

# La physique du football



**Couraudon Samuel**  
**Mappas Aurélian**  
1<sup>°</sup>S1

## Comment le footballeur influence la trajectoire du ballon ?

### I- Introduction

### II- Les différentes techniques de frappes et leurs effets

- |     |  |      |
|-----|--|------|
| 1-  | L'intérieur du pied                        | p.5  |
| 2-  | Le tir du cou-de-pied                      | p.6  |
| 3-  | Le tir mi-cou-de-pied mi-intérieur du pied | p.7  |
| 4-  | La pichenette                              | p.8  |
| 5-  | Le pointu                                  | p.9  |
| 6-  | L'extérieur du pied                        | p.10 |
| 7-  | Le talon                                   | p.11 |
| 8-  | La madjer                                  | p.12 |
| 9-  | La tête                                    | p.13 |
| 10- | La retournée acrobatique                   | p.14 |

### III- La mécanique des fluides

- |    |   |      |
|----|---|------|
| 1- | L'effet Magnus, sa portance et la traînée | p.15 |
| 2- | Ecoulements, nombre de Reynolds           | p.17 |
| 3- | L'animation 3D de la frappe de R.Carlos   | p.20 |

### IV- Conclusion

### V- Sources

## I- Introduction

Le Football est un sport dans lequel deux équipes de onze joueurs chacune cherchent à envoyer dans le but adverse un ballon sphérique, avec les pieds, la tête ou toute autre partie du corps (excepté la main ou le bras).

Différentes techniques de frappes permettent de donner différentes trajectoires au ballon, en fonction de la masse et de la pression du ballon, et en tenant bien-sûr compte de la gravité, qui joue un rôle d'attraction du ballon vers la terre. On se demandera en quoi le footballeur influence la trajectoire du ballon.

D'abord nous montrerons les différentes techniques de frappes ainsi que leurs effets, puis ensuite, nous verrons que la mécanique des fluides a un impact sur la trajectoire du ballon.

## II- Les différentes techniques de frappes et leurs effets

Pour commencer, la frappe est avant tout un geste technique. Le premier facteur qui entre en compte correspond à l'analyse de la situation pendant un bref délai, puisqu'une frappe correspond généralement à la fin d'une action bien préparée, bien construite, ou encore à la fin d'un raid solitaire. Il faut donc impérativement être vif dans l'observation sur ce qui se passe autour de soi, c'est-à-dire par rapport au placement du gardien et ses défenseurs, au positionnement du ballon et du but.

Le deuxième facteur est un peu plus déterminant puisqu'il rentre dans une phase de technique, il s'agit de la coordination nécessaire qu'il faut pour frapper le ballon comme souhaité ainsi que l'ajustement de la foulée à l'approche de l'impact.

En dernier lieu, intervient le facteur décisionnel et donc l'action de tirer, c'est à ce moment-là que le joueur peut montrer à son entraîneur qu'il est indispensable pour son équipe dans la quête d'une victoire.

Avant de frapper, généralement, le footballeur a donc déjà réfléchi sur la façon dont il va frapper tout en anticipant la trajectoire du ballon et son point de chute. Il existe des situations où le footballeur n'a pas eu le temps d'analyser son positionnement sur le terrain et le tir qu'il doit effectuer pour faire trembler les filets, dans ce cas-là il émet une frappe instinctive comme une sorte de « frappe réflexe ».

La frappe est un mouvement qui est réalisé souvent de la même façon. Tout d'abord la jambe de tir se lance de l'arrière vers l'avant tandis que l'autre jambe se bloque pour servir d'appui, au foot on appelle ça le « pied d'appui ». On observe un mouvement de flexion et d'extension au niveau de la jambe de frappe sur la cuisse et de la cuisse sur le tronc. Les bras ainsi que les autres membres supérieurs vont servir pour l'équilibre au moment de l'impact.

Pour maîtriser les différentes façons de frapper, aussi bien durant une action ou encore lors de coups de pieds arrêtés, l'entraînement demeure donc obligatoire.

Ainsi, la frappe est un élément essentiel au football puisque, sans ce détail, il est impossible de remporter un match, il est donc le facteur décisif dans la victoire d'une équipe.

## 1- L'intérieur du pied

Au foot, l'intérieur du pied est une frappe couramment utilisée, puisqu'elle regroupe finesse et précision en simultanée au profit de la puissance. Afin de le réaliser, il suffit de taper le ballon avec l'arrête interne du pied.

L'intérieur du pied est utilisé pour des frappes très précises. C'est pour cette raison que les passes sont principalement réalisées de l'intérieur du pied. En tirant de l'intérieur du pied, il est possible de donner un effet brossé au ballon. Il est souvent utilisé pour des frappes simples, des centres, des corners ou encore des coups francs enroulés, puisqu'il permet de contourner le mur, comme ceux de Juninho à Lyon. D'ailleurs 44 de ses 100 réalisations à Lyon seront effectuées sur phases arrêtées, plus précisément sur coups francs.

Jusqu'à ce jour, Juninho est encore considéré comme un maître en la matière. En effet, dès que les spectateurs, commentateurs, défenseurs, gardiens et autres voyaient Juninho à l'œuvre, savaient quand une fraction de seconde, sa pouvait faire but. Grâce à ses frappes mythiques il permettait à son équipe de l'emporter ou encore de la remonter là où on ne l'espérait plus.

