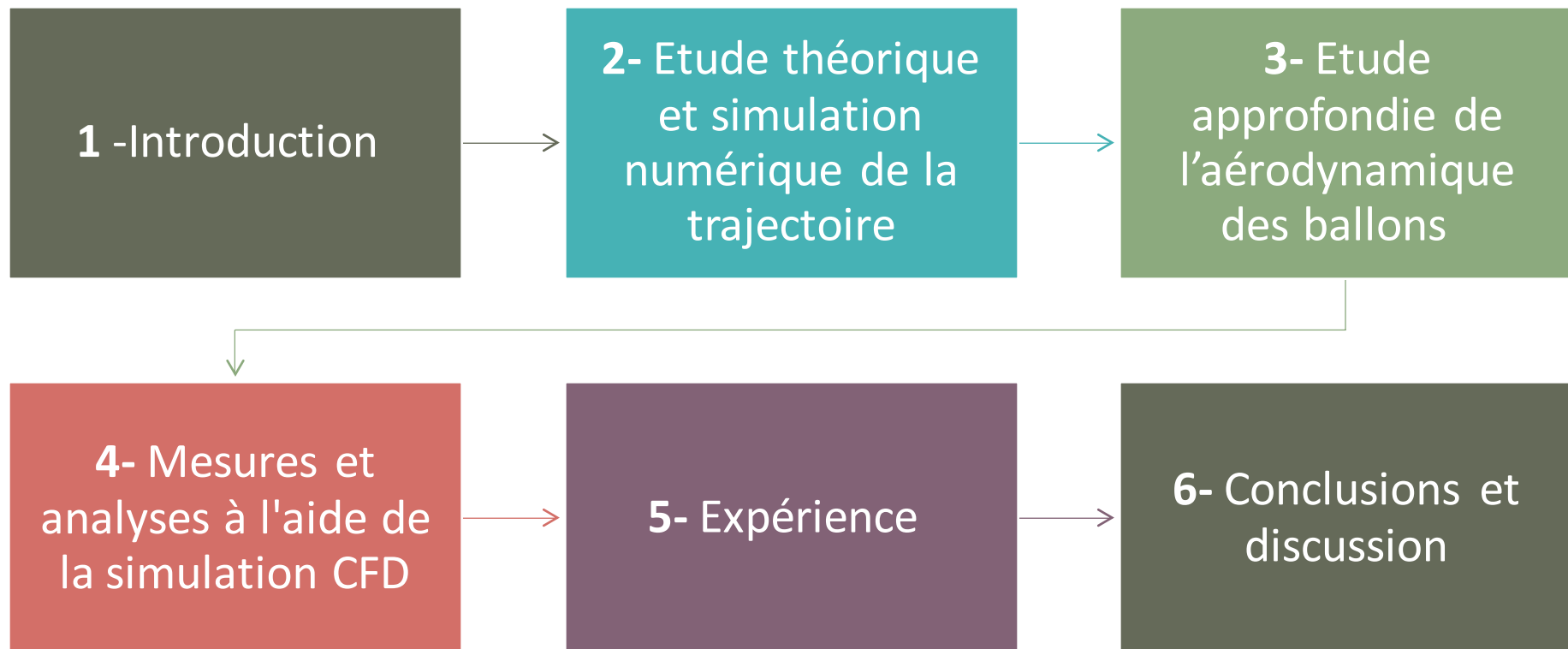


MODÉLISATION
AÉRODYNAMIQUE: ÉVALUER
L'INFLUENCE DE LA
CONCEPTION DES BALLES SUR
LEURS TRAJECTOIRES

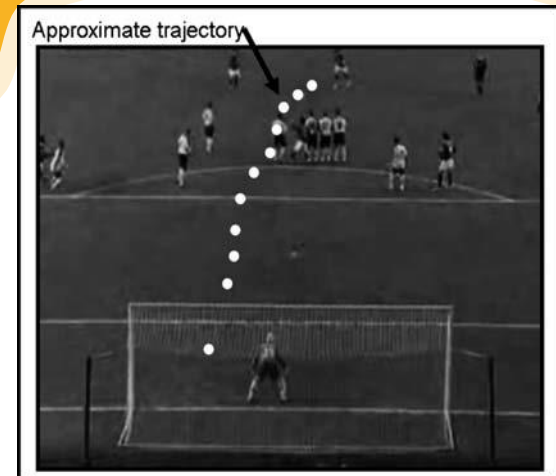
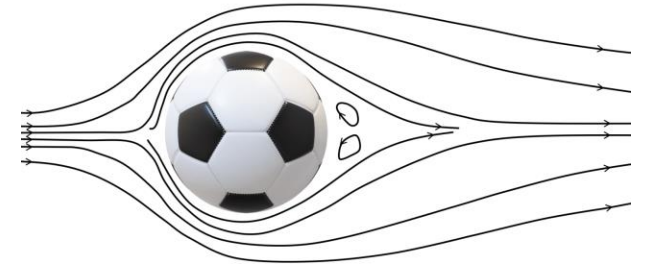
AYMAN MIDAN

