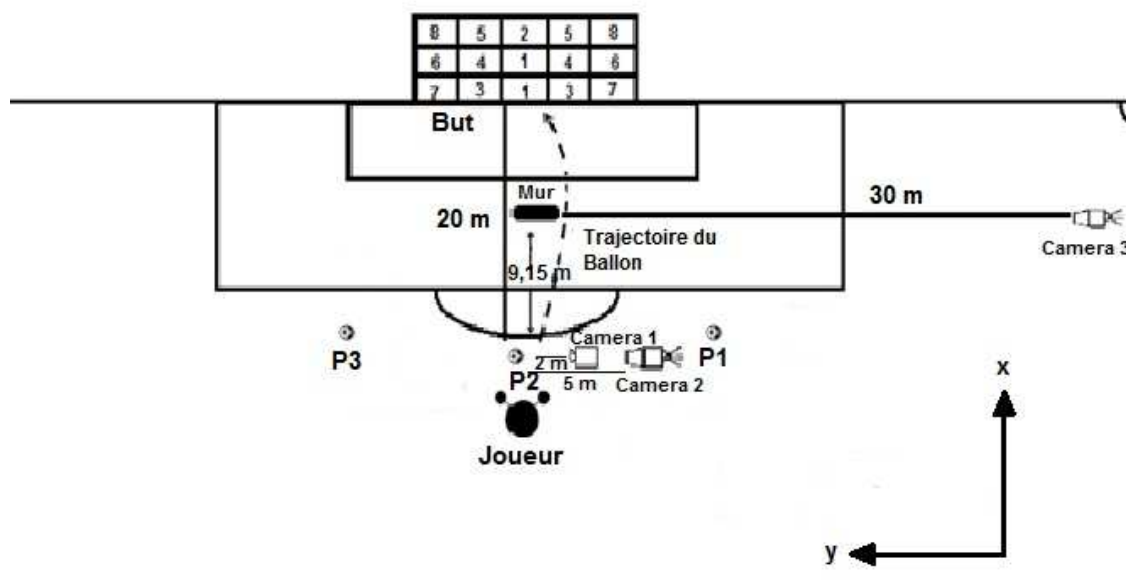


Fig. 28 Représente les procédures de collectes des données.

8.1.L'analyse vidéo a été réalisée par :

8.1.1. Dartfish :

Dartfish est un logiciel d'analyse d'images multimédias pouvant être utilisé par des sportifs, des entraîneurs mais également par des enseignants d'éducation physique et sportive. Il permet d'analyser le mouvement d'un sportif ou d'un élève, de suivre ce mouvement, de tracer des courbes et des droites sur la vidéo, de calculer des angles ... etc.

Méthodologie et procédures d'investigations.

Ce logiciel fournit l'analyse vidéo la plus performante et la plus fiable sur le marché. Des outils tels que SimulCam™ et StroMotion™ fournissent des solutions adéquates pour améliorer les performances dans tous les domaines.

La technologie d'analyse vidéo de Dartfish est utilisée par des milliers de professionnels de la santé. Ils peuvent fournir à leurs patients un traitement plus riche et efficace.

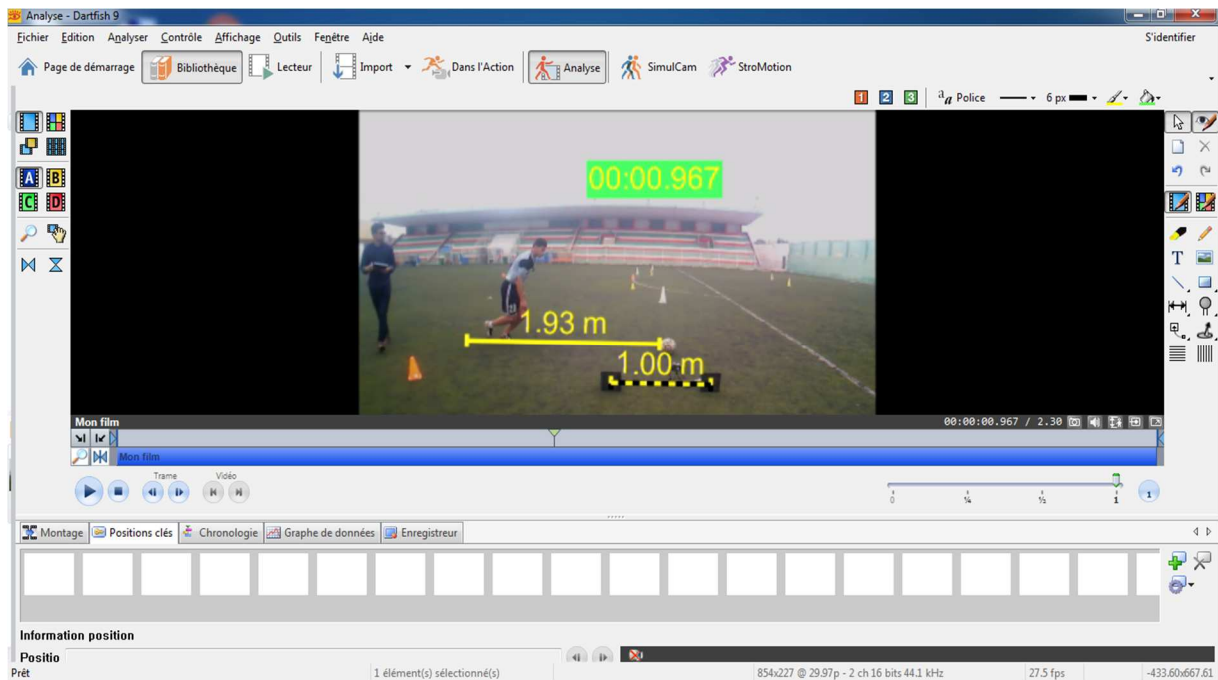


Fig. 29 Représente l'analyse vidéo par Dartfish 9.

8.1.2. Tracker :

Tracker est une application open source conçue pour aider à analyser des vidéos et images dans le but de déterminer plusieurs variables et paramètres. Idéal dans le cas d'expériences physiques, le programme permet en effet d'estimer l'accélération et la vitesse de certains objets.

Intégrant le moteur vidéo Xuggle, Tracker permet de charger des vidéos de et d'en analyser chaque détail par image. Pour commencer une analyse, il faut préciser la partie de la vidéo à étudier, ainsi que spécifier la position de l'objet surveillé.

Les résultats de l'analyse sont ensuite affichés dans un bloc dédié et mis à jour automatiquement lors de la modification des propriétés de l'objet étudié.

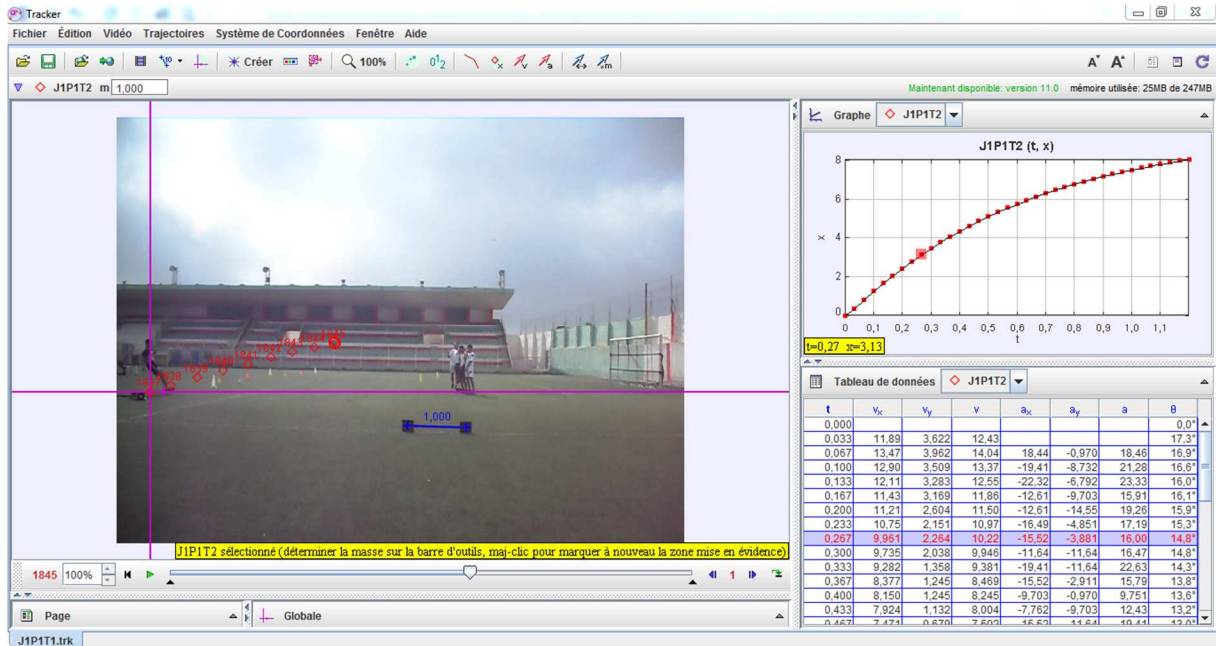


Fig. 30 Représente l'analyse vidéo par Tracker 4.95.

9. Traitement Statistique :

En utilisant les paramètres de tendance centrale (moyenne arithmétique) et de dispersion (écart-type) ainsi que le t student, pour la partie descriptive et le calcul des coefficients de corrélation de Bravais Pearson (r) et la taux de contribution qui est égale au carré du coefficients de corrélation (r²) pour la partie analytique. Les calculs ont été effectués par l'utilitaire d'analyse du logiciel IBM Spss statistics 20.

9.1. Formule Moyenne arithmétique :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

9.2. Formule Ecart type :

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}$$

9.3. Formule T Student :

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_2^2}{N_2}}}$$

9.4. Formule Coefficient de corrélation :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

9.5. Formule Coefficient de détermination :

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \right)^2$$



Chapitre 02

Analyses et Interprétations des Données.

Analyses et interprétations des données.

Le présent chapitre porte sur l'analyse et l'interprétation des données recueillies pour examiner la nature corrélacionnelle de quelques variables biomécaniques du coup franc direct et la précision du tir. L'objectif de cette analyse est de réduire les données à une forme gérable et interprétable afin que les problèmes de recherche puissent être étudiés et testés.

Le terme "analyse" désigne un certain nombre d'opérations étroitement liées qui sont effectuées dans le but de résumer les données recueillies et d'organiser les données de manière à ce qu'elles répondent aux questions de recherche. L'analyse consiste à catégoriser, ordonner, manipuler et résumer les données pour obtenir des réponses aux questions d'hypothèses de recherche.

L'analyse et l'interprétation des données de cette étude sont fondées sur les données recueillies à partir des enregistrements vidéo lors des tirs de précision du coup franc direct et leurs analyse par les logiciels Dartfish 9 et Tracker 4.95. Les résultats ont été calculés à l'aide de statistiques descriptives en utilisant les paramètres de tendance centrale (moyenne arithmétique) et de dispersion (écart-type) ainsi que les statistiques différentielles, les coefficients de corrélation de Bravais Pearson (r) et le coefficient de détermination (r^2).

L'analyse des données a été effectuée dans l'ordre suivant :

1. Présentation descriptive des données :

1.1. La phase d'approche :

On constate sur le tableau 5 que le nombres de pas a la moyenne la plus élevée qui est de 3,19 *pas* avec un écart type de 0,46, suivie par la distance d'approche avec une moyenne de 2,06 $m \pm 0,54$, en troisième position on trouve la vitesse d'approche qui a une moyenne de 1,53 $m \cdot s^{-1}$, et un écart type de 0,3, en suite le temps d'approche puis l'accélérations d'approche avec des moyennes de 1,32 $s \pm 0,2$ et 1,17 $m \cdot s^{-2} \pm 0,22$ respectivement.

Tableau 5 : Représente les moyennes et les écarts types des variables biomécanique de la phase d'approche.

Variabes Biomécaniques	$t_{d'approche}$	$D_{d'approche}$	$v_{d'approche}$	$a_{d'approche}$	$Np_{d'approche}$
Moyennes	1,32 s	2,06 m	1,53 $m \cdot s^{-1}$	1,17 $m \cdot s^{-2}$	3,19 <i>pas</i>
Ecart types	0,2	0,54	0,3	0,22	0,46

1.2. Le placement de la jambe d'appui et le balancement du pied de frappe :

Sur la tableau 6 il est observé que la vitesse angulaire de la jambe a une moyenne de $13,67 \text{ rad. s}^{-1} \pm 2,12$, en suite la vitesse angulaire de la cuisse avec une moyenne de $7,24 \text{ rad. s}^{-1}$ et un écart type de $0,95$, suivie par la vitesse du pied qui a une moyenne de $6,73 \text{ m. s}^{-1} \pm 0,99$, puis la vitesse de la jambe avec une moyenne de $4,34 \text{ m. s}^{-1} \pm 0,78$, et après la vitesse de la cuisse qui a une moyenne de $2,39 \text{ m. s}^{-1}$ et un écart type de $0,43$

Tableau 6 : Représente les moyennes et les écarts types des variables biomécaniques des phases du placement de la jambe d'appui et le balancement du pied de frappe.

Variables Biomécaniques	ω_{cuisse}	ω_{jambe}	v_{cuisse}	v_{jambe}	v_{pied}
Moyennes	7,24 <i>rad. s⁻¹</i>	13,67 <i>rad. s⁻¹</i>	2,39 <i>m. s⁻¹</i>	4,34 <i>m. s⁻¹</i>	6,73 <i>m. s⁻¹</i>
Ecart types	0,95	2,12	0,43	0,78	0,99

1.3. La phase du contact du pied avec le ballon :

Il est indiqué sur le tableau 7 que l'énergie cinétique du pied à une moyenne de $26,62 \text{ J} \pm 8,04$, alors que l'angle d'attaque du pied a une moyenne de $21,8^\circ$ et un écart type de $5,05$, tandis que l'angle d'inclinaison du corps et la quantité du mouvement du pied ont des moyennes de $12,44^\circ \pm 4,67$ et $7,75 \text{ Kg. m. s}^{-1} \pm 1,14$ respectivement.

Tableau 7 : Représente les moyennes et les écarts types des variables biomécaniques de la phase du contacte du pied avec le ballon.

Variables Biomécaniques	$\theta_{\text{inclinaison du corps}}$	$\theta_{\text{d'attaque du pied}}$	p_{pied}	$E_{\text{C pied}}$
Moyennes	12,44°	21,8°	7,75 <i>Kg. m. s⁻¹</i>	26,62 <i>J</i>
Ecart types	4,67	5,05	1,14	8,04

1.4. La phase de l'envol du ballon :

On voit sur le tableau 8 que l'énergie cinétique du ballon a une moyenne de $54,22 \text{ J} \pm 8,09$, suivie par l'accélération du ballon avec une moyenne de $17,37 \text{ m. s}^{-2} \pm 1,8$, puis par l'angle initial d'une moyenne de $17,09^\circ \pm 4,15$, tandis que l'accélération verticale a une moyenne de $16,89 \text{ m. s}^{-2}$ et un écart type de $2,17$, et la vitesse du ballon a une moyenne de

Analyses et interprétations des données.