Il est donc conseillé d'effectuer un intérieur du pied lorsqu'on est proche du but, lors de phases arrêtées, ou encore lors d'un face à face avec le gardien.





## 2- Le tir du cou-de-pied

Le tir du cou-de-pied est un tir très difficile techniquement parlant, puisqu'il n'allie pas forcément puissance et précision. Il fait partie d'un des tirs les plus tentés puisque lorsqu'il est bien réalisé alors, la frappe suivie aura une trajectoire rectiligne et permettra une meilleure transmission de vitesse au ballon qui fera rêver bon nombre de supporters.

Pour le réaliser, il faut frapper le ballon de sorte à ce que le point de contact entre le ballon et le pied se situe au niveau de l'axe médian du pied, c'est-à-dire, scientifiquement parlant, la partie supérieure du scaphoïde soit le dessus du pied. Les tirs du cou-de-pied sont donc à effectuer lorsqu'on est loin du but mais peuvent également s'avérer fatals dans la surface de réparation. Ces tirs sont également souvent utilisés lors de coups francs lointains, Cristiano Ronaldo en est l'exemple parfait. Il faut aussi savoir que les reprises de volées sont, dans la plupart des cas, réalisées en cou-de-pied.

L'image ci-dessous ne vous est sans doute pas étrangère puisqu'il s'agit du plus beau but de l'année 2014 (récemment élu comme tel en janvier 2015) inscrit par James Rodríguez avec son équipe de Colombie lors du mondial 2014 au Brésil contre l'Uruguay en 8ème de finale de la Coupe du Monde. Il lui est donc décerné le prix Puskás du plus beau but de l'année.



### 3- Le tir mi-cou-de-pied mi-intérieur du pied

Le tir mi-cou-de-pied mi-intérieur du pied, est un tir qui demande beaucoup d'assiduité, puisqu'il rend compte d'une grande habileté au niveau du pied lors du contact avec le ballon. Il fait donc partie d'une frappe peu courante en match car peu de joueurs sont capables de la réaliser en bonne et due forme.

Pour le réaliser, il faut que la zone de contact se situe entre le métatarse et l'hallux (le gros orteil). Cette façon de frapper est le meilleur compromis entre la puissance d'un tir cou-de-pied et la précision d'un intérieur du pied. Ce tir permet de varier les effets et effectuer différents styles de frappe comme le lob, la frappe en rupture ou encore le tir en feuille morte comme le fait un certain Andrea Pirlo célèbre joueur Italien pour ses coups francs et sa grande carrière toujours d'actualité.

Cette façon de tirer fait en quelque sorte la part belle à la créativité car il permet de donner des trajectoires fantasmagiques à la balle.



## 4- La pichenette

La pichenette est une frappe qui permet de soulever le ballon du bout du pied en frottant le sol avec la semelle. Le ballon est aussi percuté par le cou-de-pied en fin de mouvement, ce qui lui donne une trajectoire en cloche avec un effet plus ou moins rétroactif.

L'image ci-dessous nous montre Lisandro López en action avec l'Olympique Lyonnais. Actuellement à Al-Gharafa, au Qatar, Lisandro López a marqué son temps à l'OL, puisqu'il est le 9<sup>ème</sup> meilleur buteur de l'histoire de l'Olympique Lyonnais. Il est d'ailleurs réputé pour sa hardiesse, sa « grinta » et son sens du but. Il réunit toutes les qualités d'un grand attaquant.





## 5- Le pointu

Le pointu n'est pas la manière de frapper la plus gracieuse mais il peut s'avérer efficace. Souvent utilisé en dernier recours, lorsque les défenseurs reviennent vite et qu'on n'a pas vraiment le temps d'armer une frappe plus technique ou lorsqu'on arrive en bout de course, le pointu sert simplement à pousser le ballon au fond du but le plus rapidement possible.

Il fait partie des premières techniques de frappes qu'un humain sait réaliser. C'est un geste naturel, instinctif, ainsi, tout individu n'ayant aucune expérience dans le monde du football réalise cette frappe.

Pour le réaliser, il faut que la surface de contact se situe au niveau du bout du pied plus précisément au niveau des épiphyses distales des phalanges. Le pointu doit être utilisé à faible et moyenne distance du but. Le modèle de référence est le pointu réalisé par Ronaldinho contre Chelsea.

<https://www.youtube.com/watch?v=9O3otJu2FWE>



## 6- L'extérieur du pied

L'extérieur du pied est un tir qui demande une grande technicité, lorsqu'il est bien réalisé, il donne de superbes trajectoires qui sont aussi gracieuses que difficiles pour le gardien.