N° SCEI : 45451

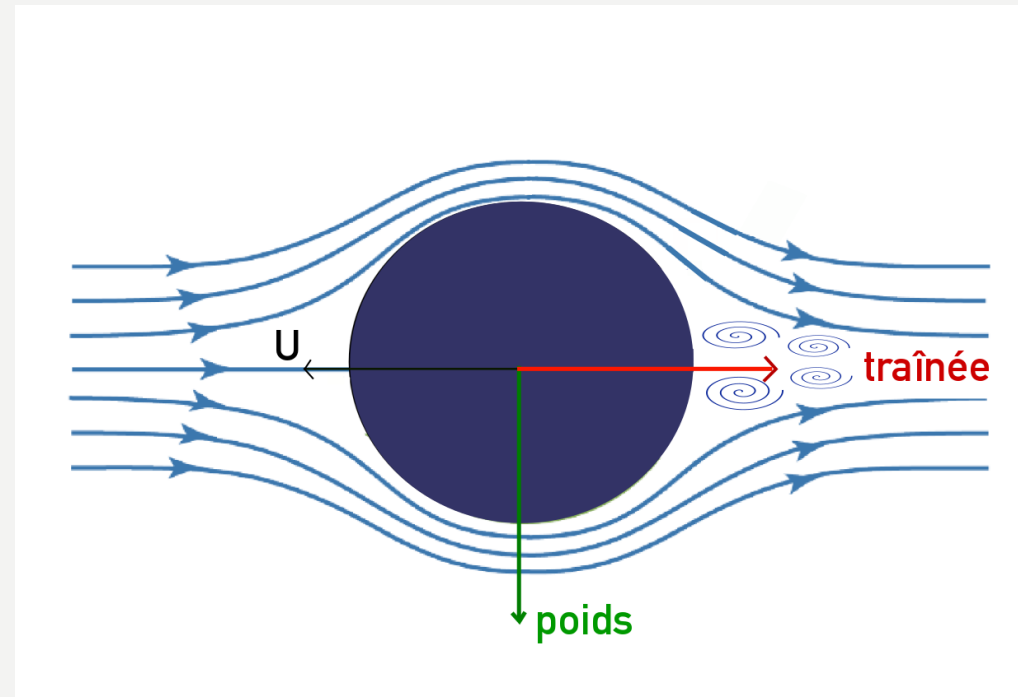


INTRODUCTION

BALLON : CONCEPTION, MODÉLISATION ET TRAJECTOIRE



Aérodynamique du ballon de football



DÉFINITIONS BASIQUES

- L'analyse aérodynamique des ballons de sport commence par la considération des forces agissant sur eux. Ces forces incluent la gravité (mg), la traînée (FD), la portance (FL) et la force latérale (FS). La traînée, combinant la traînée de friction et la traînée de pression, est calculée à l'aide du coefficient de force aérodynamique (CD), déterminé par la densité de l'air (ρ), la vitesse du ballon (v), et sa section transversale (A) selon la formule :

$$C_x = \frac{F_x}{0.5 \rho v^2 A}$$

- Le nombre de Reynolds (Re) est un paramètre sans dimension lié à la vitesse, calculé par:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

où d est le diamètre du ballon et μ est la viscosité de l'air.

- Le paramètre de rotation (Sp) est un autre paramètre sans dimension lié à la rotation du ballon, donné par :

$$Sp = \frac{r \omega}{v}$$

où r est le rayon du ballon et ω est sa vitesse angulaire.

ETUDE THÉORIQUE ET SIMULATION NUMÉRIQUE DE LA TRAJECTOIRE

Prenons le cas d'un ballon frappée avec un faible spin (ou spin négligeable) :

Bilan des forces :

1- Poids : $\vec{P} = m\vec{g}$

2- Force de trainée :

Direction : Opposée au déplacement du ballon

Formule : $\vec{F}_d = -\frac{1}{2}\rho C_d v \vec{v}$

ETUDE MÉCANIQUE

- Le principe fondamental de la dynamique, ou deuxième loi de Newton, s'applique au ballon de football dans le référentiel du terrain supposé galiléen, et peut être exprimé par :

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

$$\begin{cases} -\frac{1}{2}\rho Cd \dot{x}^2 = m\ddot{x} \\ -mg - \frac{1}{2}\rho Cd \dot{y}^2 = m\ddot{y} \end{cases}$$

- (La portance est négligeable car $\omega \simeq 0$)

$$\ddot{x} = \frac{dV_x}{dt} = \frac{dV_x}{dx} \frac{dx}{dt} = V_x \frac{dV_x}{dx}$$

$$\text{donc : } V_x \frac{dV_x}{dx} = - \frac{Cd \rho A}{2m} V_x^2$$

on divise par V_x (supposons V_x non nulle) et on sépare les variables

$$\text{ainsi : } \frac{dV_x}{V_x} = - \alpha dx \left(\text{avec } \alpha = \frac{Cd \rho A}{2m} \right)$$