15,48 $m.s^{-1} \pm 1,15$, alors que la vitesse verticale de ballon a une moyenne de 14,48 $m.s^{-1} \pm 1,01$, suivie par la quantité du mouvement du ballon et la vitesse horizontale avec des moyenne de 6,97 $kg.m.s^{-1} \pm 0,52$ et 5,54 $m.s^{-1} \pm 0,71$ respectivement, et au final l'accélération horizontale avec une moyenne de 3,49 $m.s^{-2} \pm 1,68$ et le temps d'envol du ballon 1,33 $s \pm 0,21$.

Tableau 8 : Représente les moyennes et les écarts types des variables biomécaniques de la phase d'envol du ballon.

Variables Biomécaniques	$t_{d'envol\ du\ ballon}$	θ_0	v_x	v_y	v	a_x	a_y	a	p_{ballon}	Ec_{ballon}
Moyenne	1,33 s	17,09°	14,48 $m.s^{-1}$	5,45 $m.s^{-1}$	15,48 $m.s^{-1}$	16,89 $m.s^{-2}$	3,49 $m.s^{-2}$	17,37 $m.s^{-2}$	6,97 $kg.m.s^{-1}$	54,22 J
Ecart Type	0,21	4,15	1,01	0,71	1,15	2,17	1,68	1,8	0,52	8,09

2. Présentation des corrélations entre les variables de l'étude :

Hypothèse 01 : « Il y a des corrélations statistiquement significatives entre les variables biomécaniques et la précision du coup franc direct ».

2.1. Phase d'approche :

Tableau 9 : Représente la corrélation des variables biomécaniques de la phase d'approche avec la précision du tir du coup franc direct.

Variables biomécanique	$t_{d'approche}$	$D_{d'approche}$	$v_{d'approche}$	$a_{d'approche}$	$Np_{d'approche}$
Précision	0,616**	0,638**	0,483**	0,065	0,070

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

Comme on peut le constater sur le tableau 05 ; le **temps d'approche des joueurs** ($t_{d'approche}$) a une corrélation statistiquement significative de 0,616 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

Tandis que **la distance d'approche des joueurs** ($D_{d'approche}$) a une corrélation significative de 0,638 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification

$p < 0,01$.

Pour la **vitesse d'approche des joueurs** ($v_{d'approche}$) la corrélation est significative avec 0,483 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

Par contre **L'accélération d'approche des joueurs** ($a_{d'approche}$) a une corrélation non significative de 0,065 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

Tout comme le **nombre de pas des joueurs lors de la phase d'approche** ($Np_{d'approche}$) qui a une corrélation non significative de 0,070 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

2.2. Le placement de la jambe d'appui et le balancement de pied de frappe :

Tableau 10 : Représente la corrélation des variables biomécaniques des phases du placement de la jambe d'appui et le balancement du pied de frappe avec la précision du tir du coup franc direct.

Variables biomécanique	ω_{cuisse}	ω_{jambe}	v_{cuisse}	v_{jambe}	v_{pied}
Précision	0,555**	0,445**	0,350**	0,424**	0,488**

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

Le tableau 06 nous montre que ; **la vitesse angulaire de la cuisse** (ω_{cuisse}) a une corrélation statistiquement significative de 0,555 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

Aussi que **la vitesse angulaire de la jambe** (ω_{jambe}) a une corrélation significative de 0,445 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

La vitesse de la cuisse (v_{cuisse}) a une corrélation significative de 0,350 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

Alors que **la vitesse de la jambe** (v_{jambe}) a une corrélation de 0,424 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

Analyses et interprétations des données.

Cependant, la **vitesse du pied** (v_{pied}) a une corrélation significative de 0,488 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

2.3. Contact du pied avec le ballon :

Tableau 11 : Représente la corrélation des variables biomécaniques de la phase de contact du pied avec le ballon avec la précision du tir du coup franc direct.

Variables biomécanique	$\theta_{\text{inclinaison du corps}}$	$\theta_{\text{d'attaque du pied}}$	p_{pied}	EC_{pied}
Précision	0,187	-0,089	0,455**	0,416**

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

Il est observé sur le tableau 07 que ; **l'angle d'inclinaison du corps** ($\theta_{\text{inclinaison du corps}}$) a une corrélation non significative de 0,187 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

Tout comme **l'angle d'attaque du pied de frappe** ($\theta_{\text{d'attaque du pied}}$) a une corrélation non significative aussi de -0,089 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

Tandis que la **quantité du mouvement du pied de frappe** (p_{pied}) a une corrélation statistiquement significative de 0,455 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

Et **l'énergie cinétique du pied de frappe** (EC_{pied}) a une corrélation significative de 0,416 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

2.4. L'envol du ballon :

Tableau 12 : Représente la corrélation des variables biomécaniques de la phase d'envol du ballon avec la précision du tir du coup franc direct.

Variables biomécanique	$t_{\text{d'envol du ballon}}$	θ_0	v_x	v_y	v	α_x	α_y	a	p_{ballon}	EC_{ballon}
Précision	0,781	0,608	0,580	0,500	0,582	0,615	-0,398**	0,636	0,582	0,590**
	**	**	**	**	**	**		**	**	

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

Analyses et interprétations des données.

Le tableau 08 nous présente les résultats de la phase d'envol du ballon ; **le temps d'envol du ballon** ($t_{d'envol\ du\ ballon}$) a une corrélation statistiquement significative de 0,781 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

L'angle d'envol du ballon (θ_0) a une corrélation significative de 0,608 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

Alors que **la vitesse horizontale du ballon a une** (v_x) a une corrélation significative de 0,580 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

Tandis que **la vitesse verticale du ballon** (v_y) a une corrélation significative de 0,500 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

Cependant, **La vitesse du ballon** (v) a une corrélation significative de 0,582 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

Alors que **l'accélération horizontale du ballon** (a_x) a une corrélation statistiquement significative de 0,615 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

L'accélération verticale du ballon (a_y) a une corrélation significative de -0,398 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

L'accélération du ballon (a) a une corrélation significative de 0,636 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

Cependant, **la quantité de mouvement du ballon** (p_{ballon}) a une corrélation significative de 0,582 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

Et **l'énergie cinétique du ballon** (Ec_{ballon}) a une corrélation significative de 0,590 avec la précision du tir du coup franc direct, au niveau signification $p < 0,01$.

3. Présentation des taux de contributions des variables de l'étude :

Hypothèse 02 : « Il y a des taux de contributions statistiquement significatifs entre les variables biomécaniques et la précision du coup franc direct ».

3.1. La phase d'approche :

On voit sur la figure 31 que les taux de contribution varient d'une variable à une autre, on constate que la distance d'approche a le taux le plus élevé avec 41 %, suivie par le temps d'approche avec un taux de 38 % et en 3ème position la vitesse d'approche avec un taux de 23 %, alors que l'accélération et le nombre des pas des joueurs ont un taux nul de 00 %.

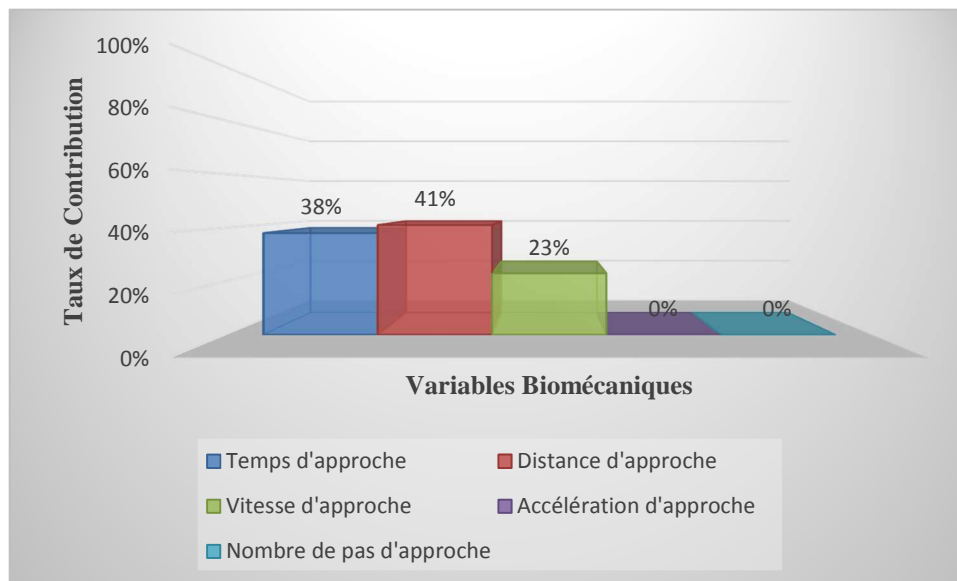


Fig. 31 Représente le taux de contribution des variables biomécanique de la phase d'approche.

3.2. Le placement de la jambe d'appui et le balancement du pied de frappe :

Sur la figure 32 on observe que la vitesse angulaire de la cuisse a le plus haut taux de contribution avec 31 %, suivie de la vitesse du pied et la vitesse angulaire de la jambe avec un taux de 24 % et 20 % respectivement, puis la vitesse de la jambe avec un taux de contribution de 18 % et enfin la vitesse de la cuisse avec 12 %.

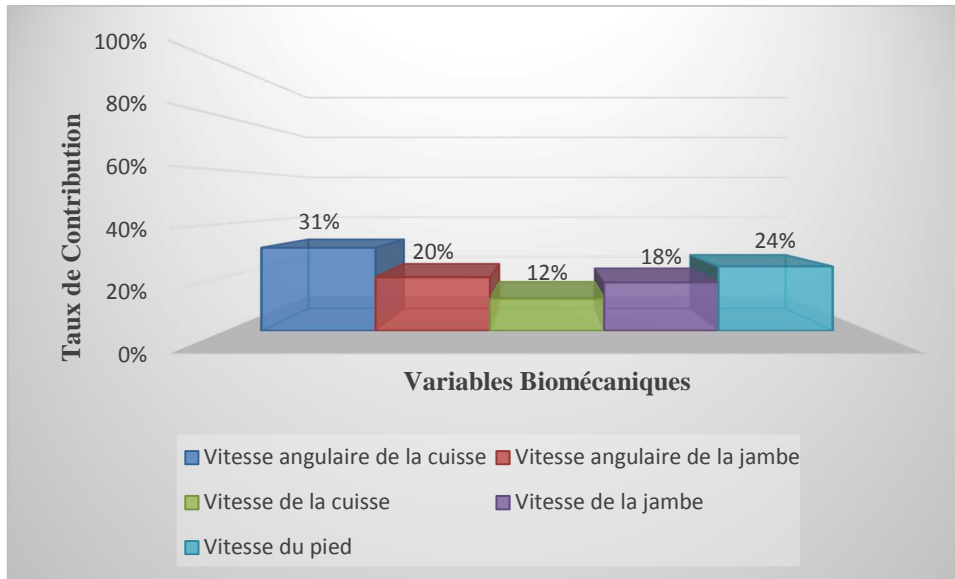


Fig. 32 Représente le taux de contribution des variables biomécaniques des phases du placement de la jambe d'appui et le balancement du pied de frappe.

3.3. La phase du contact du pied avec le ballon :

Il est indiqué sur la figure 33 que la quantité du mouvement du pied à un taux de contribution de 21 %, alors que l'énergie cinétique du pied à un taux de 17 %, tandis que les taux les plus bas sont ceux de l'angle d'inclinaison du corps et l'angle d'attaque du pied de frappe avec des taux de 03 % et de 01 % respectivement.

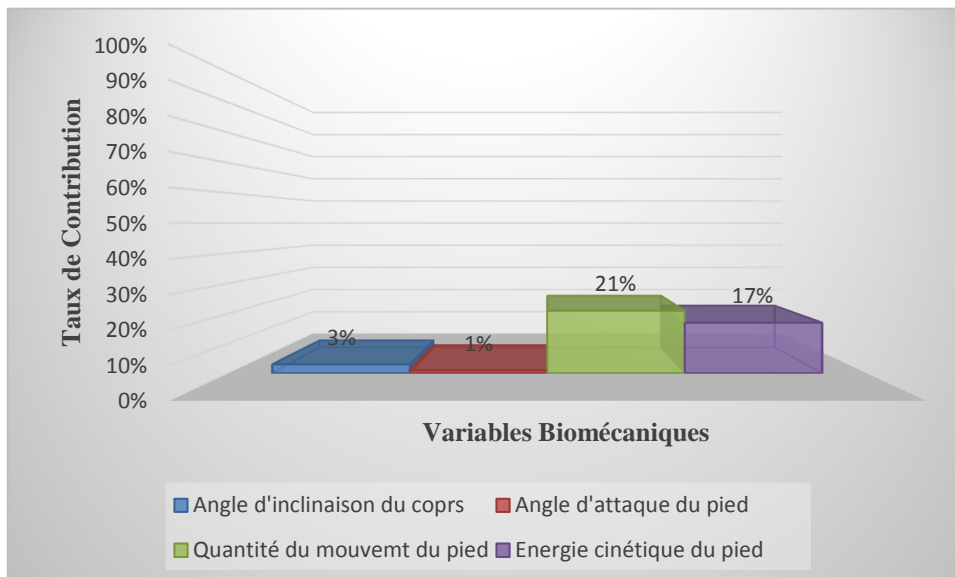


Fig. 33 Représente le taux de contribution des variables biomécaniques de la phase du contact du pied avec le ballon.

3.4. La phase de l'envol du ballon :

On voit sur la figure 34 que le temps d'envol du ballon a un taux de contribution de 61

Analyses et interprétations des données.

% et l'accélération du ballon avec un taux de 40 %, suivi par l'accélération horizontale du ballon avec un taux de 38 %, alors que l'angle d'envol du ballon a un taux de contribution de 37 %, tandis que l'énergie cinétique du ballon a un taux de 35 %, puis la vitesse horizontale, la vitesse et la quantité du mouvement du ballon ont tous un taux de 34 %. Cependant la vitesse verticale et l'accélération verticale du ballon ont un taux de 25 % et de 16 % respectivement.