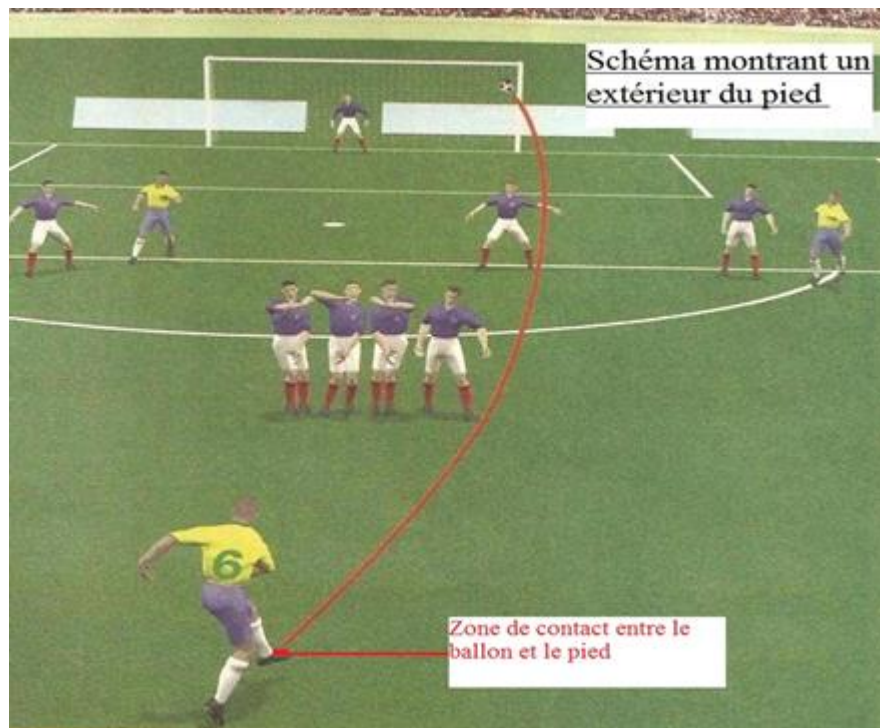
Pour le réaliser, il faut que la zone de contact soit sur l'arrête externe du pied, le quatrième et cinquième métatarsien ainsi que les phalanges. Le tir de l'extérieur du pied donne un effet latéral au ballon. Malgré la difficulté de réaliser un extérieur du pied, celui-ci reste cependant une des frappes les plus approximatives.

Rares sont les joueurs qui arrivent à le réaliser tout en le maîtrisant. L'extérieur du pied le plus marquant reste sans doute celui effectué par Roberto Carlos en 1997 contre la France.

L'extérieur du pied se réalise généralement lorsqu'on est loin du but, lors de phases arrêtées ou encore lors de frappes lointaines, puisqu'il a certaines caractéristiques similaires à la frappe du cou-de-pied.

En général un tir extérieur du pied bien réalisé donne du fil à retordre au gardien adverse puisqu'il réalise des effets très difficiles à lire pour lui. Fabien Barthez peut vous en attester !

[http://www.dailymotion.com/video/x7s8z9\\_coup-franc-de-roberto-carlos-1997\\_sport](http://www.dailymotion.com/video/x7s8z9_coup-franc-de-roberto-carlos-1997_sport)



## 7- Le talon

Le tir du talon se réalise principalement dans la surface de réparation en déviation comme le fait Zlatan Ibrahimovic, qui a carrément réinventé le geste.

Pour le réaliser, il faut que le pied rentre en contact avec le ballon au niveau du talon, plus précisément au niveau du calcaneus.

Lors d'une talonnade le geste va de l'avant vers l'arrière, à l'inverse d'une frappe classique où le geste va de l'arrière vers l'avant.

Zlatan Ibrahimovic est un joueur particulier puisqu'il fait preuve d'une agilité déconcertante par rapport à sa taille c'est un « personnage » qui sort de l'ordinaire dans le monde du football, qu'on l'aime ou qu'on l'aime pas, on ne peut que reconnaître sa qualité technique qui lui permet d'éblouir, de changer un match à lui tout seul aussi bien de par son jeu que par sa présence. Ils sont que quelques un à pouvoir se vanter d'une telle réputation, comme par exemple Cristiano Ronaldo et Lionel Messi, qui sont, à ce jour, les deux footballeurs les plus connus dans le monde du football.





## 8- La Madjer

« Une Madjer » est le fait de marquer un but en frappant le ballon avec le talon le plus éloigné du but en le laissant préalablement passer entre ses jambes.

Ce terme est apparu en référence au joueur algérien Rabah Madjer, auteur d'un but similaire en finale de la coupe d'Europe des clubs champions de 1987 avec le FC Porto.