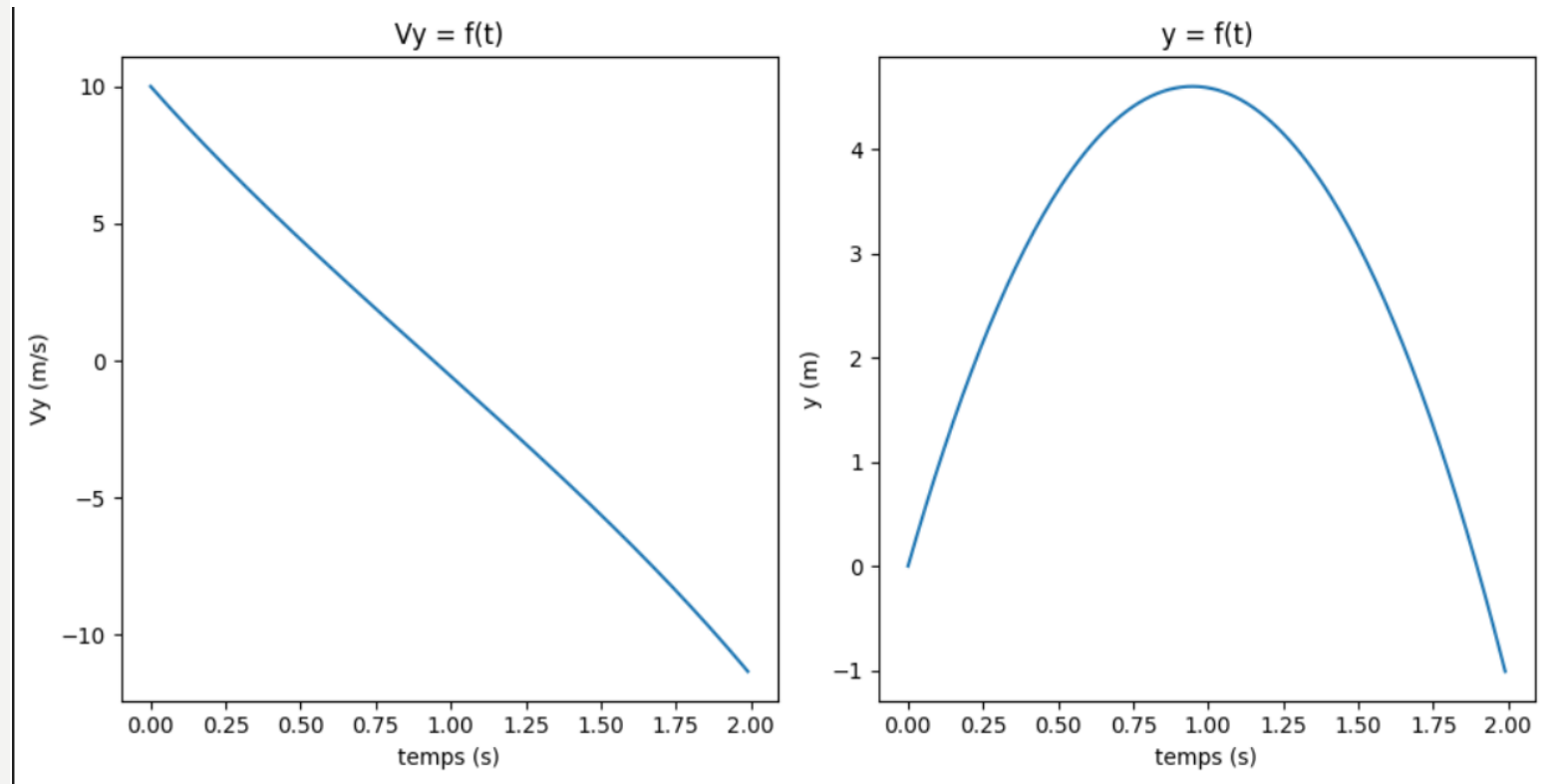
on intégre ($V_x(t=0) = V_{0x}$, $x(t=0) = 0$)

$$\text{Alors : } V_x = V_{0x} e^{-\alpha x}$$

De la même façon, on trouve :

$$x(t) = \frac{\ln(\alpha V_{0x} t)}{\alpha}$$

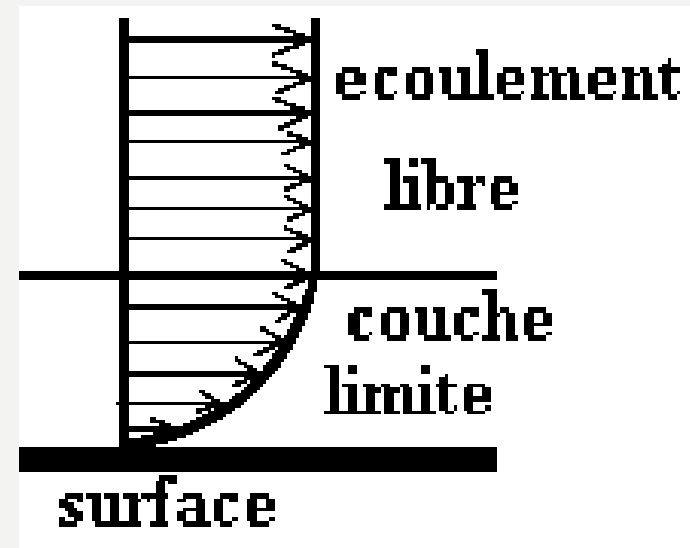
Pour l'accélération verticale, elle s'agit d'une équation différentielle non linéaire, mais plus complexe à cause de la gravité, ainsi on opte à la résolution numérique à l'aide de la méthode de Runge-Kutta