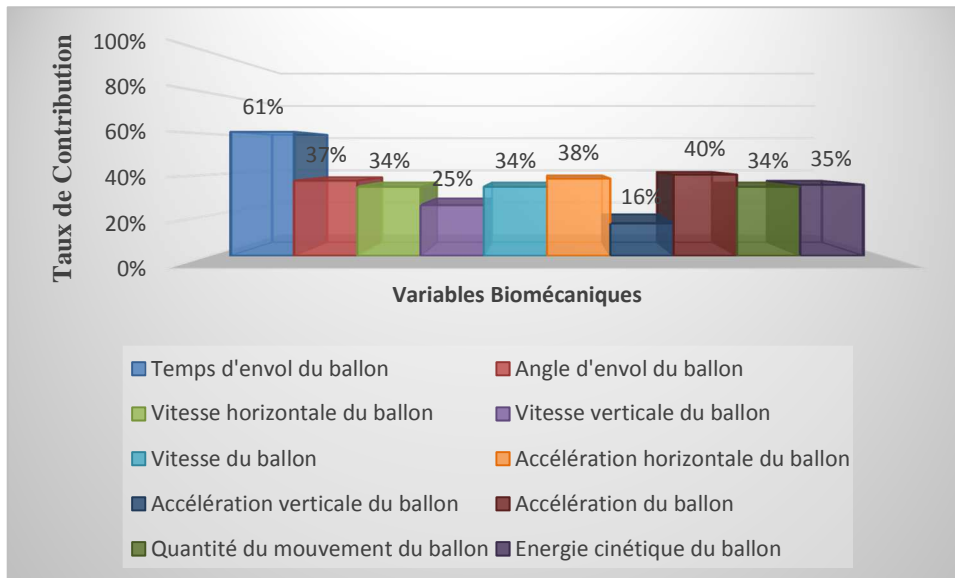


Fig. 34 Représente le taux de contribution des variables biomécaniques de la phase d'envol du ballon.

4. Discussions :

Le but de cette étude s'est concentré sur la définition des phases importantes de l'exécution du tir du coup franc, en mettant l'accent sur les variables biomécaniques influentes sur la précision du tir et la définition des paramètres agissant sur la trajectoire du ballon, afin de fournir des indices biomécaniques ayant un rôle déterminant dans la réussite du tir du coup franc direct.

Après l'analyse et l'interprétation des résultats, on peut discuter les hypothèses de cette étude comme suit :

4.1. Hypothèse 01 :

La première hypothèse dit : « qu'il y a des corrélations statistiquement significatives entre quelques variables biomécaniques et la précision du tir du coup franc direct ».

4.1.1. Phase d'approche :

L'importance de la phase d'approche réside dans la capacité du joueur à créer une dynamique horizontale qui est transférée à travers la chaîne cinétique segmentaire afin de produire un coup de pied efficace (Alison Alcock, 2010).

Sur les cinq variables biomécaniques composant la phase d'approche dans cette étude, trois ont eu des corrélations fortement significatives avec la précision du tir du coup franc direct.

On peut ainsi dire que l'approche des joueurs était assez significative dans la réussite du tir avec un temps d'approche d'une moyenne de $1,32 \text{ s} \pm 0,20$, une distance d'une moyenne de $2,06 \text{ m} \pm 0,54$, donc une vitesse avoisinant les $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (moyenne) $1,53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \pm (\text{SD}) 0,3$.

(Lees & Nolan, 1998) soulignent qu'une course incurvée est conseillée pour l'optimisation d'une vitesse maximale du ballon afin de permettre à la cuisse d'atteindre une vitesse maximale et donc d'augmenter la vitesse de pied avant le contact avec le ballon.

La course permet au joueur d'acquérir une certaine vitesse horizontale. Elle passe par une poussée complète de la jambe d'appui. Le joueur doit se propulser vers l'avant, l'action des bras semi-fléchis à 90° est vers l'avant. Il y a gainage de bassin en rétroversion avec un

déplacement du centre de gravité en sinusoïde.

4.1.2. Phase de placement du pied d'appui et le balancement de la jambe de frappe :

Cette phase est aussi importante, toutes les variables biomécaniques étudiées ont eu des corrélations significatives avec la précision du tir du coup franc direct.

Par conséquent, la position optimale de la jambe d'appui est perpendiculaire au centre de gravité de la balle avec la position d'atterrissage suggérée est de 5 à 10 cm derrière et de 5 à 28 cm à côté de la balle (JAMES G. HAY, 1980). En gardant cela à l'esprit, (Barfield, 1998) explique également que si la jambe de soutien du botteur est à plus de 10 cm du ballon, l'équilibre du botteur sera affecté, par conséquent, la direction du ballon s'affectera.

La jambe d'appui est fléchie à environ 26° au contact avec le sol et s'étend à environ 42° au moment du contact avec la balle (A Lees, Asai, Andersen, Nunome, & Sterzing, 2010).

La vitesse angulaire de la cuisse est d'environ $7,24 \text{ rad.s}^{-1} \pm 0,95$, tout comme la vitesse angulaire de la jambe $13,67 \text{ rad.s}^{-1} \pm 2,12$, à ce moment, la jambe d'appui est continuellement fléchie au niveau de l'articulation du genou pour absorber la force de réaction du sol et à son tour provoque la décélération du mouvement vers l'avant du corps. Ceci agit comme un décalage pour que le corps se stabilise et permet aux membres inférieurs de produire et de transférer de la puissance pour donner un coup de pied au ballon (Anthony J. Blazeovich, 2007; Kellis & Katis, 2007; A Lees, Asai, Andersen, Nunome, et al., 2010).

Lorsque le genou passe de cette position pliée avec l'élan arrière à une position tendue avant le coup de pied, il permet un plus grand transfert de force à la balle.

La rotation de la hanche (pelvienne) fournit une accélération maximale et un transfert de puissance par l'extension du genou au moment du balancement de la jambe. L'articulation de la hanche agit comme un point de pivot pour les membres inférieurs et est comparable au genou en ce qui concerne la production de couple cinétique.

4.1.3. Phase du contact du pied avec le ballon :

L'analyse du mouvement des coups de pied a été étudiée par plusieurs chercheurs (Andersen, Dorge et Thomsen, 1999a ; Plagenhoef, 1971). Ces études ont porté sur l'analyse

cinématique d'un coup de pied. D'autres études ont analysé la force ou le couple articulaire dans un coup de pied (Carré et Asai, 2004).

Après l'analyse des résultats de cette étude il a été démontré que l'angle d'inclinaison du corps, tout comme l'angle d'attaque du pied de frappe ont une corrélation insignifiante avec la précision du tir du coup franc direct, cela se traduit par la constante posture des joueurs au moment de la frappe malgré le changement des points lors du test de précision du tir du coup franc.

La quantité du mouvement est statistiquement significative avec la précision du tir du coup franc direct, son transfert s'effectue à travers la chaîne cinétique de tous les segments, en commençant par le pied de soutien jusqu'à la jambe, puis la cuisse (gauche pour un tireur droitier), puis vers le tronc en descendant à la cuisse, puis la jambe et enfin le pied droit du tireur après impact avec la balle (Tsaousidis & Zatsiorsky, 1996).

Bien que, l'énergie cinétique du pied de frappe était significative avec la précision du tir du coup franc direct au moment de l'impact, seulement 15 % de l'énergie cinétique produite par le membre oscillant est déplacée vers la balle tandis que le reste se disperse de la jambe vers les différents groupes musculaires pour ralentir le mouvement.

Car les collisions sont généralement classées comme étant élastiques ou inélastiques ; si la collision est élastique, chaque objet conserve une certaine énergie cinétique ($V_{\text{après l'impact}} > 0$). L'élasticité d'un impact est indiquée par le coefficient de restitution (e), qui quantifie la mesure dans laquelle une collision parfaite est modifiée par les propriétés matérielles des objets en collision. Une collision parfaitement élastique a ($e = 1$), et la somme de l'énergie cinétique des deux objets avant l'impact est égale à la somme de l'énergie cinétique après l'impact, pour la plupart des impacts dans le sport ($e < 1$).

4.1.4. Phase d'envol du ballon :

Lors de l'envol du ballon il est constaté que le temps d'envol du ballon varie entre 1 s et 1,9 s avec une moyenne de 1,33 s durant les 20 m que séparent le positionnement initial du ballon et les buts. Le temps d'envol est significative avec la précision du tir du coup franc direct, ces résultats vont dans le même sens que l'étude de De Luca qui a conclu que le temps minimal

d'envol du ballon est compris 0,70 s et 1,63 s (De Luca, Faella, W, Halliday D, & A, 2017), ce qui laisse peu de temps au gardien de but pour anticiper la trajectoire du ballon. Donc, d'augmente les chances de convertir le coup franc en but.

On observe aussi la signification de l'angle d'envol du ballon et que le meilleur angle selon cette étude pour réussir le tir du coup franc est de 25° , ce qui confirme les résultats de (Hong et al., 2010b) en admettant que la moyenne de l'angle d'envol du ballon lors du tir du coup franc est de $29,3^\circ \pm 5,9$ pour un tir de balle flottante et de $21,8^\circ \pm 3,6$ pour un tri avec une trajectoire de balle courbée.

Cependant on peut voir que la moyenne de la vitesse du ballon est de $15,39 \pm 2,47 m \cdot s^{-1}$. Alors que (Hong, Kazama, Nakayama, & Asai, 2012) affirment que la moyenne de la vitesse du ballon lors du tir direct au but au-dessus du mur est de $28,3 m \cdot s^{-1}$, pour un tir avec une balle flottante la vitesse est de $25,8 m \cdot s^{-1}$, alors que pour un tir courbé la vitesse est de $26,0 m \cdot s^{-1}$. Pour conclure, la vitesse du tir du coup franc direct est comprise entre 24,7 et $29,9 m \cdot s^{-1}$, alors que pour un coup franc courbée la vitesse est entre 25,4 et $27,4 m \cdot s^{-1}$.

(De Luca et al., 2017) estime que la vitesse initiale du ballon $v_0 = 20,4 m \cdot s^{-1}$, afin que le ballon parcourt la trajectoire de son envol durant le tir du coup franc en un minimum de temps.

Il est connu que la quantité du mouvement et le produit de la masse et la vitesse de translation du ballon comme il est indiqué plus haut. Le transfert de la quantité du mouvement se fait à travers la chaîne cinétique de tous les segments, en commençant par le pied d'appui en remontant vers la jambe, puis la cuisse (gauche pour un tireur droitier), puis vers le tronc et en redescendant vers la cuisse, puis la jambe et enfin le pied droit du tireur après l'impact avec le ballon (Tsaousidis & Zatsiorsky, 1996).

4.2. Hypothèse 02 :

La deuxième hypothèse dit : « qu'il y a des taux de contributions statistiquement significatives entre quelques variables biomécaniques et la précision du tir du coup franc direct ».

4.2.1. Phase d'approche :

Le temps et la distance comme la vitesse d'approche ont eu des taux de contributions statistiquement significatives avec la précision du tir du coup franc comme il est indiqué plus haut.

Cependant on n'a pas abordé l'angle d'approche car Egan et ses collègues (**Egan, Vwerheul, & Savelsbergh, 2007**) ont étudié cette variable et ont rapporté des angles d'approche auto-sélectionnés d'environ 43°, ce qui corrobore les recherches antérieures qui avaient permis de trouver un angle d'approche d'environ 45° optimisant la réussite du tir du ballon. (**Isokawa & Lees, 1988**). (**Scurr & Hall, 2009**) constatent que l'angle d'approche de 45° et 60° peut augmenter la rotation du ballon et ce grâce à la cuisse pelvienne et l'abduction de la jambe de frappe au moment de l'impact avec le ballon.

Lors de cette étude il a été trouvée qu'une course d'élan de 3 à 4 pas avec une moyenne de $3,19 \pm 0,46$ n'a pas de taux de contribution significative afin de réussir à marquer un coup franc direct. pour cause (**Alison Alcock et al., 2012**) a constaté qu'une grande vitesse a été obtenue en utilisant une course d'approche avec 6 à 8 pas, alors que les joueurs utilisent naturellement une distance d'approche qui les oblige à faire un petit nombre de pas (2-4). Néanmoins ce type d'approche génère une faible vitesse (**Kellis et Katis, 2007 ; Lees, Kershaw et Moura, 2005**), donc un mauvais transfert à travers les chaînes cinétiques aux segments inférieures. Ainsi, la nature de l'approche semble être un facteur important et non négligeable dans la réussite du tir du coup franc direct.

4.2.2. Phase de placement du pied d'appui et le balancement de la jambe de frappe :

Un placement correct de la jambe d'appui est essentiel pour maintenir la distribution du poids corporel et la production de force tout au long du mouvement de coup de pied. Lorsque la jambe d'appui entre en contact avec le sol, elle produit une force vers l'avant qui s'exerce dans le sol. Celle-ci est ensuite rencontrée par une force de réaction au sol remontant la jambe qui fait référence à la troisième loi de Newton dans chaque action produisant une réaction égale et opposée (**Anthony J. Blazeovich, 2007**).

L'étape suivante du coup de pied a lieu en même temps que la plante du pied. Il s'agit de

l'élan vers l'arrière de la jambe en préparation au contact du pied avec le ballon. Dans cette étape du processus, le joueur a le bras opposé de la jambe de frappe levé et le pied d'appui pointé vers le but, ce qui favorise l'équilibre et la rotation du corps (Chysowych, 1979). Il a également la cuisse à une vitesse de $2,39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \pm 0,43$, la jambe avec une vitesse de $4,34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \pm 0,78$ et le pied avant le contact avec le ballon une vitesse de $6,73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \pm 0,97$, la jambe de frappe s'étend maintenant avec le genou complètement fléchi.

4.2.3. Phase du contact du pied avec le ballon :

La qualité générale du coup de pied est déterminée par l'impact du pied avec le ballon au moment du contact. Une vitesse de rotation plus élevée produite par le pied avant l'impact se traduira par une vitesse de rotation plus élevée et un temps de contact inférieur à 10 millisecondes, $9,0 \text{ ms} \pm 0,4$ (SHINKAI, NUNOME, ISOKAWA, & IKEGAMI, 2009) et $9,12 \text{ ms} \pm 0,28$ (Asai, Carre, Akatsuka, & Haake, 2002).

Selon les résultats de (Andersen et al., 1999; Dörge et al., 2002), la valeur de e pour les coups de pied de football varie de 0,46 à 0,68. Pour les ballons homologués FIFA, le coefficient de restitution doit se situer entre 0,82 et 0,88 à 20 degrés Celsius et entre 0,79 et 0,88 à 5 degrés Celsius. Le coefficient est mesuré en relâchant le ballon sur une surface rigide à partir d'une hauteur de 2 m et en mesurant la hauteur de rebond. Le coefficient est donné comme racine carrée du rapport entre la hauteur de rebond et la hauteur de chute initiale (Wuart, Kelley, James et Allen, 2011).

$$e = \sqrt{\frac{h_1}{h_0}}$$

e : Coefficient de restitution.

h_1 : La hauteur du rebond.

h_0 : La hauteur de chute initiale.

Pour une technique optimale l'impact avec le ballon devrait idéalement être frappé vers l'extrémité distale du pied où la flexion involontaire de la planteuse est causée. La proportion totale d'énergie restante après contact est quantifiée par le coefficient de restitution variant de 0,46 à 0,88. La restitution globale dépend des propriétés mécaniques du ballon, de la

température du ballon, de la chaussure, de la cheville et du pied au moment de l'impact.