<https://www.youtube.com/watch?v=C4B--qYWIks>

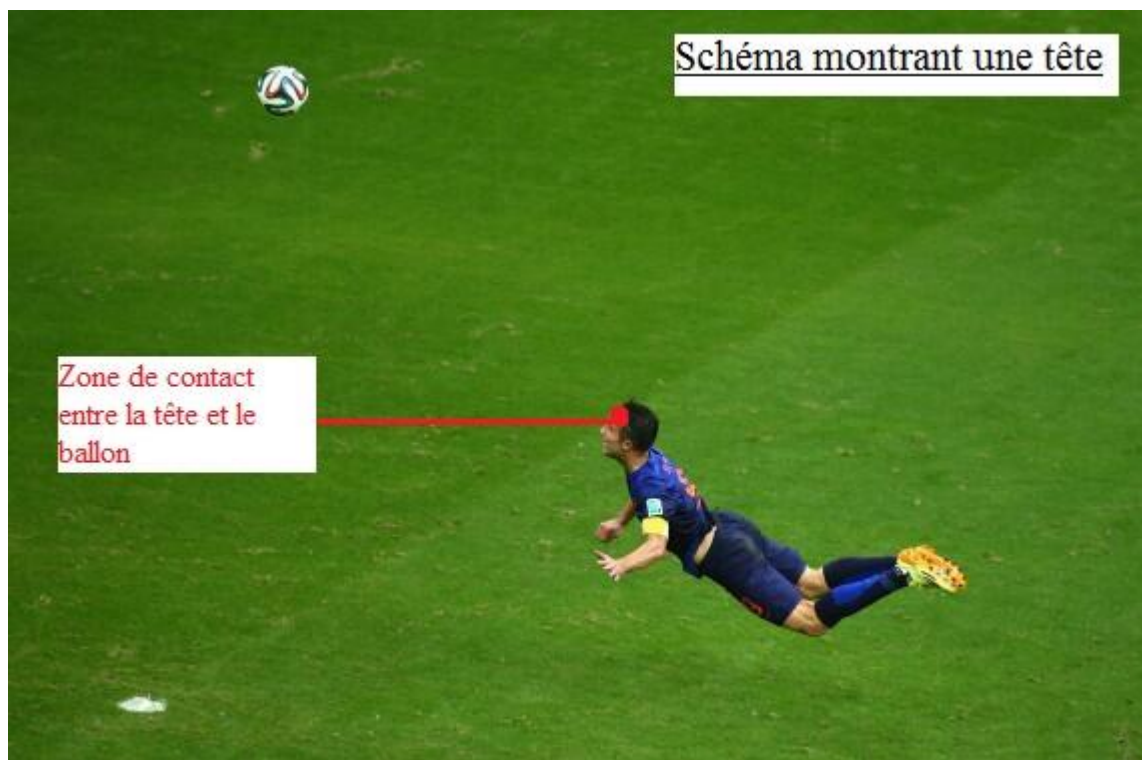


## 9- La tête

Le tir de la tête est un moyen efficace de marquer un but sur un coup de pied arrêté. Il nécessite un timing parfait et une bonne lecture du jeu ainsi que de la trajectoire du ballon, puisqu'il doit être accompagné d'une course d'élan et d'un saut afin de pouvoir être à la hauteur du ballon et lui faire changer de direction pour marquer. Il est aussi possible d'effectuer une tête sans sauter lorsque le ballon est à même hauteur du joueur, mais lorsque cette frappe est accompagnée d'une prise d'élan et d'un saut, alors le tir de la tête sera plus puissant.

Le tir de la tête n'est pas toujours utilisé pour attaquer puisqu'il permet aussi de défendre, sur un corner par exemple ou encore un coup franc voir un six mètres. Frapper le ballon du front permet une meilleure précision même si certains joueurs préfèrent effectuer une tête avec le crâne.

L'Espagnol Carles Puyol, malgré une taille moyenne (1,78 m), était une référence en ce qui concerne le jeu de tête. En ce qui concerne l'image ci-dessous, il s'agit du but de Robin Van Persie lors de son match contre l'Espagne dans le groupe B qui s'est incliné 5 buts à 1, un véritable tournant dans cette Coupe du Monde 2014!





## 10- La retournée acrobatique

La retournée acrobatique est un tir de volée en extension, tête en bas et dos au but, où l'impulsion et le tir sont réalisés avec la même jambe. Il existe plusieurs surnoms, synonymes comme : la bicyclette ou encore le ciseau.

Pour réaliser cette frappe, il faut faire preuve d'une extraordinaire agilité et d'un timing parfait entre la vitesse, le positionnement du ballon et l'exécution de la frappe.

L'image ci-dessous est l'un des plus beaux de l'histoire du football, il est l'oeuvre d'un certain Zlatan Ibrahimovic qui venait de gagner contre l'Angleterre en 2012 avec son équipe de Suède sur le score de 4 à 2, il est l'auteur des 4 buts de son équipe (quadruplé), grande performance au plus haut niveau.



### III- La mécanique des fluides

Après la frappe, le ballon est soumis à un fluide (un fluide est un milieu matériel parfaitement déformable), l'air, nous allons nous intéresser à la mécanique des fluides, qui est l'étude du comportement de ceux-ci (liquides et gaz), et plus particulièrement à la dynamique des fluides, qui en est l'étude lorsqu'ils sont en mouvement.

Nous allons prendre en exemple, tout au long de ce chapitre, la frappe de Roberto Carlos en 1997 lors du match France-Brésil.

Dans un premier temps décrire l'effet Magnus et sa portance, ainsi que la traînée, sur le ballon, ensuite nous nous pencherons sur les écoulements autour du ballon mis en évidence par le calcul du nombre de Reynolds de la frappe prise pour exemple.

Et pour finir, nous présenterons une animation sur cette même frappe.

#### 1- L'effet Magnus, sa portance et la traînée

L'effet Magnus, découvert par Heinrich Gustav Magnus (1802-1870), physicien allemand, permet notamment d'expliquer les effets de balle dans le sport.