ETUDE APPROFONDIE DE L'AÉRODYNAMIQUE DES BALLONS

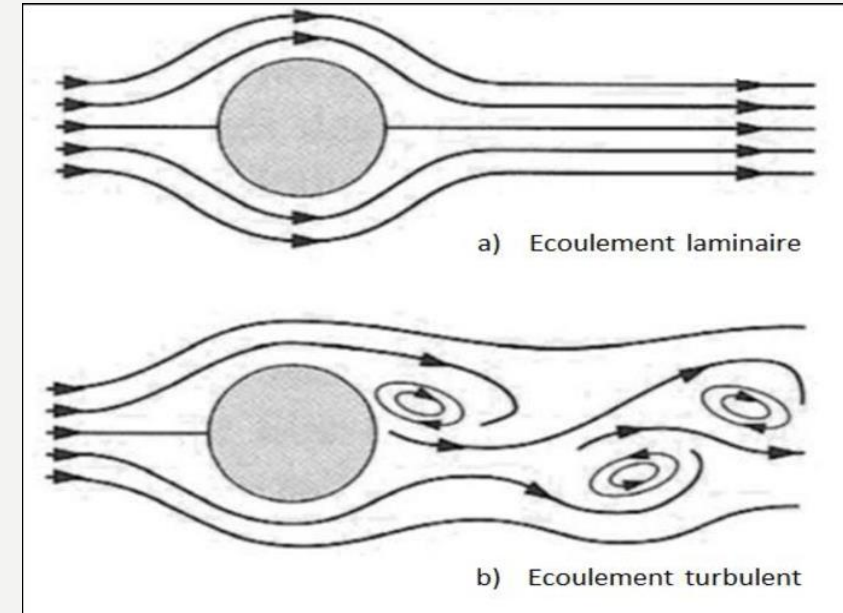
COUCHE LIMITE

- La **couche limite** est une zone d'interface mince et étroite qui se forme entre un corps solide et un fluide en mouvement relatif. Elle est causée par la **viscosité** du fluide, qui génère une friction entre le fluide et la surface du corps.



TYPES DE COUCHES LIMITES

- **Laminaire** : Écoulement ordonné et régulier où les particules de fluide se déplacent en couches parallèles. La séparation de la couche limite se produit plus tôt, créant un sillage plus large et une traînée de pression plus élevée.
- **Turbulent** : Écoulement chaotique et désordonné avec des fluctuations aléatoires. La couche limite turbulente a plus d'énergie cinétique près de la surface, retardant la séparation et réduisant ainsi la traînée de pression.



SÉPARATION DE LA COUCHE LIMITE

La séparation se produit lorsque le gradient de pression défavorable causé par la surface incurvée à l'arrière de la balle repousse l'écoulement et le ralentit, jusqu'à ce qu'il finisse par s'arrêter et même reculer, formant ainsi une région d'écoulement de recirculation derrière la balle, appelée sillage. Ce mécanisme est illustré dans la Figure 1.