4.2.4. Phase d'envol du ballon :

Selon (Sørensen & Rasmussen, 2017) le ballon quitte le pied du joueur avec une vitesse de 35 à 36 $m.s^{-1}$ et une vitesse angulaire de -27 à -44 $rad.s^{-1}$ pour arriver au but avec une vitesse de 26 à 27 $m.s^{-1}$ et une vitesse angulaire de -16 à -27 $rad.s^{-1}$ afin que la balle passe juste au-dessus du mur et au-dessous de la barre transversale, donc assurer la précision du tir du coup franc direct.

L'accélération du ballon a une moyenne de $12,14 \pm 3,95 m.s^{-2}$, cela se comprend vu la vitesse que le ballon lors de son envol afin de maximiser au plus haut les chances de la précision du tir, l'accélération du ballon est comprise entre 9 et 20 $m.s^{-2}$.

Ces résultats traduisent l'importance de chaque variable étudiée lors de la phase de l'envol du ballon qui font écho à l'analyse faite plus haut, dont on a pu constater que toutes les variables liées au ballon ont un taux de contribution très significative sur la précision du tir ceci du au transfert de l'énergie et la quantité du mouvement du joueur vers le ballon par la chaîne cinétique segmentaire.

5. Conclusion

Les exigences du football moderne ne cessent d'augmenter. Il est connu que les sports collectifs comme le football sont très complexes de par les paramètres qu'ils mettent en jeu. Effectivement, le travail de cette thèse s'est concentré sur les paramètres biomécaniques entrants en jeu dans l'habileté du coup de pied dans le football. En étudiant les corrélations de ces derniers avec la précision du tir du coup franc.

Le but de cette étude était d'identifier les variables biomécaniques influentes sur la précision du coup franc direct, tout en définissant les phases importantes de l'exécution du tir du coup franc, afin de fournir des indices biomécaniques aux joueurs et entraîneurs pour réussir le coup franc direct.

Les résultats obtenus mettent en avant les variables cinématiques et cinétiques, présentées, décrites et interprétées plus haut, ayant une corrélation statistiquement significative

et importante avec la réussite du tir du coup franc, ce qui nous dévoile qu'il est clair que l'analyse de la performance du tir de coup franc à partir des phases qui la compose, démontre l'importance des variables constituantes chaque phase, toutes liés les uns avec les autres afin de maximiser la fluidité de l'enchaînement segmentaire du joueur tout au long du coup franc.

Pour une performance optimale, un joueur doit viser à développer une chaîne cinétique plus fluide afin de maximiser la puissance et la précision du tir. La fluidité résulte du maintien de la stabilité, d'un plus grand degré de liberté des segments et de la mobilité articulaire.

Lors de l'envol du ballon, l'angle et la vitesse initiaux ont un rôle très important dans la réussite du tir du coup franc direct, tout comme la gravité et l'aérodynamique sont responsables de la diversité des trajectoires du ballon ; à faible vitesse la gravité domine et seule la parabole galiléenne est observée, à forte vitesse l'aérodynamique devient prépondérante et la trajectoire se met à dépendre de la rotation du ballon, sans rotation celui-ci va tout droit ou zigzague, suivant la nature laminaire ou turbulente de sa couche limite.

Cette trajectoire quasi rectiligne perdure, jusqu'à ce que le ballon soit suffisamment ralenti pour que la gravité le fasse tomber, donnant lieu à des paraboles tronquées. Le dernier régime est celui des ballons en rotation qui conduit à des cercles, voire à des morceaux de spirale lorsque la distance parcourue est suffisamment grande.

6. Recommandations, Limites et Perspectives :

La limitation du modèle d'analyse du mouvement sur le plan sagittal perpendiculaire au centre de gravité du joueur et la trajectoire d'envol du ballon en deux dimensions n'est pas représentative pour la plupart des véritables tirs des coups francs directs.

Pour cause de nombreux joueurs comptent sur la rotation latérale pour courber la balle autour du mur plutôt qu'au-dessus de ce dernier, tout comme il faut prendre en considération les facteurs naturellement variables tels que le vent et l'humidité. Même le changement d'air avec la température ou l'altitude peut être significatif.

Enfin, le mur n'est ni statique ni parfait dans le sens où de nombreux buts sont marqués

par des ouvertures entre joueurs dans le mur ou sous les pieds des défenseurs.

Ceci devrait être pris en compte lors de futures études sur le tir du coup franc direct dans le football.

Toutefois, grâce à l'amélioration continue des sciences du mouvements, une analyse en trois dimensions est souhaitable afin de mieux cerner certain aspect de l'habileté du tir du coup franc direct et d'approfondir le champ de l'étude en étudiant d'autres variables non négligeables sur les trois plan anatomique simultanément.

Il est recommandé aux joueurs et entraîneurs de prendre en compte les feedbacks à partir des analyses vidéo sur le plan individuel lors du tir du coup franc, pour déceler les points forts et faibles de chaque joueur et d'améliorer la technique du tir lors des entraînements. Il est aussi recommandé aux biomécaniciens d'élargir l'étude de cette habileté avec différents échantillons de joueurs et joueuse de football, des diverses catégories (Séniors, Juniors, Cadets ... etc.), amateurs et professionnels, afin de couvrir tous les aspects de cette habileté et par la suite généralisé les résultats pour sortir avec des modèles à suivre à l'avenir. Ainsi que l'utilisation des outils modernes et plus performants que l'analyse bidimensionnelle, avec des caméras à très grande vitesse (500 ips, 1000 ips, 5000 ips ... etc.) et l'analyse tridimensionnelle à l'aide de système de capture de mouvement en 3D tel que ViCon ou OptiTrack ... etc.

Bibliographies:

1. Abernethy, B., Gill, D. P., Parks, S. L., & Packer, S. T. (2001). Expertise and the perception of kinematic and situational probability information. *Perception*, 30(2), 233e252.
2. Alcock, A. (2010). Analysis of direct free kicks in the women's football World Cup 2007. *European Journal of Sport Science*. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17461390903515188>.
3. Alcock, A. (2010). Analysis of direct free kicks in the women's football World Cup 2007. *European Journal of Sport Science*, 10(4), 279–284. <http://doi.org/10.1080/17461390903515188>.
4. Alcock, A., Gilleard, W., Brown, N. A. T., Baker, J., & Hunter, A. (2012). Initial Ball Flight Characteristics of Curve and Instep Kicks in Elite Women's Football. *Journal of Applied Biomechanics*, 28, 70–77.
5. Alcock, A. M., Gilleard, W., Hunter, A. B., Baker, J., & Brown, N. (2012). Curve and instep kick kinematics in elite female footballers. *Journal of Sports Sciences*, 30(4), 387–394. <http://doi.org/10.1080/02640414.2011.643238>.
6. Amish, Saleh Radhi (1990): Effet des éléments les plus importants de la forme physique et des compétences athlétiques dans le niveau de réalisation, mémoire de maîtrise non publié, Université de Bagdad, Faculté d'éducation physique.
7. Andersen, T. B., Dorge, & Thomsen. (1999). Collisions in soccer kicking. *Sports Engineering*, 2(2), 121–125. <http://doi.org/10.1046/j.1460-2687.1999.00015.x>
8. Ángel-López, J. P., Segura-Giraldo, B., Rodríguez-Sotelo, L. D., & García-Solano, K. B. (2017). Kinematic soccer kick analysis using a motion capture system. In IFMBE Proceedings. http://doi.org/10.1007/978-981-10-4086-3_171.
9. Apriantono, T., Nunome, H., Ikegami, Y., & Sano, S. (2006). The effect of muscle fatigue on instep kicking kinetics and kinematics in association football. *Journal of Sports Sciences*, 24(9), 951-960.
10. Armenti, A. (1992). *The Physics of sports*. American Institute of Physics. Retrieved from <http://www.springer.com/us/book/9780883189467>.
11. Asai, T., Akatsuka, T., & Haake, S. J. (2002). The curve kick of a football II : flight through

the air, 1, 193–200.

12. Asai, T., Carre, M. J., Akatsuka, T., & Haake, S. J. (2002). The curve kick of a football I: impact with the foot. *Sports Engineering*, 5(4), 183–192. <http://doi.org/10.1046/j.1460-2687.2002.00108.x>.
13. Benjamin Noël, Philip Furley, John van der Kamp, Matt Dicks & Daniel Memmert (2014): The development of a method for identifying penalty kick strategies in association football, *Journal of Sports Sciences*.
14. Bideau, B., Kulpa, R., Ménardais, S., Fradet, L., Multon, F., Delamarche, P., et al (2003). Real handball goalkeeper vs. virtual handball thrower. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12, 411–421.
15. Bideau, B., Multon, F., Kulpa, R., Fradet, L., Arnaldi, B., & Delamarche, P. (2004). Using virtual reality to analyze links between handball thrower kinematics and goalkeeper's reactions. *Neuroscience Letters*, 372, 119–122.
16. Bober, T., Putnam, G. and Woodworth, G. (1987) Factors influencing the angular velocity of a human limb segment. *Journal of Biomechanics* 20, 511-521.
17. Barfield, W. R., Kirkendall, D. T., & Yu, B. (2002). Kinematic instep kicking differences between elite female and male soccer players. *Journal of Sports Science and Medicine*, 1, 72–79.
18. Brault, S. (2011). La feinte de corps au rugby : déterminants biomécaniques, processus de détection et action de défense : pourquoi l'expert est-il meilleur ? Rennes 2.
19. Bray, K., & Kerwin, D. (2003). Modelling the flight of a soccer ball in a direct free kick. *Journal of Sports Sciences*. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0264041031000070994>.
20. Brophy, R. H., Backus, S. H., Pansy, B. S., Lyman, S., & Williams, R. J. (2007). “Lower Extremity Muscle Activation and Alignment During the Soccer Instep and Side-foot Kicks.” *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 37(5), 260–268.
21. Caballero, E., & Gil, F. (2005). *Football : entraînement pour tous : 3 niveaux techniques ; 320 exercices et jeux adaptés*. Amphora. Retrieved from <https://www.google.dz/search?q=Deux+critères+semblent+déterminants+pour+la+précision+d'un+tir&oq=Deux+critères+semblent+déterminants+pour+la+précision+d'un+tir&a>

qs=chrome..69i57.313j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8

22. Carling C., Bloomfield J., Nelsen L., & Reilly T. (2008). The role of motion analysis in elite soccer.” *Sports Medicine*, 38, 839-862.
23. Craig, C. M., Berton, E., Rao, G., Fernandez, L., & Bootsma, R. J. (2006). Judging where a ball will go: the case of curved free kicks in football. *Naturwissenschaften*, 93(2), 97–101. <http://doi.org/10.1007/s00114-005-0071-0>
24. De Luca, R., Faella, O., W, S. F. W. and Z. M., Halliday D, R. R. and W. J., & A, T. P. (2017). An ideal free-kick. *European Journal of Physics*, 38(1), 14002. <http://doi.org/10.1088/0143-0807/38/1/014002>.
25. Dicks, M. and Chow, J.Y., (2010) A Constraints-Led Approach to Coaching Association Football: The Role of Perceptual Information and the Acquisition of Co-ordination, in: Renshaw, I, Davids, K. and Savelsbergh, G.J.P., eds., *Motor Learning in Practice: A Constraints-Led Approach*, Routledge, London.
26. Dicks, M., Davids, K. and Button, C., Individual Differences in the Visual Control of Intercepting a Penalty Kick in Association Football, *Human Movement Science*, 2010, 29(3), 401-411.
27. Dorge, H., Bull-Andersen, T., Sorensen, H. and Simonsen, E. (2002). Biomechanical differences in soccer kicking with the preferred and the non-preferred leg. *Journal of Sports Sciences* 20, 293-299.
28. Dorge, H., Bull-Andersen, T., Sorensen, H., Simonsen, E., Aagaard, H., Dyhre Poulsen, P. and Klausen, K. (1999) EMG activity of the iliopsoas muscle and leg kinetics during the soccer place kick. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 9, 155-200.
29. Dörge, H.C., Andersen, T.B., Sørensen, H. & Simonsen, E.B. (2002). Biomechanical differences in soccer kicking with the preferred and the non-preferred leg. *Journal of Sports Sciences*, 20, 293-299.
30. Dupeux, G., Goff, A. Le, Quéré, D., & Clanet, C. (2010). The spinning ball spiral. *New Journal of Physics*, 12(9), 93004. <http://doi.org/10.1088/1367-2630/12/9/093004>
31. 28. Egan, C. D., Vwerheul, M. H. G., & Savelsbergh, G. J. P. (2007). Effects of experience on the coordination of internally and externally timed soccer kicks. *Journal of Motor Behaviour*, 39, 423–432.

32. Ensum, J., Williams, M., & Grant, A. (2000). An analysis of attacking set plays in Euro 2000. *Insight*, 4(1), 36–39. Retrieved from <http://www.agentmajeur.fr/blog/mots-de-transition>.
33. E.W.Brown, D.J.Wilson, B.R.Mason, & J.Baker. (1993). THREE DIMENSIONAL KINEMATICS OF THE DIRECT FREE KICK IN SOCCER WHEN OPPOSED BY A DEFENSIVE WALL.
34. Franks, I. M., & Harvey, T. (1997). Cues for goalkeepers: Hightech methods used to measure penalty shot response. *Soccer Journal*, 42, 30 –38.
35. Fédération Internationale Football Association (2015), coupe du monde de la FIFA, Brésil 2014, de : <http://fr.fifa.com/worldcup/news/y=2015/m=12/news=la-coupe-du-monde-de-la-fifa-2014tm-a-attire-plus-de-3-2-milliards-de--2745550.html>
36. Fédération Internationale Football Association (2018), Associations, de : <http://fr.fifa.com/associations/index.html>
37. Ferraz, R., van den Tillar, R., & Marques, M. C. (2017). The influence of different exercise intensities on kicking accuracy and velocity in soccer players. *Journal of Sport and Health Science*, 6(4), 462–467. <http://doi.org/10.1016/j.jshs.2015.10.001>
38. Ghochani, A., Ghomshe, F. T., Nejad, S. K. A. R., & Rahimnejad, M. (2010). Analysis of torques and forces applied on limbs and joints of lower extremities in free kick in football. In *Procedia Engineering*. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.04.143>
39. Gibson J. J. (1979) *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
40. Graham-Smith, P., Lees, A., & Richardson, D. (1999). Analysis of technique of goalkeepers during the penalty kick. *Journal of Sports Sciences*, 17(11), 905 –929.
41. Grant A, Reilly T, Williams M, Borrie A. Analysis of the Goals Scored in the 1998 World Cup. *Insight, The Football Association Coaches Association Journal*. 1998;2:18-20.
42. Hammad, Mufti Ibrahim (1986): *La préparation et la compétence du joueur de football*, 2, Dar Al Fikr Al Arabi, au Caire.
43. Hammad, Mufti Ibrahim (1994): *Nouveau dans la préparation de la compétence et du plan pour le joueur de football*, Arab Thought House, Le Caire.
44. Hatze, H., Bullen, K. E., Gawroński, R., Hatze, H., Synge, L. J., & Griffith, B. A. (1974).