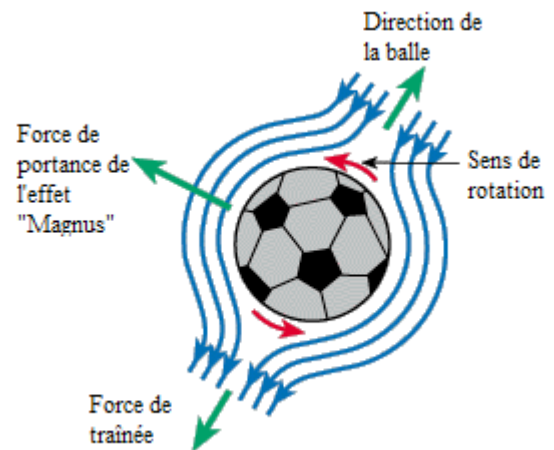
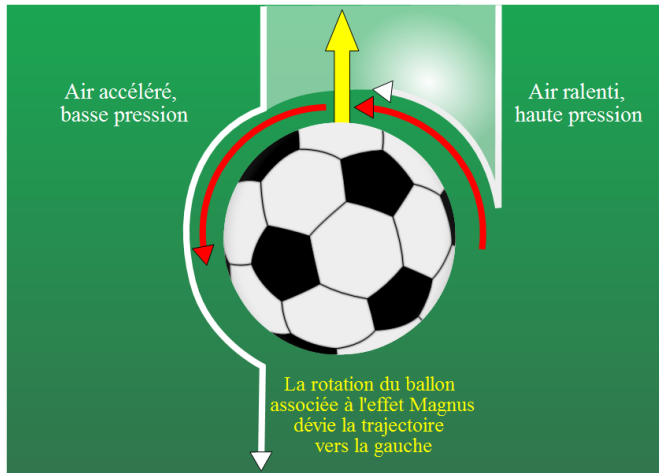
Quand la vitesse d'un mobile dans un fluide augmente, sa pression diminue, et vice versa. La pression est une notion physique fondamentale, on peut la voir comme une force rapportée à la surface sur laquelle elle s'applique

La portance est une force aérodynamique s'exerçant sur un corps au sein de l'écoulement d'un fluide, dans une direction orthogonale à la vitesse relative (vitesse du mobile par rapport au fluide).

L'effet donné à un ballon de football est dû à sa rotation sur lui-même. Si un objet est en rotation sur un axe perpendiculaire à son déplacement dans un fluide, une moitié de sa surface fait rotation dans la direction du déplacement, l'autre moitié fait rotation contre le déplacement. La friction entre la balle et l'air attire l'air en rotation de la même manière autour de la balle. De là, l'effet se conforme au principe de Bernoulli : l'air à l'extérieur de la courbe est ralenti, augmentant sa pression, tandis que l'air à l'intérieur de la courbe est accéléré, diminuant sa pression.

Ainsi, la balle dévie vers l'intérieur de la courbe, permettant au ballon de contourner le mur défensif et de revenir ensuite vers l'intérieur.

## Schémas montrant l'effet Magnus sur une balle



Un mobile se déplaçant dans un fluide pesant subit de la part de ce fluide une distribution de pression dont la résultante s'oppose à sa marche. La composante de cette résultante selon la direction du mobile est appelée traînée. L'intensité de la force de traînée est exprimée en fonction de la vitesse, de la forme et de la taille du mobile, du fluide dans lequel il interagit.

Le coefficient de traînée usuellement désigné  $C_x$  est un nombre sans dimension qui est principalement caractéristique de la forme du mobile.

Si le footballeur ne frappe pas exactement le centre du ballon il impose non seulement une vitesse dans la direction de l'impulsion mais aussi une rotation dans le plan qui contient le centre et le point d'impact. Cette rotation dévie l'air sur l'un des coté et par réaction entraîne une force de l'air sur le ballon de l'autre côté. Celle-ci est perpendiculaire à la traînée dans le plan de rotation, ce qui permet de la qualifier de portance.

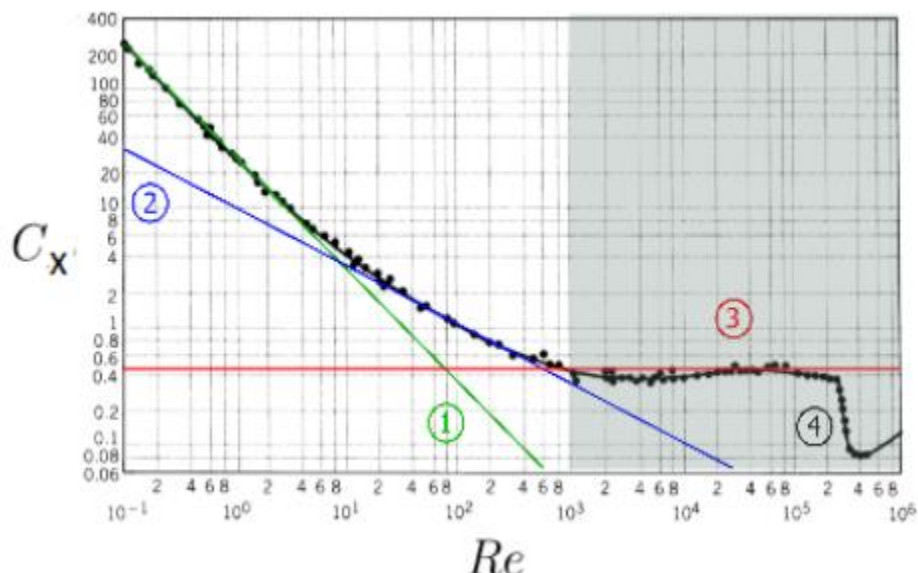
Dans le cas où la frappe porte sur le côté, l'effet latéral incurve la trajectoire dans le plan horizontal, ce qui permet de contourner le mur.