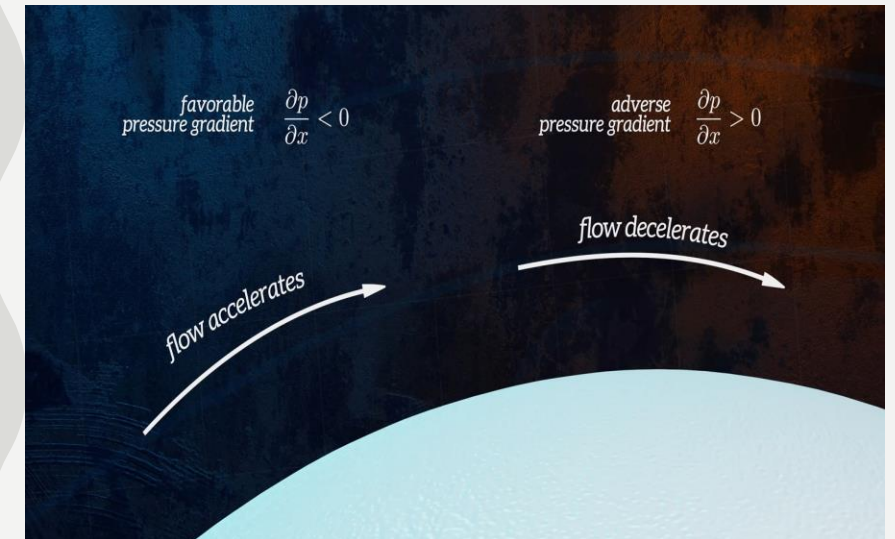
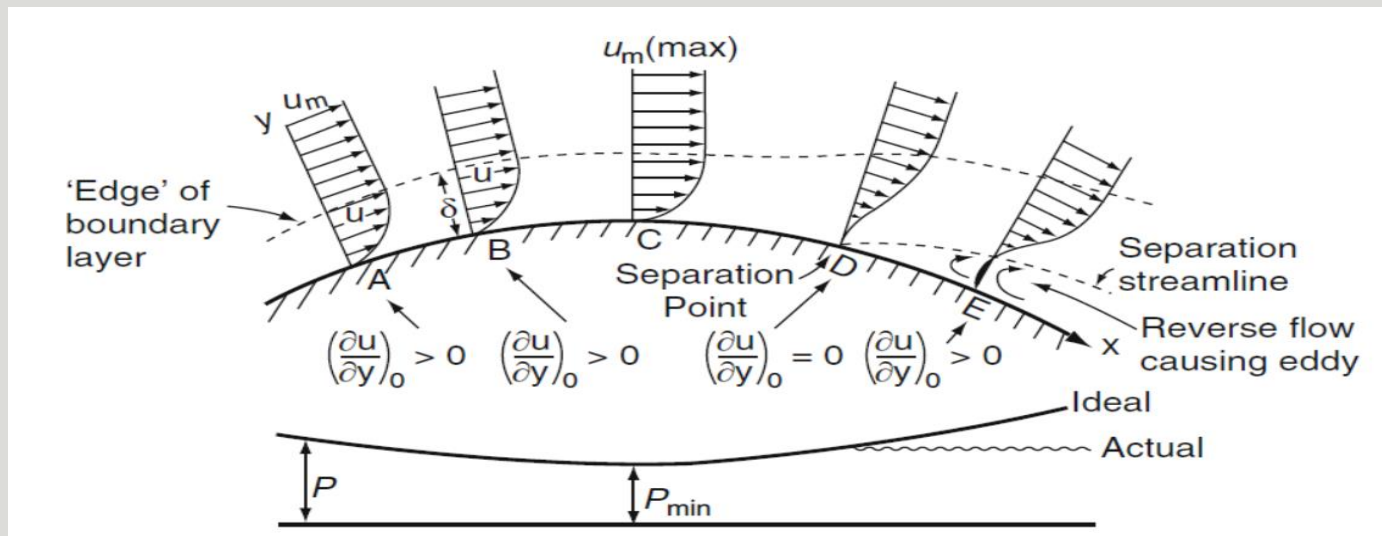


FIG.1 : MÉCANISME DE SÉPARATION DE LA COUCHE LIMITE SUR UNE SURFACE COURBE

- Le graphique illustre la relation entre le coefficient de traînée (C_D) et le nombre de Reynolds (Re) pour une sphère lisse, représentant les balles de sport courantes. À un Re critique d'environ $3,85 \times 10^5$, le C_D diminue brusquement lorsque la couche limite devient turbulente, réduisant la traînée de pression. Au-delà de ce point, une légère augmentation de C_D est observée à mesure que la couche limite devient plus épaisse. Une fois la turbulence établie, C_D reste constant autour de 0,2. Ces données sont essentielles pour comprendre l'aérodynamique des balles de sport, en mettant en évidence l'importance de la transition et de l'épaississement de la couche limite.

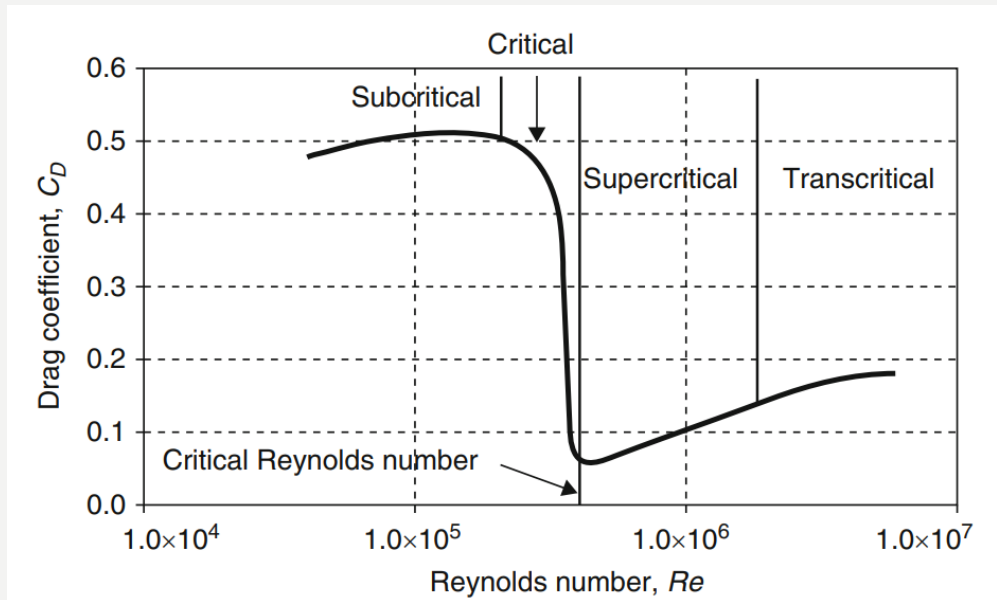
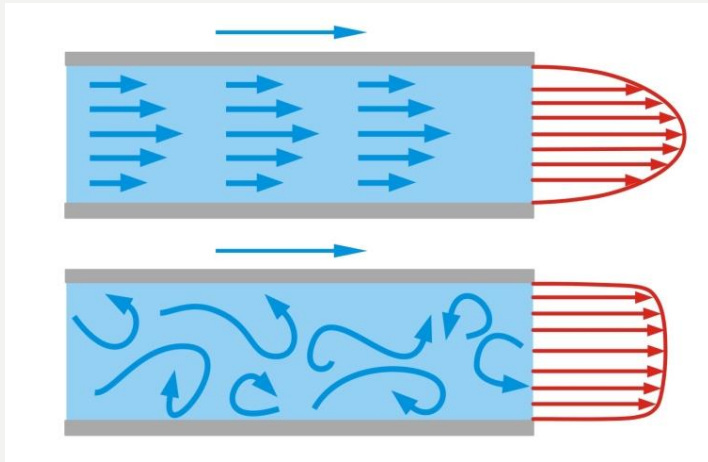