- The meaning of the term “biomechanics.” *Journal of Biomechanics*, 7(2), 189–190.
[http://doi.org/10.1016/0021-9290\(74\)90060-8](http://doi.org/10.1016/0021-9290(74)90060-8).
45. Hernández Moreno, J., Gómez Rijo, A., Castro Núñez, U., González Molina, A., Quiroga Escudero, M. E., & González Romero, F. (2011). Game rhythm and stoppages in soccer. A case study from Spain. *Journal of Human Sport and Exercise*, 6(4), 594–602.
<http://doi.org/10.4100/jhse.2011.64.03>.
 46. 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>.
 47. 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>.
 48. Hong, S., Kazama, Y., Nakayama, M., & Asai, T. (2012). Ball impact dynamics of knuckling shot in soccer. *Procedia Engineering*, 34, 200–205.
<http://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.035>.
 49. Hong, S., Go, Y., Sakamoto, K., & Nakayama, M. (2013). Characteristics of ball impact on curve shot in soccer. *Procedia Engineering*, 60, 249–254.
<http://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.07.008>.
 50. JAMES G. HAY. (1980). *Biomecanique des techniques sportives (Vigot)*. Paris. Retrieved from <https://www.amazon.fr/Biomecanique-techniques-sportives-JAMES-HAY/dp/B003WWCVH8>.
 51. Javorova, J., & Ivanov, A. (2018). Study of soccer ball flight trajectory. *MATEC Web of Conferences*, 145, 1002. <http://doi.org/10.1051/matecconf/201814501002>
 52. Ishii, H., Yanagiya, T., Naito, H., Katamoto, S., & Maruyama, T. (2009). Numerical study of ball behavior in side-foot soccer kick based on impact dynamic theory. *Journal of Biomechanics*, 42(16), 2712–2720. <http://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.08.025>
 53. Ismail, A., Mansor, M., M. Ali, M., Jaafar, S., & M. Johar, M. (2010). Biomechanics' Analysis for Right Leg Instep Kick. *Journal of Applied Sciences*, 10(13), 1286–1292.
 54. Isokawa, M., & Lees, A. (1988). A biomechanical analysis of the instep kick motion in soccer. In T. Reilly, A. Lees, K. Davids, & W. J. Murphy (Eds.), *Science and football* (pp.

- 449–455). London: E & FN Spon.
55. Katis, A., Giannadakis, E., Kannas, T., Amiridis, I., Kellis, E., & Lees, A. (2013). Mechanisms that influence accuracy of the soccer kick. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 23(1), 125–131. <http://doi.org/10.1016/j.jelekin.2012.08.020>
 56. Kellis, E., & Katis, A. (2007). Biomechanical Characteristics and Determinants of Instep Soccer Kick. *Journal of Sports Science & Medicine*, 6(2), 154–165.
 57. KONISHI, T., & MAEDA, M. (2014). Accuracy of the direct free-kick for hitting the target in soccer : Focusing on the difference of kick point. *The Proceedings of the Symposium on Sports and Human Dynamics*, 2014(0), _C-10-1_- _C-10-9_. http://doi.org/10.1299/jsmeshd.2014._C-10-1_
 58. Kuhn, W.(1988). Penalty- kick strategies for shooters and goalkeepers. *Science and Football* (pp. 489- 492). London: E &FN Spon.
 59. Kuper, S., & Szymanski, S. (2009). *Why England lose: And other curious phenomena explained*. London: Harper Collins Publishers.
 60. Lees, A. (1996). Biomechanics applied to soccer skills. In: *Science and Soccer*. Ed: Reilly, T. London: E & FN Spon. 123-133.
 61. Lees, A., Asai, T., Andersen, T. B., Nunome, H., & Sterzing, T. (2010). The biomechanics of kicking in soccer: A review. *Journal of Sports Sciences*, 28(8), 805–817. <http://doi.org/10.1080/02640414.2010.481305>
 62. Lees, A. and Nolan, L. (1998). The biomechanics of soccer: A review. *Journal of Sports Sciences* 16, 211-234.
 63. Lees, A., Steward, I., Rahnama, N., & Barton, G. (2009). Understanding lower limb function in the performance of the maximal instep kick in soccer. In T. Reilly & G. Atkinson (Eds.), *Proceedings of the 6th International Conference on Sport, Leisure and Ergonomics* (pp. 149–160). London: Routledge.
 64. Link, D., Kolbinger, O., Weber, H., & Stöckl, M. (2016). A topography of free kicks in soccer. *Journal of Sports Sciences*, 34(24), 2312–2320. <http://doi.org/10.1080/02640414.2016.1232487>.
 65. Levanon, J. and Dapena, J. (1998) Comparison of the kinematics of the full-instep and pass kicks in soccer. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 30, 917-927.

66. Luhtanen, P. Kinematics and kinetics of maximal instep kicking in junior soccer players. In: Science and Football, T. Reilly, A. Lees, K. Davis, and W. J. Murphy (Eds.). London: E & FN Spon, 1988, pp. 441–448.
67. Marque's-Bruna, P., Lees, A., & Grimshaw, P. (2007). Development of technique in soccer. *International Journal of Coaching Science*, 1, 51–62.
68. McGarry, T., and I.M. Franks. 'On Winning the Penalty Shoot-Out in Soccer'. *Journal of Sports Sciences* 18, no. 6 (2000): 401–9.
69. Meskine, M. Y. (2016). Préparer un mémoire de fin d'études : conseils pratiques de méthodologie et techniques rédactionnelles. *Connaissances et savoirs*. Retrieved from <https://www.connaissances-savoirs.com/preparer-un-memoire-de-fin-d-etudes-conseils-pratiques-de-methodologie-et-techniques-redactionnelles.html>.
70. Morris, A. and Burwitz, L., Anticipation and Movement Strategies in Elite Soccer Goalkeepers at Penalty Kicks, *Journal of Sports Sciences*, 1989, 7, 79-80.
71. Morya, E., et al., Evolving Penalty Kick Strategies: World Cup and Club Matches 2000-2002, in: Reilly, T., Cabri, J. and Araújo, D., eds., *Science and Football V*, Taylor & Francis, London, 2005, 237-242.
72. Morya, E., Ranvaud, R. and Pinheiro, W.M. (2001). The point of no return in a simulated penalty kick situation. In *International Society of Sport Psychology: Proceedings of the 10th World Congress of Sport Psychology* (edited by A. Papaioannou, M. Goudas and Y. Theodorakis), pp. 75–77. Thessaloniki: Christodoulidi Publications.
73. Noël, B., & van der Kamp, J. (2012). Gaze behaviour during the soccer penalty kick: An investigation of the effects of strategy and anxiety. *International Journal of Sport Psychology*, 43, 326–345.
74. Noland, Shelley and Feeley, Jamie. 2001. "The in-step soccer kick: novice vs. experienced player." Retrived from <http://www.umich.edu/~mvs330/f01/Soccer/main.html>.
75. Núñez, F. J., Ona, A., Raya, A., & Bilbao, A. (2009). Differences between expert and novice soccer players when using movement precues to shoot a penalty kick. *Perceptual and Motor Skills*, 108(1), 139e148.
76. Nunome, H., Lake, M., Georgakis, A., & Stergioulas, L. K. (2006). Impact phase kinematics of instep kicking in soccer. *Journal of Sports Sciences*, 24(1), 11–22.

<http://doi.org/10.1080/02640410400021450>

77. Nunome, H., Takeshi, A., Ikegami, Y., & Sakurai, S. (2002). Three-dimensional kinetic analysis of side-foot and instep soccer kicks.” *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34(12), 2028–2036.
78. Pakdemirli, M. (2015). Determining the velocities and angles for a free kick problem, 5(June), 1–5.
79. Palacios-Huerta, I. ‘Professionals Play Minimax’. *Review of Economic Studies* 70, no. 2 (2003): 395–415.
80. Parassas, S. G., Terauds, J., & Nathan, T. (1990). Three dimensional kinematic analysis of high and low trajectory kicks in soccer. In N. Nosek, D. Sojka, W. Morrison, & P. Susanka (Eds), *Proceedings of the VIIIth Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports* (pp. 145–149). Prague : Conex.
81. Righi, G., Modolo, L., Galmonte, A., & Agostini, T. (2004). The best action time for a goalkeeper engaged in penalties. *Perception*, 33(Suppl.), 172.
82. Rose F.D., E. A. Attree, B. M. Brooks, D. M. Parslow & P. R. Penn (2000): Training in virtual environments: transfer to real world tasks and equivalence to real task training, *Ergonomics*, 43:4, 494-511.
83. Roy B. (1992). Biomécanique de certains sports de glisse. *Science Du Sport*, 12, 1–8.
84. Savelsbergh, G. J., van der Kamp, J., Williams, A. M., & Ward, P. (2005). Anticipation and visual search behaviour in expert soccer goalkeepers. *Ergonomics*, 48(11e14), 1686e1697.
85. Savelsbergh, G. J., Williams, A. M., van der Kamp, J., & Ward, P. (2002). Visual search, anticipation and expertise in soccer goalkeepers. *Journal of Sport Sciences*, 20(3), 279e287.
86. Scurr, J., & Hall, B. (2009). The effects of approach angle on penalty kicking accuracy and kick kinematics with recreational soccer players. *Journal of Sports Science & Medicine*, 8(2), 230–4. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24149531>.
87. Seungmin Lee (2006), Gaze Behavior of Elite Soccer Goalkeeper in Successful Penalty Kick Defense. *International Journal of Applied Sports Sciences*, Vol. 18, No. 1, 96-110.
88. Shan, G., & Westerhoff, W. (2005). Full-body kinematic characteristics of the maximal instep kick by male soccer players and parameters related to kick quality. *Sports*

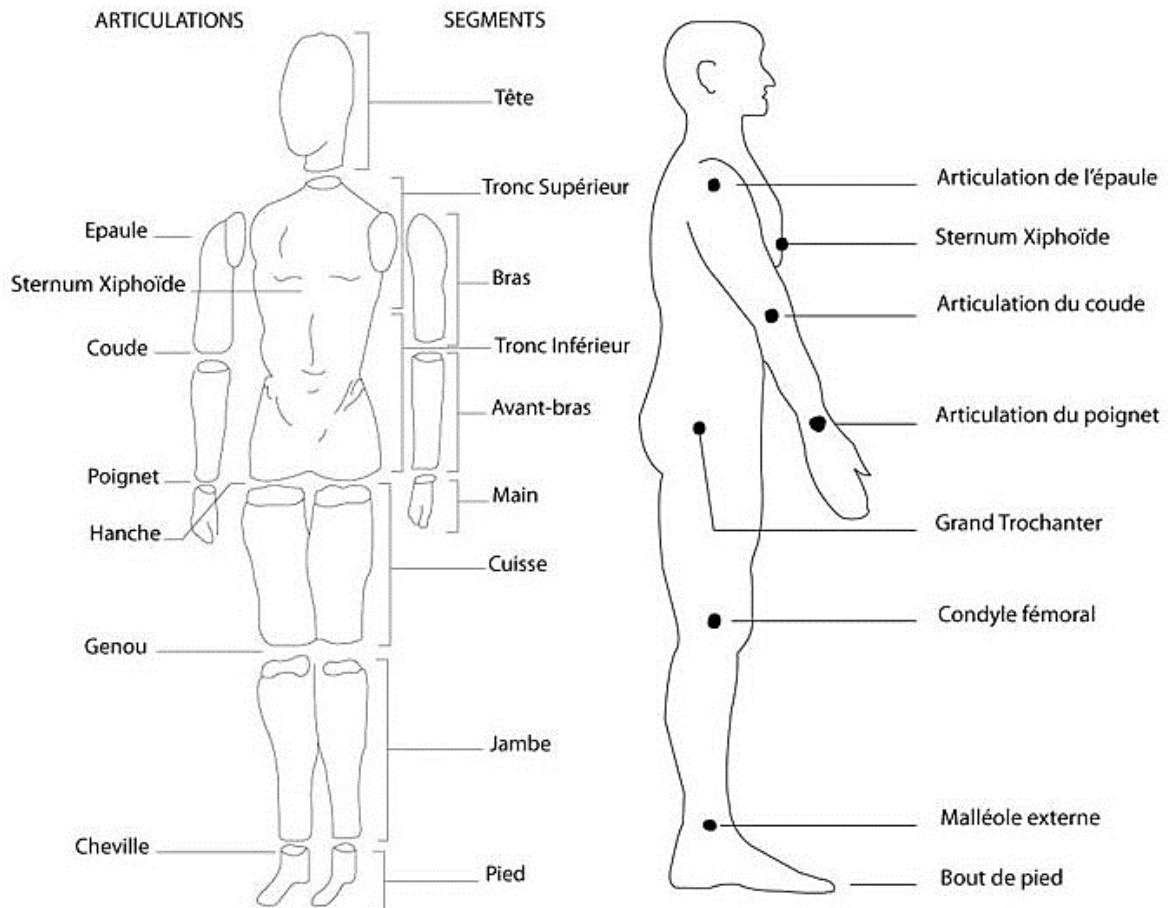
- Biomechanics, 4, 59–72.
89. Siegle, M., & Lames, M. (2012). Game interruptions in elite soccer. *Journal of Sports Sciences*, 30(7), 619–624. <http://doi.org/10.1080/02640414.2012.667877>.
 90. Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2005). *Motor control and learning: A behavioral emphasis*, 4th ed. Human Kinetics.
 91. Shim, J., Carlton, L. G., Chow, J. W., & Chae, W. S. (2005). The use of anticipatory visual cues by highly skilled tennis players. *Journal of Motor Behaviour*, 37(2), 164e175.
 92. Skysports (2015), Football news, de : <http://www.skysports.com/football/news/11095/9804389/cristiano-ronaldo-free-kick-goals-are-rare-show-whoscored-com-stats>
 93. Sørensen, S. N., & Rasmussen, J. (2017). Free kick goals in football: an unlikely success between failure and embarrassment. *Sports Engineering*, 1–12. <http://doi.org/10.1007/s12283-017-0257-7>.
 94. Suárez, T. A., Dios, R. M., Boubeta, A. R., López, J. L. L., & Sanjurjo, C. A. C. (2014). Análisis de la eficacia de los saques de esquina en la copa del mundo de fútbol 2010. Un intento de identificación de variables explicativas. *Revista de Psicología Del Deporte*, 23(1).
 95. Stannion, Timovig (1991): *Jeune football*, traduit par Kazim al-Rubaie et Abdullah al-Mashhadani, presse de Dar al-Hikma, Basrah.
 96. Tang, D., & Xu, L. (n.d.). Strategic research on the probability statistics of free kick direct score based on biomechanical principles. *BioTechnology: An Indian Journal*, 10(10). Retrieved from <http://www.tsijournals.com/abstract/strategic-research-on-the-probability-statistics-of-free-kick-direct-score-based-on-biomechanical-principles-7648.html>
 97. Tillaar R van den, Ulvik A (2014) Influence of Instruction on Velocity and Accuracy in Soccer Kicking of Experienced Soccer Players, *Journal of Motor Behaviour* 46(5): 287–291.
 98. Timmis MA, Turner K, van Paridon KN (2014) Visual Search Strategies of Soccer Players Executing a Power vs. Placement Penalty Kick. *PLoS ONE* 9(12): e115179. doi:10.1371/journal.pone.0115179.
 99. Tsaousidis, N., & Zatsiorsky, V. (1996). Two types of ball-effector interaction and their