## 2- Écoulements, nombre de Reynolds

Il existe deux types d'écoulements, les écoulements laminaires et turbulents. Un fluide est turbulent quand l'effet de l'inertie sur diverses couches du fluide est plus grand que l'effet de la viscosité qui tend à les annuler. Ceci veut dire que des masses du fluide circulent autour de l'objet de façon aléatoire. Si un fluide est laminaire, ses particules ne se déplacent que le minimum nécessaire et la viscosité du fluide le retient sur la surface de l'objet.

Pour déterminer si un fluide s'écoule de façon laminaire ou turbulente, on utilise le nombre de Reynolds ( $Re$ ).

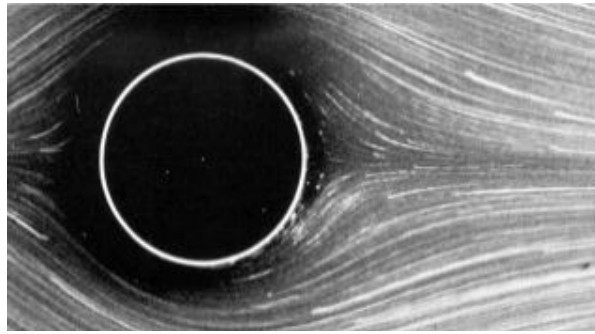
### Représentation de $C_x$ en fonction de $Re$



		Condition	Expression
1	Stokes (écoulement de Stokes)	$Re < 1$	$C_x = 24/Re$
2	Van Allen (écoulement intermédiaire)	$1 < Re < 10^3$	$C_x = 18,5/Re^{0,6}$
3	Newton (écoulement turbulent)	$10^3 < Re < 5 \times 10^5$	$C_x = 0,44$

La zone blanche représente les écoulements dits laminaires, la zone grisée représente ceux dits turbulents. Le 4 désigne la crise de traînée.

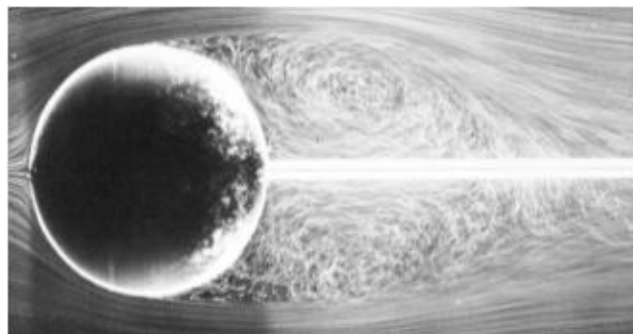
1- Couche limite à la sphère (loi de Stokes)



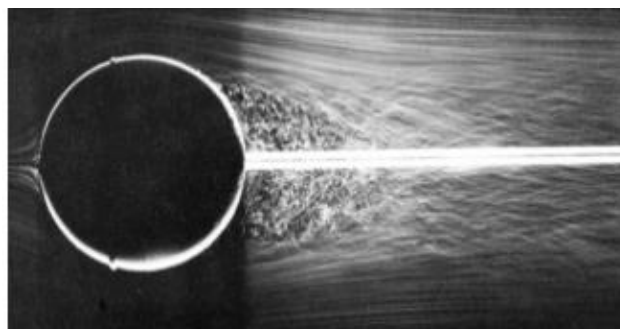
2- La couche limite se décolle de plus en plus tôt, des tourbillons apparaissent dans le sillage



3- La couche limite se décolle, le sillage turbulent occupe tout le sillage en aval



4- Le décollement de la couche limite est retardé ; le sillage turbulent est moins important (chute de la traînée).





Le nombre de Reynolds se calcule par l'expression :

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

*Re* : nombre de Reynolds s.u.

*V* : vitesse débitante en m/s

*D* : diamètre en m

*ν* : viscosité cinématique en m<sup>2</sup>/s

*μ* : viscosité dynamique en kg/(m.s)

*ρ* : masse volumique en kg/m<sup>3</sup>

Pour la frappe de Roberto Carlos :

$$D = 0,22$$

$$V = 27,8$$

Il faut alors calculer la viscosité cinématique :

$$\nu = -1,363528 \times 10^{-14} \times T^3 + 1,00881778 \times 10^{-10} \times T^2 + 3,452139 \times 10^{-8} \times T - 3,400747 \times 10^{-6}$$

Avec :

*T* = Température en Kelvins

*ν* = viscosité cinématique en m<sup>2</sup>/s

Il faisait 18,5°C lors du match soit 291,65°K, nous prendrons 292 en raison du respect des chiffres significatifs.

Cela nous donne :

$$\nu = 1,49 \times 10^{-05}$$

De là nous trouvons  $Re = 4,10 \times 10^5$

Ainsi la frappe de Roberto Carlos subissait un écoulement turbulent et se trouvée juste avant la crise de traînée.