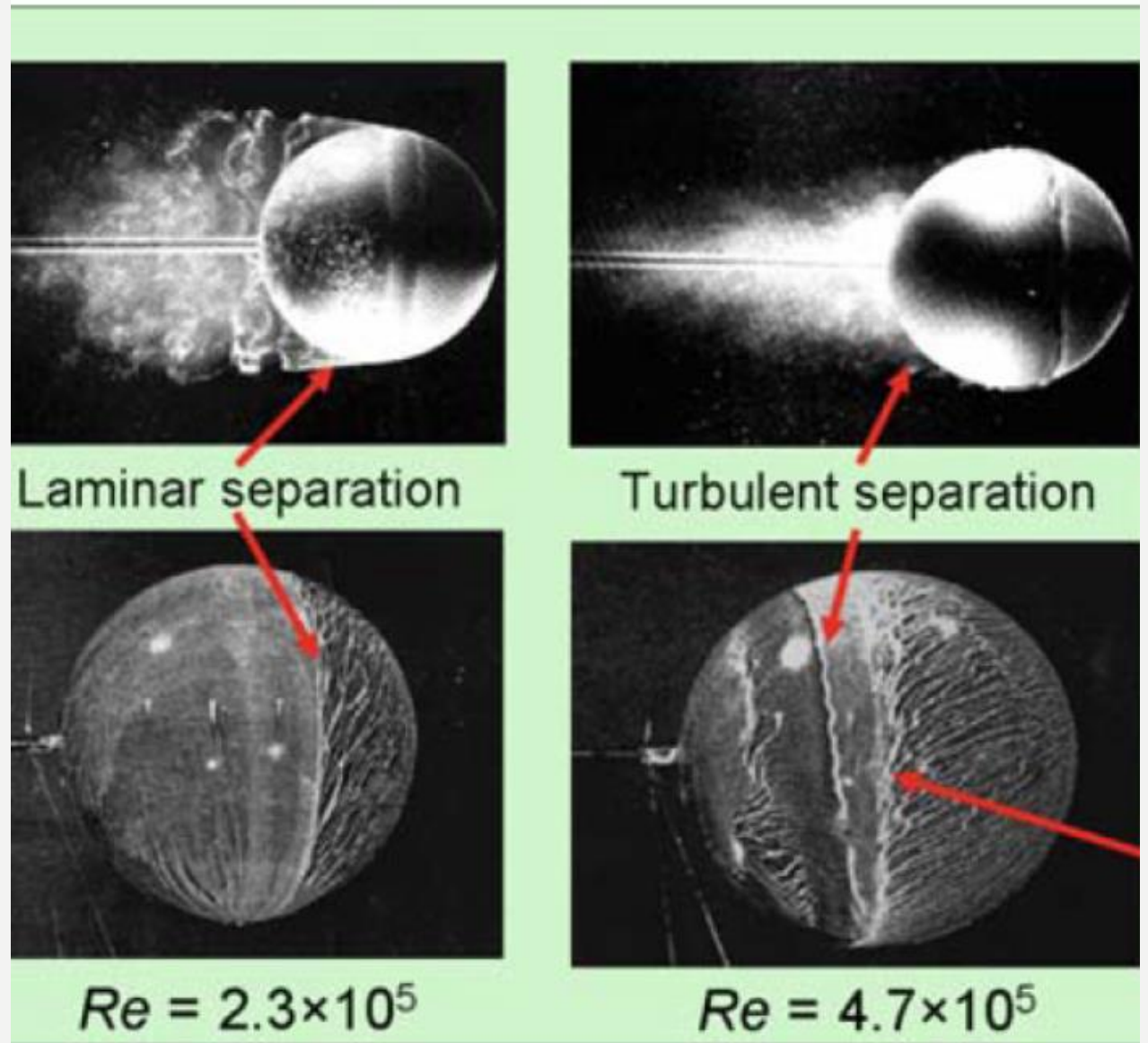
FIG .2 C_D VS Re POUR UNE SPHÈRE LISSE

**FIG. 3 : VISUALISATION
DE LA SÉPARATION DE LA
COUCHE LIMITE POUR UN
ÉCOULEMENT LAMINAIRE
ET POUR UN ÉCOULEMENT
TURBULENT**