- relative contribution to soccer kicking. *Human Movement Science*, 15(6), 861–876.
[http://doi.org/10.1016/S0167-9457\(96\)00027-9](http://doi.org/10.1016/S0167-9457(96)00027-9).
100. Tyldesley, D.A., Bootsma, R.J. and Bomhoff, G., 1982, Skill level and eye movements patterns in a sportoriented reaction time task. In *Motorik- und Bewegungsforschung*, H. Rieder, K. Bos, H. Mechling and K. Reische (Eds), 290 – 29 (Schorndorf: Hofmann).
 101. Van der Kamp, J., A Field Simulation Study of the Effectiveness of Penalty Kick Strategies in Soccer: Late Alterations of Kick Direction Increase Errors and Reduce Accuracy, *Journal of Sports Sciences*, 2006, 24(5), 467-477.
 102. Vignais N., Kulpa R., Bideau B., Brault S., Presse D. (2015) Which technology to investigate visual perception in sport: Video vs. virtual reality *Human Movement Science*, volume 39, 12-26.
 103. Walls, J., Bertrand, L., Gale, T. et Saunders, N. (1998). Assessment of upwind dinghy sailing performance using a virtual reality dinghy sailing simulator. *Journal of science and medicine in sport*, 1(2), 61-71.
 104. Ward. P., & Williams A.M. (2003) Perceptual and cognitive skill development in soccer: the multidimensional nature expert performance. *Journal of Sports & Exercise Psychology*, 25, 93-111.
 105. Weineck, J. (1997) *Fußballtraining. Teil 1: Konditionstraining des Fussballspielers*. Perimed: Spitta Verlag. (In German).
 106. Wikipedia (2018), Football, de : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Football>
 107. Williams AM, Burwitz L (1993). Advance cue utilization in soccer. In: T. Reilly, J. Clarys & A. Stibbe (Eds.). *Science and Football II*. London : E & FN Spon, 239-244
 108. Williams, A.M. and Grant, A. (1999). Training perceptual skill in sport. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 30, 194±220.
 109. Williams, A. M. (2000). Perceptual skill in soccer: implications for talent identification and development. *Journal of Sports Sciences*, 18(9), 737e750.
 110. Zainel, Abdelkader (1994): *Jeune Football* Aboud Press, Amman.

ANNEXE 01.

Description géométrique d'un segment corporel.

La description géométrique d'un segment corporel s'appuie sur des mesures anthropométriques dont les données sont rassemblées dans des tables anthropométriques : elle consiste à délimiter les segments corporels à l'aide de marqueurs anatomiques placés sur des repères articulaires précis.



Segmentation du corps humain à partir de repères anatomiques articulaires externes

Un segment corporel (noté s) est modélisé par un vecteur $(\overline{P_s D_s})$. L'origine du segment appelé est le point proximal du segment appelé (P_s) et son extrémité est le point distal du segment noté (D_s) . De manière pratiques ces points sont repérés grâce à des repères anatomiques palpables (ex : malléole externe, le point proximal du pied).

ANNEXE 02.

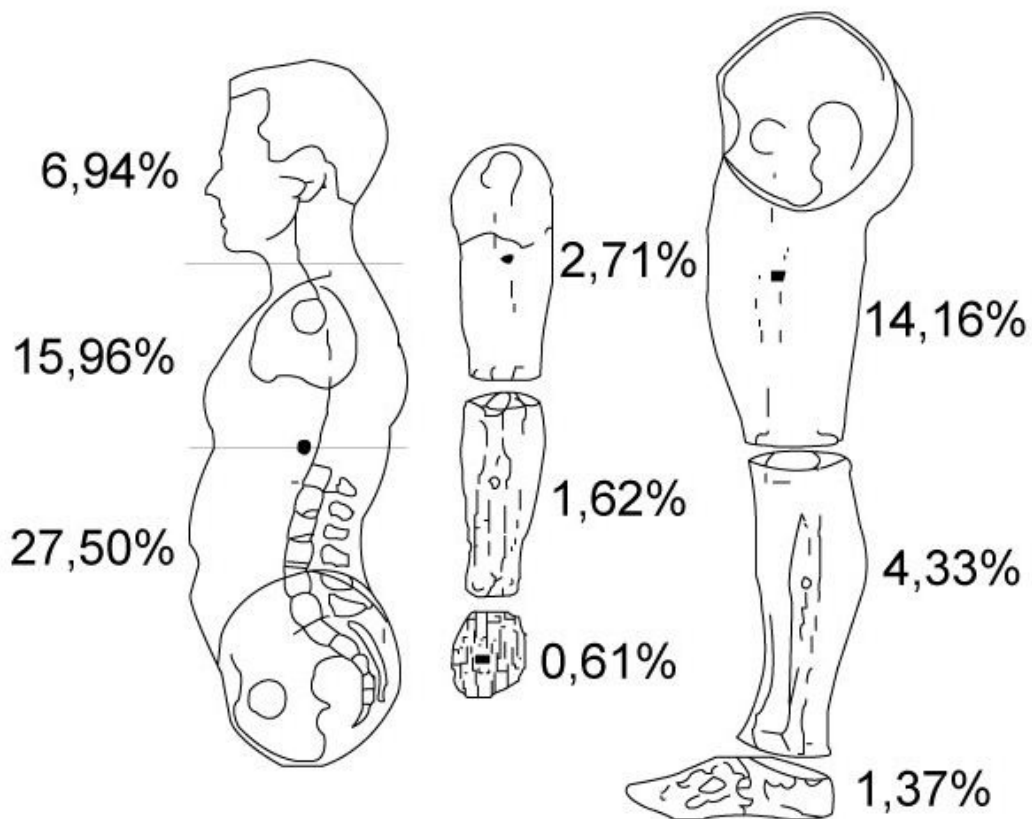
Masse d'un segment.

La masse d'un segment (m_s) est une valeur identifiant sa quantité de matière : elle dépend de la nature des différents tissus (os, muscles, fascias, graisse, peau, liquides) qui le composent.

C'est une caractéristique inertielle du segment car elle représente la résistance du segment à sa mise en mouvement : plus la masse est importante, plus il est difficile de modifier le mouvement du segment.

Elle a une valeur constante qui s'exprime en kilogramme (kg). **Calcul de la masse d'un segment corporel**

Différentes méthodes de mesures anthropométriques (pesée des segments après dissection par exemple) permettent de déterminer le coefficient de masse (cm) à utiliser pour calculer la masse de chaque segment de chaque segment à partir de la masse totale du corps. Ces données sont fournies par les tables anthropométriques.



Répartition de la masse segmentaire par segment en pourcentage.

Table anthropométrique (De Leva) utilisée pour calculer la masse d'un segment exprimée en % de la masse corporelle (cm)

Segments	Coefficient de Masse (cm) de De Leva
Tête + Cou	6,94%
Tronc sup.	15,96%
Tronc inf.	27,50%
Bras	2,71%
Avant-bras	1,62%
Main	0,61%
Cuisse	14,16%
Jambe	4,33%
Pied	1,37%
Total	100,00%

Le calcul de la masse d'un segment (m_s) s'effectue en multipliant la masse du corps par le coefficient correspondant au segment.

$$m_s = C_m \cdot M$$

Exemple : Pour un sujet de 70 kg, la masse de sa cuisse est de : $0,1416 \cdot 70 = 9,912 \text{ kg}$

ANNEXE 03.

Liste des experts.

On a consulté un groupe d'experts présenté sur le tableau ci-dessous afin de profiter de leurs d'expérience dans le domaine de la biomécanique des activités physiques et sportives pour nous aider dans la conception et la validation du test du tir de la précision du coup franc direct, et la sélection des variables biomécaniques envisagée dans cette étude.

Liste des experts.

Noms et Prénoms	Grades	Universités
Sba Bouabdellah	Professeur	Hassiba Benbouali de Chlef, (Algérie).
Reguig Madani	Maitre de conférences « A »	Abdelhamid Ben Badis de Mostaganem, (Algérie).
Zerf Mohammed	Maitre de conférences « A »	Abdelhamid Ben Badis de Mostaganem, (Algérie).
Hikmet El Madkhouri	Professeur	Université de Misan, (Iraq).

ANNEXE 04.

Les résultats bruts de cette étude.

Les résultats du test de précision du tir du coup franc direct.

N°	Joueurs	Positions	Précision
01	Joueur 01	Position 01 (A droite)	0
02			4
03			5
04			8
05			5
06		Position 02 (Centre)	7
07			4
08			8
09			4
10			8
11		Position 03 (A gauche)	7
12			3
13			0
14			4
15			0
16	Joueur 02	Position 01 (A droite)	3
17			3
18			6
19			3
20			3
21		Position 02 (Centre)	2
22			3
23			4
24			2
25			3
26		Position 03 (A gauche)	4
27			7
28			3
29			3
30			7
31	Joueur 03	Position 01 (A droite)	3
32			8
33			8
34			8
35			3
36		Position 02 (Centre)	5
37			6
38			8
39			2
40			0

41			0
42			0
43		Position 03 (A gauche)	7
44			6
45			6
46	Joueur 04	Position 01 (A droite)	8
47			3
48			0
49			0
50			7
51		Position 02 (Centre)	8
52			3
53			4
54			5
55			5
56		Position 03 (A gauche)	8
57			0
58			0
59			5
60	7		
61	Joueur 05	Position 01 (A droite)	3
62			2
63			4
64			0
65			4
66		Position 02 (Centre)	7
67			8
68			6
69			8
70			6
71		Position 03 (A gauche)	7
72			8
73			1
74			8
75	7		

Les résultats de la phase d'approche.

N°	Joueurs	Positions	$t_{d'approche}$	$D_{d'approche}$	$v_{d'approche}$	$a_{d'approche}$	$Np_{d'approche}$
01	Joueur 01	Position 01 (A droite)	1	1	1	1	4
02			1,4	2,14	1,52857143	1,09183673	4
03			1,46	2,27	1,55479452	1,06492775	4
04			1,5	2,5	1,66666667	1,11111111	4
05			1,96	2,16	1,10204082	0,56226572	4
06		Position 02 (Centre)	1,66	1,78	1,07228916	0,64595732	4
07			1,26	1,51	1,1984127	0,95112119	3
08			1,5	2,5	1,66666667	1,11111111	2

09		Position 03 (A gauche)	0,94	1,29	1,37234043	1,45993662	2
10			1,5	2,5	1,66666667	1,11111111	3
11			1,26	1,97	1,56349206	1,24086672	3
12			1,22	1,72	1,40983607	1,15560333	3
13			1	1	1	1	3
14			1,3	1,54	1,18461538	0,9112426	3
15			1	1	1	1	3
16	Joueur 02	Position 01 (A droite)	1,3	2,18	1,67692308	1,28994083	3
17			1,46	1,97	1,34931507	0,9241884	3
18			1,3	1,66	1,27692308	0,98224852	3
19			1,3	2,2	1,69230769	1,30177515	3
20			1,3	2,22	1,70769231	1,31360947	3
21		Position 02 (Centre)	1,38	2,2	1,5942029	1,15521949	3
22			1,3	2,36	1,81538462	1,3964497	3
23			1,4	2,14	1,52857143	1,09183673	3
24			1,42	2,26	1,5915493	1,12080936	3
25		1,3	2,15	1,65384615	1,27218935	3	
26		Position 03 (A gauche)	1,4	2,2	1,57142857	1,12244898	3
27			1,44	2,25	1,5625	1,08506944	3
28			1,3	2,65	2,03846154	1,56804734	3
29			1,3	2,15	1,65384615	1,27218935	3
30	1,28		2,2	1,71875	1,34277344	3	
31	Joueur 03	Position 01 (A droite)	1,3	2,5	1,92307692	1,47928994	3
32			1,5	2,5	1,66666667	1,11111111	4
33			1,5	2,5	1,66666667	1,11111111	4
34			1,2	2,2	1,83333333	1,52777778	3
35			1,3	2,24	1,72307692	1,32544379	3
36		Position 02 (Centre)	1,5	2,3	1,53333333	1,02222222	4
37			1,46	2	1,36986301	0,93826234	4
38			1,1	1,98	1,8	1,63636364	3
39			1,3	2,1	1,61538462	1,24260355	3
40		1	1	1	1	3	
41		Position 03 (A gauche)	1	1	1	1	3
42			1	1	1	1	3
43			1,53	2,75	1,79738562	1,17476184	3
44			1,46	2,6	1,78082192	1,21974104	3
45			1,46	2,46	1,68493151	1,15406268	3
46	Joueur 04	Position 01 (A droite)	1,5	2,5	1,66666667	1,11111111	3
47			1,3	2,53	1,94615385	1,49704142	3
48			1	1	1	1	3
49			1	1	1	1	4
50			1,36	2,2	1,61764706	1,18944637	3
51		Position 02 (Centre)	1,5	2,5	1,66666667	1,11111111	4
52			1,3	2,6	2	1,53846154	4
53			1,5	2,62	1,74666667	1,16444444	4
54			1,46	2,5	1,71232877	1,17282792	4
55			1,57	2,68	1,70700637	1,0872652	4
56			1,5	2,5	1,66666667	1,11111111	3

57		03 (A gauche)	1	1	1	1	3
58		03 (A gauche)	1	1	1	1	3
59		03 (A gauche)	1,1	1,98	1,8	1,63636364	3
60		03 (A gauche)	1,1	2,1	1,90909091	1,73553719	3
61	Joueur 05	Position 01 (A droite)	1,28	2,3	1,796875	1,40380859	3
62			1,4	2,1	1,5	1,07142857	3
63			1,5	2,1	1,4	0,93333333	3
64			1	1	1	1	3
65			1,4	2,5	1,78571429	1,2755102	3
66		Position 02 (Centre)	1,56	2,53	1,62179487	1,0396121	3
67			1,5	2,5	1,66666667	1,11111111	3
68			1,46	2,3	1,57534247	1,07900169	3
69			1,5	2,5	1,66666667	1,11111111	3
70			1,46	2,46	1,68493151	1,15406268	3
71		Position 03 (A gauche)	1,26	2,2	1,74603175	1,38573948	3
72			1,5	2,5	1,66666667	1,11111111	3
73			1,1	2,2	2	1,81818182	3
74			1,5	2,5	1,66666667	1,11111111	3
75			1	1	1	1	3

Les résultats de la phase du placement de la jambe d'appui et le balancement du pied de frappe.