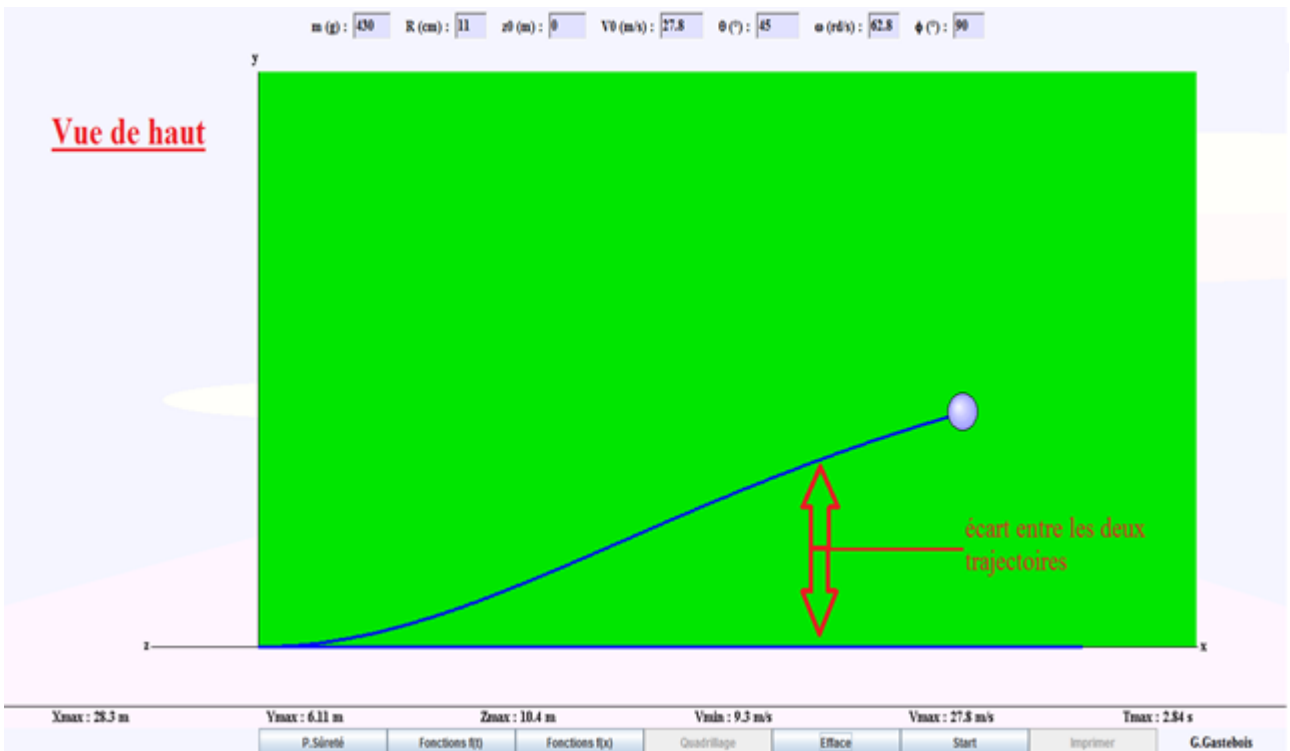
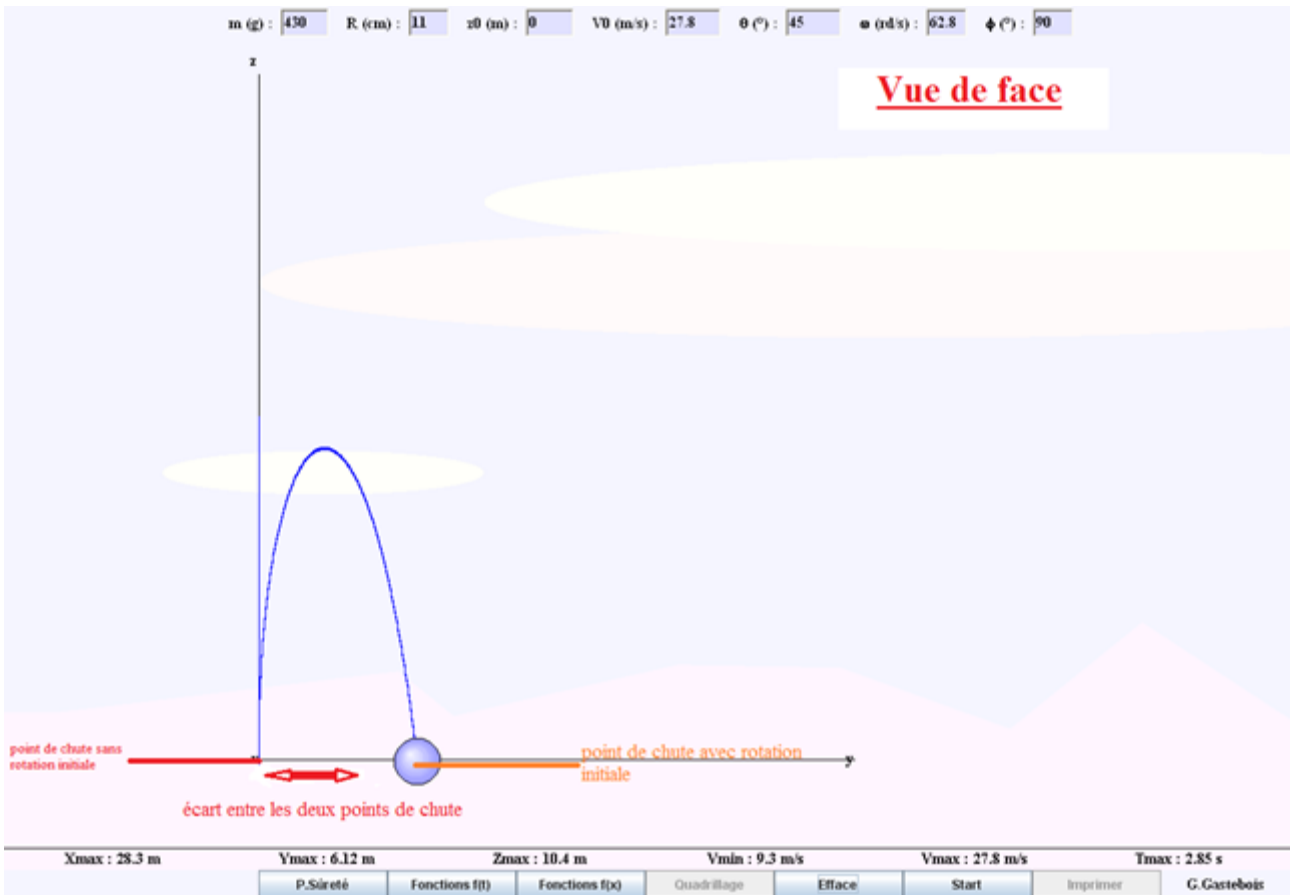
### 3- L'animation 3D de la frappe de Roberto Carlos