LAMINAIRE



TURBULENT



VALIDATION PAR EXPÉRIENCE

Soufflerie



Fils de laine

Ballon

Laminaire



Turbulent

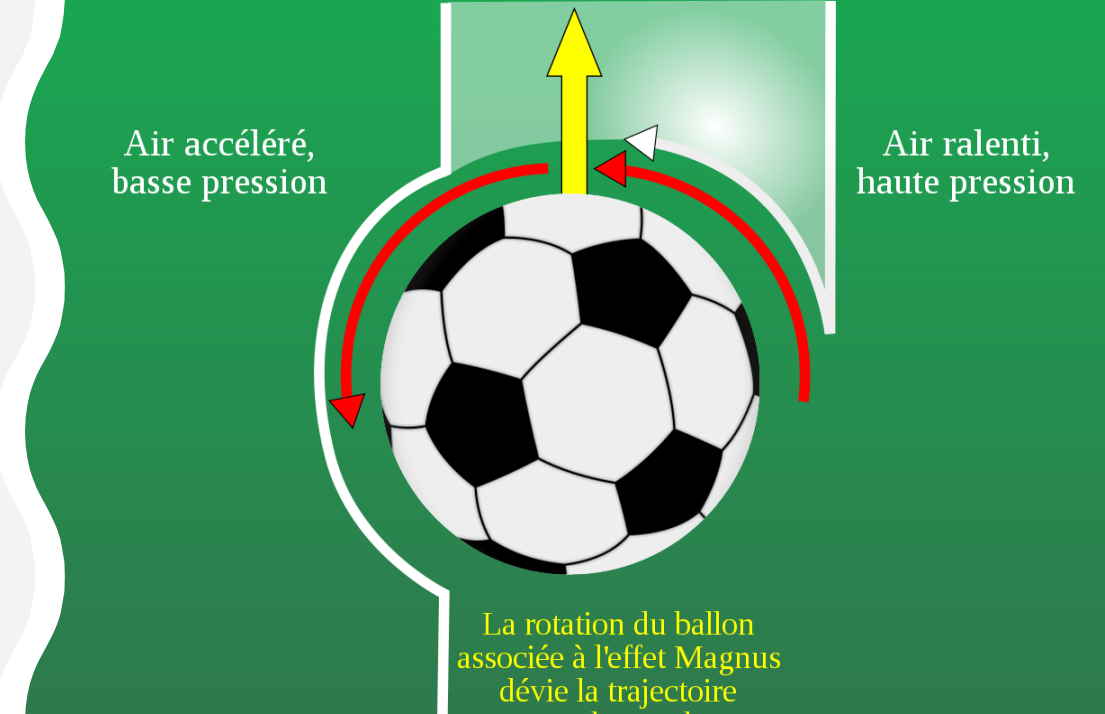


RÉSULTATS

- **Écoulement laminaire** : Les fils de laine seront tirés lisses contre la surface du ballon, suivant les contours sans se s'éloigner ni tourbillonner.
- **Écoulement turbulent** : Les fils de laine commenceront à se détacher de la surface et à tourbillonner, indiquant une séparation de l'écoulement.

EFFET MAGNUS

- L'effet donné à un ballon de football est dû à sa rotation sur lui-même. Lorsque l'objet tourne autour d'un axe perpendiculaire à son déplacement dans un fluide, une moitié de sa surface tourne dans la direction du déplacement tandis que l'autre moitié tourne en sens inverse. La friction entre le ballon et l'air entraîne l'air à tourner de la même manière autour du ballon.



DÉMONSTRATION THÉORIQUE

Principe de Bernoulli : dans un fluide s'écoulant horizontalement, la pression du fluide aux points où sa vitesse est élevée, est plus faible que la pression du fluide aux points où sa vitesse est plus faible.