N°	Joueurs	Positions	ω_{cuisse}	ω_{jambe}	v_{cuisse}	v_{jambe}	v_{pied}
01	Joueur 01	Position 01 (A droite)	6,12	11,23	2,3868	3,7059	6,0927
02			7,34	13,85	2,8626	4,5705	7,4331
03			7,72	14,43	3,0108	4,7619	7,7727
04			7,16	14,32	2,7924	4,7256	7,518
05			7,72	14	3,0108	3,92	6,9308
06		Position 02 (Centre)	7,1	14,2	2,13	3,976	6,106
07			8,44	13,85	2,532	3,878	6,41
08			7,16	14,32	2,148	4,0096	6,1576
09			7,34	13,85	2,202	3,878	6,08
10			7,16	14,32	2,148	4,1528	6,3008
11		Position 03 (A gauche)	8,44	14,2	2,7852	4,118	6,9032
12			7,2	12,43	2,376	3,6047	5,9807
13			6,12	11,23	2,0196	3,2567	5,2763
14			7,34	13,85	2,4222	4,0165	6,4387
15			6,12	11,23	2,0196	2,6952	4,7148
16	Joueur 02	Position 01 (A droite)	7,2	12,43	2,016	2,9832	4,9992
17			7,2	12,43	2,016	2,9832	4,9992
18			8,66	15,63	2,4248	3,7512	6,176
19			7,2	12,43	2,016	2,9832	4,9992
20		7,2	12,43	2,016	3,9776	5,9936	
21		Position 02 (Centre)	6,78	12,1	2,373	3,872	6,245
22			7,2	26,84	2,52	8,5888	11,1088
23			7,34	13,85	2,569	4,432	7,001

24			6,78	12,1	2,373	3,872	6,245	
25			7,2	12,43	2,52	4,1019	6,6219	
26		Position 03 (A gauche)	7,34	13,85	2,8626	4,5705	7,4331	
27			8,41	14,2	3,2799	4,686	7,9659	
28			7,2	12,43	2,808	4,1019	6,9099	
29			7,2	12,43	2,808	4,1019	6,9099	
30			8,1	14,2	3,159	4,686	7,845	
31	Joueur 03	Position 01 (A droite)	7,2	15,73	2,16	5,1909	7,3509	
32				7,16	14,32	2,148	4,7256	6,8736
33				7,16	14,32	2,148	4,7256	6,8736
34				7,16	14,32	2,148	4,7256	6,8736
35				7,2	14,43	2,16	4,7619	6,9219
36			Position 02 (Centre)	7,72	14	2,5476	4,62	7,1676
37				8,66	15,53	2,8578	5,1249	7,9827
38				7,16	14,32	2,3628	4,7256	7,0884
39				6,78	12,1	2,2374	3,993	6,2304
40				6,12	11,23	2,0196	3,7059	5,7255
41			Position 03 (A gauche)	6,12	11,23	1,7136	3,7059	5,4195
42				2,12	11,23	0,5936	3,7059	4,2995
43				8,11	14,2	2,2708	4,686	6,9568
44				6,78	15,53	1,8984	5,1249	7,0233
45				6,22	15,53	1,7416	5,1249	6,8665
46	Joueur 04	Position 01 (A droite)	7,16	18,84	2,506	6,2172	8,7232	
47				9,14	12,43	3,199	4,1019	7,3009
48				6,12	11,23	2,142	3,7059	5,8479
49				6,12	11,23	2,142	3,7059	5,8479
50				8,32	14,2	2,912	4,686	7,598
51			Position 02 (Centre)	7,16	12,18	2,7924	4,0194	6,8118
52				7,2	12,43	2,808	4,1019	6,9099
53				7,34	13,85	2,8626	4,5705	7,4331
54				7,72	14,43	3,0108	4,7619	7,7727
55				7,72	14,43	3,0108	4,7619	7,7727
56			Position 03 (A gauche)	7,16	14,32	2,148	4,7256	6,8736
57				6,12	11,23	1,836	3,7059	5,5419
58				6,12	11,23	1,836	3,7059	5,5419
59				7,66	14,43	2,298	4,7619	7,0599
60				8,42	14,2	2,526	4,686	7,212
61	Joueur 05	Position 01 (A droite)	7,2	12,43	2,376	4,1019	6,4779	
62				6,78	12,1	2,2374	3,993	6,2304
63				7,34	13,85	2,4222	4,5705	6,9927
64				6,12	12,62	2,0196	4,1646	6,1842
65				7,34	12,38	2,4222	4,0854	6,5076
66			Position 02 (Centre)	8,44	14,2	2,3632	4,686	7,0492
67				7,16	14,32	2,0048	4,7256	6,7304
68				8,66	15,53	2,4248	5,1249	7,5497
69				7,16	14,32	2,0048	4,7256	6,7304
70				8,66	15,53	2,4248	5,1249	7,5497
71				Position	8,44	14,2	2,954	4,686

72		03 (A gauche)	7,16	14,32	2,506	4,7256	7,2316
73			6,43	13,7	2,2505	4,521	6,7715
74			7,16	11,52	2,506	3,8016	6,3076
75			8,44	14,2	2,954	4,686	7,64

Les résultats de la phase de contact du pied avec le ballon.

N°	Joueurs	Positions	$\theta_{\text{inclinaison du corps}}$	$\theta_{\text{d'attaque du pied}}$	p_{pied}	$E_{C_{\text{pied}}}$
01	Joueur 01	Position 01 (A droite)	14,5	20	6,5252817	19,8782919
02			15,2	27	7,9608501	29,5868974
03			16,3	30	8,3245617	32,3521604
04			18,2	29	8,051778	30,2666335
05			15,6	29	7,4228868	25,7232719
06		Position 02 (Centre)	19,8	19	7,473744	22,8173404
07			19,4	19	7,84584	25,1459172
08			19,4	17	7,5369024	23,2046151
09			22	15	7,44192	22,6234368
10			17,3	20	7,7121792	24,2964494
11		Position 03 (A gauche)	17,8	25	8,4495168	29,1643522
12			17,7	27	7,3203768	21,8904888
13			16,6	28	6,4581912	17,0376771
14			18,5	27	7,8809688	25,3715969
15			18,5	24	5,7709152	13,6043555
16	Joueur 02	Position 01 (A droite)	9,2	12	5,4391296	13,5956483
17			10,3	19	5,4391296	13,5956483
18			11,2	17	6,719488	20,7497789
19			6,5	25	5,4391296	13,5956483
20			8,4	28	6,5210368	19,5422431
21		Position 02 (Centre)	13,5	16	7,21922	22,5420145
22			10,9	28	12,8417728	71,3283428
23			10	21	8,093156	28,3300926
24			12,2	17	7,21922	22,5420145
25			13,7	23	7,6549164	25,3450455
26		Position 03 (A gauche)	7,8	30	7,9608501	29,5868974
27			9	24	8,5314789	33,9804539
28			9,6	30	7,4005029	25,5683675
29			15,2	24	7,4005029	25,5683675
30			9,7	29	8,401995	32,9568254
31	Joueur 03	Position 01 (A droite)	9,9	22	8,9975016	33,0698673
32			10,1	17	8,4132864	28,9147827
33			7,7	22	8,4132864	28,9147827
34			7,9	18	8,4132864	28,9147827
35			8,9	16	8,4724056	29,3225722
36		Position 02 (Centre)	12,9	25	8,7731424	31,4411877
37			10,7	26	9,7708248	38,9987816
38			10,1	28	8,6762016	30,7501937
39			12,6	18	7,6260096	23,7565451

40		Position 03 (A gauche)	8,2	24	7,008012	20,0621864
41			7,9	27	5,896416	15,9778133
42			7,8	30	4,677856	10,0562209
43			12,1	28	7,5689984	26,328004
44			7,9	29	7,6413504	26,8337481
45			5,4	29	7,470752	25,6489593
46	Joueur 04	Position 01 (A droite)	10,9	17	10,0840192	43,9824581
47			16	17	8,4398404	30,8092154
48			11,7	27	6,7601724	19,7664061
49			10,7	20	6,7601724	19,7664061
50			12,6	19	8,783288	33,3677111
51			Position 02 (Centre)	5,5	12	7,2954378
52	7,3	26		7,4005029	25,5683675	
53	7,8	16		7,9608501	29,5868974	
54	6,1	15		8,3245617	32,3521604	
55	10,2	20		8,3245617	32,3521604	
56	Position 03 (A gauche)	9,7		25	8,4132864	28,9147827
57		8,7	21	6,7832856	18,7961452	
58		5,7	17	6,7832856	18,7961452	
59		8,8	21	8,6413176	30,5034191	
60		9,3	15	8,827488	31,8319217	
61		Joueur 05	Position 01 (A droite)	7,5	22	7,9289496
62	6,5			17	7,6260096	23,7565451
63	8,6			17	8,5590648	29,9254862
64	9,7			20	7,5694608	23,4055297
65	10,7			19	7,9653024	25,9175009
66	Position 02 (Centre)		15,6	25	7,6695296	27,032024
67			14,7	24	7,3226752	24,6422666
68			14,9	22	8,2140736	31,0068957
69			19,2	21	7,3226752	24,6422666
70			18,7	22	8,2140736	31,0068957
71	Position 03 (A gauche)		18,5	20	8,83184	33,7376288
72			16,3	13	8,3597296	30,2271103
73			23,4	15	7,827854	26,5031567
74			22,3	15	7,2915856	22,9962027
75			21,1	17	8,83184	33,7376288

Les résultats de la phase d'envol du ballon partie 01.

N°	Joueurs	Positions	t d'envol du ballon	θ_0	v_x	v_y	v
01	Joueur 01	Position 01 (A droite)	1,1	14,66	13,25	3,84	13,7952202
02			1,53	17,28	15,26	6,23	16,4827334
03			1,07	21,37	15,35	5,78	16,4021614
04			1,5	16,34	16,62	6,25	17,75632
05			1,33	11,31	14,26	5,65	15,3385169
06		Position 02	1,57	17,97	13,26	4,5	14,0027712
07			1,27	18,1	12,35	3,65	12,8780822

08		(Centre)	1,53	22,17	14,45	6,26	15,7477014	
09			1,17	15,52	14,26	5,65	15,3385169	
10			1,57	20,35	16,62	6,25	17,75632	
11		Position 03 (A gauche)		1,47	13,68	14,26	5,65	15,3385169
12				1,87	17,05	14,26	5,65	15,3385169
13				1,2	27,65	14,27	5,65	15,3478142
14				1,27	16,14	14,55	5,74	15,6412947
15				1	9,87	13,25	3,84	13,7952202
16	Joueur 02	Position 01 (A droite)	1,33	15,95	14,26	5,65	15,3385169	
17				1,13	12,26	14,26	5,65	15,3385169
18				1,5	19,54	12,25	3,54	12,7512392
19				1,43	15,07	14,85	5,66	15,8920766
20				1,03	15,78	14,16	5,02	15,0235149
21		Position 02 (Centre)		1,2	13,45	13,93	5,01	14,8035469
22				1,2	15,07	14,38	5,66	15,4538021
23				1,1	17,1	13,26	4,26	13,927498
24				1,33	11,66	14,26	5,65	15,3385169
25			1,17	15,33	14,26	5,65	15,3385169	
26		Position 03 (A gauche)		1,3	16,99	14,26	5,65	15,3385169
27				1,17	19,18	14,26	5,65	15,3385169
28				1,2	15,71	14,26	5,65	15,3385169
29				1,07	14,53	14,26	5,65	15,3385169
30				1,5	19,98	14,26	5,65	15,3385169
31	Joueur 03	Position 01 (A droite)	1,03	14,74	14,26	5,65	15,3385169	
32				1,57	22,62	16,62	6,25	17,75632
33				1,57	22,31	16,62	6,25	17,75632
34				1,53	25,02	16,62	6,25	17,75632
35				1,5	13,09	14,26	5,65	15,3385169
36		Position 02 (Centre)		1,2	19,65	15,35	5,78	16,4021614
37				1,47	18,05	14,26	5,65	15,3385169
38				1,57	20,06	14,26	5,65	15,3385169
39				1,3	12,53	14,26	5,65	15,3385169
40				1,2	11,63	13,25	3,84	13,7952202
41		Position 03 (A gauche)		1	26,57	14,26	5,65	15,3385169
42				1,2	8,97	13,25	3,84	13,7952202
43				1,53	19,29	15,28	5,65	16,2911295
44				1,53	17,82	14,26	5,65	15,3385169
45				1,53	17,82	14,26	5,65	15,3385169
46	Joueur 04	Position 01 (A droite)	1,53	22,25	16,62	6,25	17,75632	
47				1,13	13,71	14,26	5,65	15,3385169
48				1	7,99	14,26	5,65	15,3385169
49				1	10,44	14,26	5,65	15,3385169
50		Position 02 (Centre)		1,5	19,89	14,26	5,65	15,3385169
51				1,57	21,16	14,26	5,65	15,3385169
52				1,23	15,73	14,26	5,65	15,3385169
53				1,23	17,49	13,26	4,26	13,927498
54				1,33	17,68	14,26	5,65	15,3385169
55				1,33	17,57	15,35	5,78	16,4021614

56			1,57	20,26	16,62	6,25	17,75632	
57		Position 03 (A gauche)	1	12,23	14,26	5,65	15,3385169	
58			1	10,68	13,25	3,84	13,7952202	
59			1,23	16,5	14,26	5,65	15,3385169	
60			1,5	19,54	15,28	5,65	16,2911295	
61	Joueur 05	Position 01 (A droite)	1,27	15,12	14,26	5,65	15,3385169	
62				1,1	10,3	14,26	5,65	15,3385169
63				1,27	16,5	13,26	4,26	13,927498
64				1	8,75	13,25	3,84	13,7952202
65			1,3	16,75	14,26	5,65	15,3385169	
66			Position 02 (Centre)	1,5	20,21	15,28	5,65	16,2911295
67				1,53	21,18	14,26	5,65	15,3385169
68				1,53	18,06	14,26	5,65	15,3385169
69				1,57	21,35	16,62	6,25	17,75632
70			1,5	18,95	14,66	5,76	15,7509746	
71			Position 03 (A gauche)	1,5	19,34	15,28	5,65	16,2911295
72				1,53	20,45	16,62	6,25	17,75632
73				1,2	23,45	13,26	4,99	14,1678403
74				1,5	20,54	14,26	5,65	15,3385169
75				1,57	20,55	15,28	5,65	16,2911295

Les résultats de la phase d'envol du ballon partie 02.