Ci-dessous, vous trouverez trois vues différentes de l'animation montrant une frappe basique, sans effet et celle de Roberto Carlos.

Pour simuler la frappe de Roberto Carlos contre la France en 1997 on utilise les paramètres suivants :

- masse du ballon:  $m = 430$  g
- rayon du ballon:  $R = 11$  cm
- altitude initiale:  $Z_0 = 0$  m
- vitesse initiale:  $V_0 = 27.8$  m/s
- angle de tir :  $45^\circ$
- vitesse de rotation:  $62.8$  rad/s
- $\phi = 90$





Grâce à l'étude de la trajectoire de la balle suite à la frappe de Roberto Carlos contre la France en 1997, nous comprenons pourquoi Fabien Barthez est resté immobile sur sa ligne lors de l'exécution de cette frappe, ainsi nous compatissons avec lui sur ce but encaissé, qui est et restera l'un des plus beaux de l'Histoire du football.

Merci à Gilbert Gastebois pour son animation « Effet Magnus » qui est disponible sur son site :

<http://gilbert.gastebois.pagesperso-orange.fr/java/magnus/magnus.htm>

## IV- Conclusion

Ainsi, lors de l'exécution d'une frappe au football, il y a donc dans un premier temps plusieurs facteurs clés à prendre en compte : la zone de contact entre le ballon et le pied, la masse du ballon et l'interaction gravitationnelle qui est exercée sur lui par la terre, et les conditions météorologiques.

Dans un second temps, une fois la frappe exécutée, le ballon aura tout d'abord une trajectoire définie par la technique de frappe imposée par le footballeur, puis elle sera définitive lorsque l'effet Magnus et sa portance, la traînée et les différents types d'écoulement, laminaires ou turbulents, définis par le nombre de Reynolds rentrent en jeu.

Le footballeur influence donc la trajectoire du ballon que dans un premier temps, puisque ensuite des facteurs physiques interviennent.

Grâce à l'étude de la décomposition d'une frappe avant et après son exécution, nous pouvons ainsi comprendre qu'il est difficile de voir des matchs avec un nombre de buts important puisque d'abord, les différentes techniques de frappes sont complexes à réaliser, mais il faut aussi que les facteurs physiques qui rentrent en action, soient en adéquation avec la trajectoire initialement voulue par le footballeur.

Les amoureux du ballon ovale se targuent de voir plus d'actions que dans un match de foot, il serait intéressant de comparer si dans le rugby on retrouve les mêmes facteurs physique.



## Sources :

Les images, photos montrant l'exécution d'une frappe, l'effet Magnus et la traînée, ont été prises à l'aide de « Google images » :

<https://www.google.fr/imghp?hl=fr&tab=wi&ei=1KLxVMnWllv7UqXsgvAL&ved=0CBIQqi4oAg>

Les images, photos montrant l'exécution d'une frappe et les images de l'animation ont été retravaillées à l'aide du logiciel « Paint »

<http://fr.uefa.com/trainingground/skills/video/videoid=1584060.html>

<http://entrainement-sportif.fr/tir-football.pdf>

<http://entrainement-sportif.fr>

<http://entrainement-sportif.fr/techniques-sportives.htm>

<http://entrainement-sportif.fr/entrainement-football.htm>

[http://entrainement-sportif.fr/football\\_tir\\_technique.htm](http://entrainement-sportif.fr/football_tir_technique.htm)

<http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/MecaFlu.xml>

[http://e2phy.in2p3.fr/2008/documents/presentations/Cours\\_Etienne\\_Guyon.pdf](http://e2phy.in2p3.fr/2008/documents/presentations/Cours_Etienne_Guyon.pdf)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Dynamique\\_des\\_fluides](http://fr.wikipedia.org/wiki/Dynamique_des_fluides)

[http://www.pmmh.espci.fr/fr/gouttes/Equipe\\_files/TheseBaptiste.pdf](http://www.pmmh.espci.fr/fr/gouttes/Equipe_files/TheseBaptiste.pdf)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Air#Propri.C3.A9t.C3.A9s\\_thermophysiques](http://fr.wikipedia.org/wiki/Air#Propri.C3.A9t.C3.A9s_thermophysiques)

<http://gilbert.gastebois.pagesperso-orange.fr/java/magnus/magnus.htm>