N°	Joueurs	Positions	a_x	a_y	a	p_{ballon}	$E_{c_{ballon}}$	
01	Joueur 01	Position 01 (A droite)	16,25	0,95	16,2777455	6,20784908	42,8193225	
02				18,57	4,25	19,0501286	7,41723003	61,1281125
03				18,43	3,65	18,7879589	7,38097265	60,5319525
04				19,54	2,58	19,7095916	7,990344	70,9395525
05				18,43	3,65	18,7879589	6,90233259	52,9357725
06			Position 02 (Centre)	17,25	2,69	17,4584822	6,30124702	44,11746
07				18,57	4,25	19,0501286	5,79513697	37,315125
08				19,54	2,58	19,7095916	7,08646564	55,7977725
09				18,57	4,25	19,0501286	6,90233259	52,9357725
10				19,54	2,58	19,7095916	7,990344	70,9395525
11			Position 03 (A gauche)	17,25	2,69	17,4584822	6,90233259	52,9357725
12				13,25	6,25	14,6500853	6,90233259	52,9357725
13				16,25	3,12	16,5468094	6,90651638	52,999965
14				18,57	4,25	19,0501286	7,03858262	55,0462725
15				13,25	6,25	14,6500853	6,20784908	42,8193225
16	Joueur 02	Position 01 (A droite)	13,25	6,25	14,6500853	6,90233259	52,9357725	
17				13,25	6,25	14,6500853	6,90233259	52,9357725
18				17,44	3,25	17,7402396	5,73805762	36,5836725
19				13,25	6,25	14,6500853	7,15143449	56,8255725
20			Position 02 (Centre)	13,25	6,25	14,6500853	6,76058171	50,78385
21				15,26	3,25	15,6022466	6,66159609	49,307625
22				13,25	6,25	14,6500853	6,95421095	53,7345
23				18,57	4,25	19,0501286	6,26737409	43,64442
24				15,26	3,25	15,6022466	6,90233259	52,9357725

25			13,25	6,25	14,6500853	6,90233259	52,9357725	
26			18,57	4,25	19,0501286	6,90233259	52,9357725	
27		Position 03 (A gauche)	17,25	0,96	17,2766924	6,90233259	52,9357725	
28			13,25	6,25	14,6500853	6,90233259	52,9357725	
29			13,25	6,25	14,6500853	6,90233259	52,9357725	
30			17,25	2,69	17,4584822	6,90233259	52,9357725	
31			13,25	6,25	14,6500853	6,90233259	52,9357725	
32	Joueur 03	Position 01 (A droite)	19,54	2,58	19,7095916	7,990344	70,9395525	
33				19,54	2,58	19,7095916	7,990344	70,9395525
34				19,54	2,58	19,7095916	7,990344	70,9395525
35				13,25	6,25	14,6500853	6,90233259	52,9357725
36				18,43	3,25	18,7143635	7,38097265	60,5319525
37			Position 02 (Centre)	17,44	3,25	17,7402396	6,90233259	52,9357725
38				18,54	0,99	18,5664132	6,90233259	52,9357725
39				15,26	3,25	15,6022466	6,90233259	52,9357725
40				16,25	0,95	16,2777455	6,20784908	42,8193225
41				16,25	3,12	16,5468094	6,90233259	52,9357725
42			Position 03 (A gauche)	16,25	3,12	16,5468094	6,20784908	42,8193225
43				17,25	0,96	17,2766924	7,33100827	59,7152025
44				17,44	3,25	17,7402396	6,90233259	52,9357725
45				17,44	3,25	17,7402396	6,90233259	52,9357725
46				19,54	2,58	19,7095916	7,990344	70,9395525
47	Joueur 04	Position 01 (A droite)	13,25	6,25	14,6500853	6,90233259	52,9357725	
48				16,25	3,12	16,5468094	6,90233259	52,9357725
49				16,25	3,12	16,5468094	6,90233259	52,9357725
50				17,25	0,96	17,2766924	6,90233259	52,9357725
51				19,54	2,58	19,7095916	6,90233259	52,9357725
52			Position 02 (Centre)	13,25	6,25	14,6500853	6,90233259	52,9357725
53				18,57	4,25	19,0501286	6,26737409	43,64442
54				18,43	3,65	18,7879589	6,90233259	52,9357725
55				18,43	3,65	18,7879589	7,38097265	60,5319525
56				19,54	2,58	19,7095916	7,990344	70,9395525
57			Position 03 (A gauche)	16,25	3,12	16,5468094	6,90233259	52,9357725
58				16,25	3,12	16,5468094	6,20784908	42,8193225
59				18,43	3,65	18,7879589	6,90233259	52,9357725
60				17,25	0,96	17,2766924	7,33100827	59,7152025
61				13,25	6,25	14,6500853	6,90233259	52,9357725
62	Joueur 05	Position 01 (A droite)	15,26	3,25	15,6022466	6,90233259	52,9357725	
63				18,57	4,25	19,0501286	6,26737409	43,64442
64				16,25	3,12	16,5468094	6,20784908	42,8193225
65				18,57	4,25	19,0501286	6,90233259	52,9357725
66				17,25	0,96	17,2766924	7,33100827	59,7152025
67			Position 02 (Centre)	19,54	2,58	19,7095916	6,90233259	52,9357725
68				17,44	3,25	17,7402396	6,90233259	52,9357725
69				19,54	2,58	19,7095916	7,990344	70,9395525
70				17,44	3,25	17,7402396	7,08793856	55,82097
71				17,25	0,96	17,2766924	7,33100827	59,7152025
72			Position 03 (A	18,54	0,99	18,5664132	7,990344	70,9395525

73		gauche)	18,22	0,96	18,2452734	6,37552815	45,1637325
74			19,54	2,58	19,7095916	6,90233259	52,9357725
75			17,25	0,96	17,2766924	7,33100827	59,7152025

ANALYSE DE QUELQUES VARIABLES BIOMECHANIQUES INFLUENTES SUR LA PRÉCISION DU TIR DES COUPS FRANCS DIRECTS DANS LE FOOTBALL.

Résumé : Les objectifs de cette étude sont ; l'identification des variables biomécaniques qui influent sur la précision du coup franc direct, la détermination des phases importantes de l'exécution du tir du coup franc et les paramètres agissant sur la trajectoire du ballon lors du coup franc direct, en émettant l'hypothèse qu'il y a des corrélations ainsi que des taux de contributions statistiquement significatives entre les variables biomécaniques et la précision du coup franc direct. L'échantillon se compose de cinq (05) joueurs sénior semi professionnelle (Age : $22,8 \pm 2,59$ ans, Expérience : $12,4 \pm 1,82$ ans, Masse Corporelle : $67,8 \pm 4,27$ Kg, Taille : $1,75 \pm 0,04$ m), l'instrument de collecte des données est un test d'aptitude de précision du tir coup franc direct sur une distance de 20 m et sur trois positions différentes (à droite, centre et à gauche). L'analyse vidéo s'est faite avec le logiciel Dartfish 9 pour l'analyse l'habileté du tir et le logiciel Tracker ver 4.95 pour l'analyse de la trajectoire du ballon après les tirs des coups francs. Les résultats ont révélé qu'il y a des corrélations ainsi que des taux de contributions statistiquement significatives entre la précision du tir du coup franc direct et les variables biomécaniques des différentes phases composantes ce dernier ; la phase d'approche : le temps d'approche des joueurs a une corrélation statistiquement significative de 0,616 et un taux de 38 % ($p < 0,01$), la distance d'approche des joueurs a une corrélation significative de 0,638 et un taux de 41 % ($p < 0,01$), la vitesse d'approche des joueurs a une corrélation significative de 0,483 et un taux de 23 % ($p < 0,01$). La phase de placement de la jambe d'appui et le balancement de pied de frappe : la vitesse de la cuisse a une corrélation significative de 0,350 avec un taux de 12 % ($p < 0,01$), la vitesse de la jambe a une corrélation de 0,424 et un taux de 18 % ($p < 0,01$), la vitesse du pied a une corrélation significative de 0,488 et un taux de 24 % ($p < 0,01$). La phase de contact du pied avec le ballon : la quantité du mouvement du pied de frappe a une corrélation statistiquement significative de 0,455 et un taux de contribution de 21 % ($p < 0,01$), l'énergie cinétique du pied de frappe a une corrélation significative de 0,416 un taux de 17 % ($p < 0,01$). La phase de l'envol du ballon : le temps d'envol du ballon a une corrélation statistiquement significative de 0,781 et un taux de contribution de 61 % ($p < 0,01$), l'angle d'envol a une corrélation de 0,608 et un taux de contribution de 37 % ($p < 0,01$), la vitesse du ballon a une corrélation significative de 0,582 et un taux de 34 % ($p < 0,01$), la quantité de mouvement du ballon a une corrélation significative de 0,582 et un taux de 34 % ($p < 0,01$), l'énergie cinétique du ballon a une corrélation significative de 0,590 et un taux de 35 % ($p < 0,01$).

Mots-clés : Football ; Variables biomécanique ; Précision ; Coup franc direct.

تحليل بعض المتغيرات البيوميكانيكية المؤثرة على دقة الركلة الحرة المباشرة في كرة القدم.

ملخص: أهداف هذه الدراسة هي: تحديد المتغيرات البيوميكانيكية التي تؤثر على دقة ركلة حرة مباشرة، وتحديد مراحل مهمة في تنفيذ الضربة الحرة والمؤشرات التي تؤثر على مسار الكرة خلال ركلة حرة مباشرة، من خلال إصدار الفرضية هناك ارتباطات بالإضافة إلى معدلات مساهمة ذات دلالة إحصائية بين المتغيرات الميكانيكية ودقة ركلة حرة مباشرة. تتكون العينة من خمسة (05) اكابر شبه محترفين (العمر: 22.8 ± 2.59 سنة، الخبرة: 12.4 ± 1.82 سنة، كتلة الجسم: 67.8 ± 4.27 كجم، الطول: 1.75 ± 0.04 م)، أداة جمع البيانات هي اختبار دقة ركلة حرة مباشرة على مسافة 20 م وفي ثلاث مواقع مختلفة (اليمن، الوسط واليسار). تم إجراء تحليل الفيديو ببرنامج Dartfish 9 لتحليل مهارة الركلة وبرنامج Tracker ver 4.95 لتحليل مسار الكرة بعد الركلات الحرة. أوضحت النتائج أن هناك ارتباطات بالإضافة إلى معدلات مساهمة ذات دلالة إحصائية بين دقة الركلة الحرة المباشر وبين المتغيرات البيوميكانيكية في المراحل المختلفة التي تشكل الركلة الحرة المباشرة. مرحلة الاقتراب: لوقت الاقتراب اللاعبين ارتباط ذات دلالة إحصائية عند 0.616 ومعدل 38% ($p > 0.01$)، مسافة الاقتراب اللاعبين لها ارتباط كبير ب 0.638 ومعدل بنسبة 41% ($P > 0.01$)، سرعة الاقتراب لها ارتباط ذات دلالة إحصائية عند 0.483 ومعدل 23% ($P > 0.01$). مرحلة وضع الساق المساندة ومرجحة الرجل الضاربة: سرعة الفخذ لديها ارتباط كبيرة ب 0.350 ومعدل 12% ($P > 0.01$)، وسرعة ساق ترابط ب 0.424 ومعدل 18% ($P > 0.01$)، كان لسرعة القدم ارتباط كبير ب 0.488 ومعدل 24% ($P > 0.01$). للمرحلة تصادم القدم مع الكرة: كمية حركة القدم وجود ارتباط ذات دلالة إحصائية ب 0.455 وبنسبة مساهمة 21% ($P > 0.01$)، والطاقة الحركية للقدم ترابط كبير ب 0.416 بمعدل 17% ($P > 0.01$). في مرحلة طيران الكرة: زمن طيران الكرة وجود ارتباط ذات دلالة إحصائية ب 0.781 وبنسبة مساهمة 61% ($P > 0.01$)، وزاوية طيران الكرة لديها ارتباط ب 0,608 وبنسبة مساهمة 37% ($P > 0.01$)، وسرعة طيران الكرة لديها ارتباط كبير ب 0.582 وبنسبة مساهمة 34% ($P > 0.01$)، وكمية الحركة للكرة لديها ارتباط كبير ب 0.582 وبنسبة مساهمة 34% ($P > 0.01$)، فإن الطاقة الحركية للكرة لديها ارتباط كبير ب 0.590 ومعدل 35% ($P > 0.01$).

الكلمات المفتاحية: كرة القدم؛ المتغيرات البيوميكانيكية؛ الدقة؛ الركلة الحرة المباشرة.

ANALYSIS OF SOME BIOMECHANICAL VARIABLES INFLUENCING THE ACCURACY OF DIRECT FREE KICKS IN SOCCER.

Abstract : The objectives of this study are to identify the biomechanical variables that influence the accuracy of the direct free kick, to determine the important phases of the execution of the free kick shot and the parameters that affect the trajectory of the ball during the direct free kick, and to make the hypothesis that there are correlations and statistically significant contribution rates between the biomechanical variables and the accuracy of the direct free kick. The sample consists of five (05) semi-professional senior players (Age: 22.8 ± 2.59 years old, Experience: 12.4 ± 1.82 years old, Body Mass: 67.8 ± 4.27 kg, Size : 1.75 ± 0.04 m), the data collection instrument is a test of the accuracy of the direct free-kick shot over a distance of 20 m and in three different positions (right, center and left). The video analysis was done with Dartfish 9 software to analyze the skill of shooting and Tracker ver 4.95 software to analyze the trajectory of the ball after free kick shots. The results revealed that there are correlations as well as statistically significant contribution rates between the accuracy of the direct free kick shot and the biomechanical variables of the various component phases ; the approach phase : the player approach time has a statistically significant correlation of 0.616 and a rate of 38% ($p < 0.01$), the player approach distance has a significant correlation of 0.638 and a rate of 41% ($p < 0.01$), the player approach speed has a significant correlation of 0.483 and a rate of 23% ($p < 0.01$). The placement phase of the support leg and swaying foot-strike: the thigh speed has a significant correlation of 0.350 with a rate of 12% ($p < 0.01$), the leg speed has a correlation of 0.424 and a rate of 18% ($p < 0.01$), the foot speed has a significant correlation of 0.488 and a rate of 24% ($p < 0.01$). Foot-to-ball contact phase: the momentum of the foot has a statistically significant correlation of 0.455 and a contribution rate of 21% ($p < 0.01$), the kinetic energy of the foot has a significant correlation of 0.416 and a rate of 17% ($p < 0.01$). The flight of the ball phase: the ball flight time has a statistically significant correlation of 0.781 and a contribution rate of 61% ($p < 0.01$), the take-off angle has a correlation of 0.608 and a contribution rate of 37% ($p < 0.01$), the ball speed has a significant correlation of 0.582 and a rate 34% ($p < 0.01$), the momentum of ball has a significant correlation of 0.582 and a rate 34% ($p < 0.01$), the ball kinetic energy has a significant correlation of 0.590 and a rate 35% ($p < 0.01$).

Keywords : Soccer ; Biomechanical variables ; Accuracy ; Direct free kick.