Equation de Bernoulli

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z + p = Cte$$

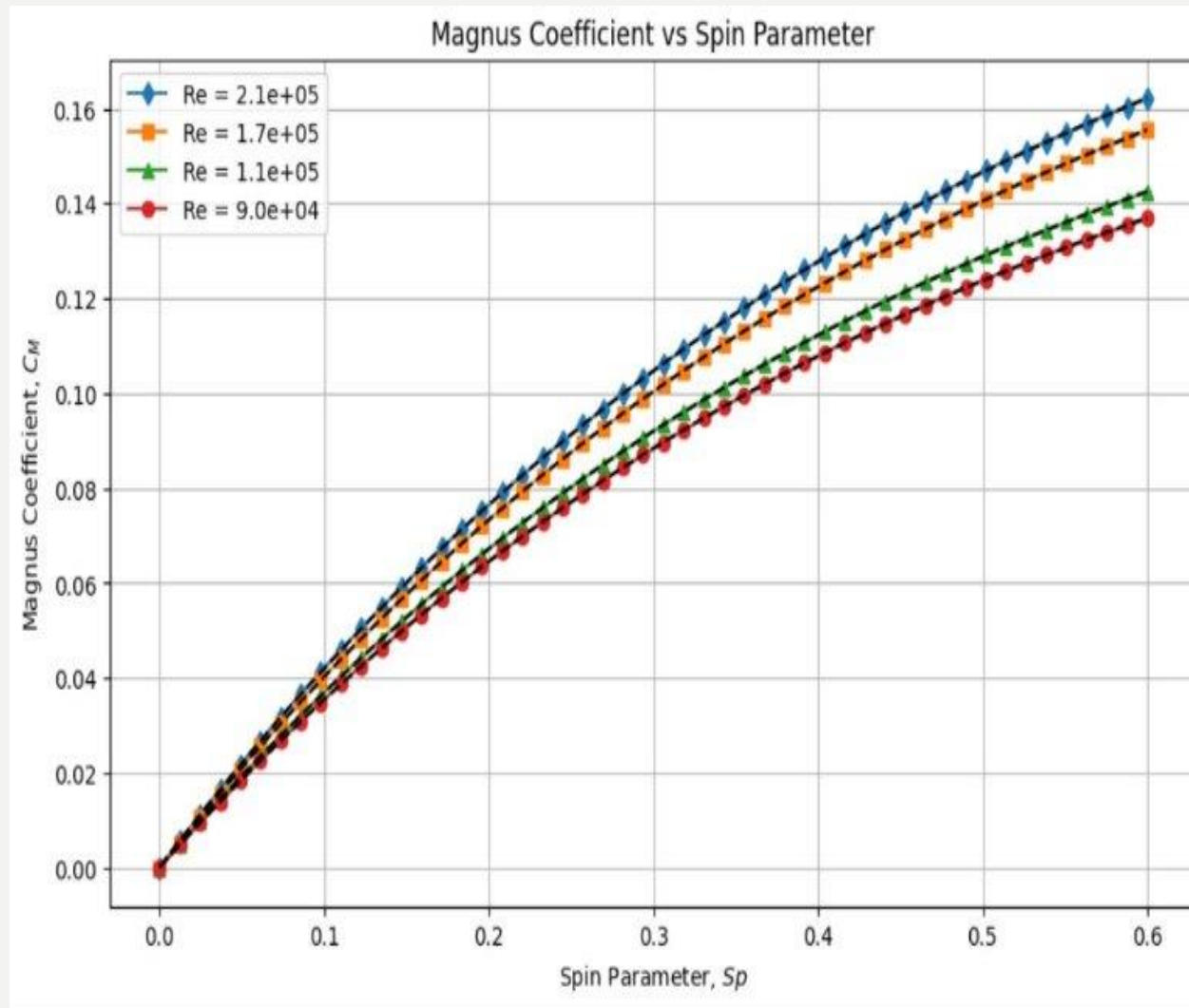


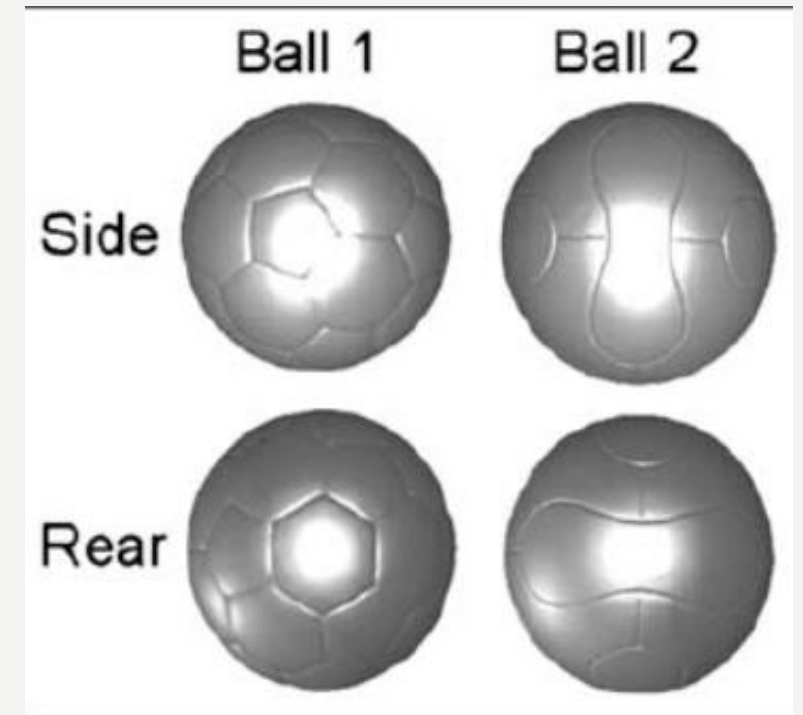
FIG.4 : COEFFICIENT DE MAGNUS EN FONCTION DU SPIN

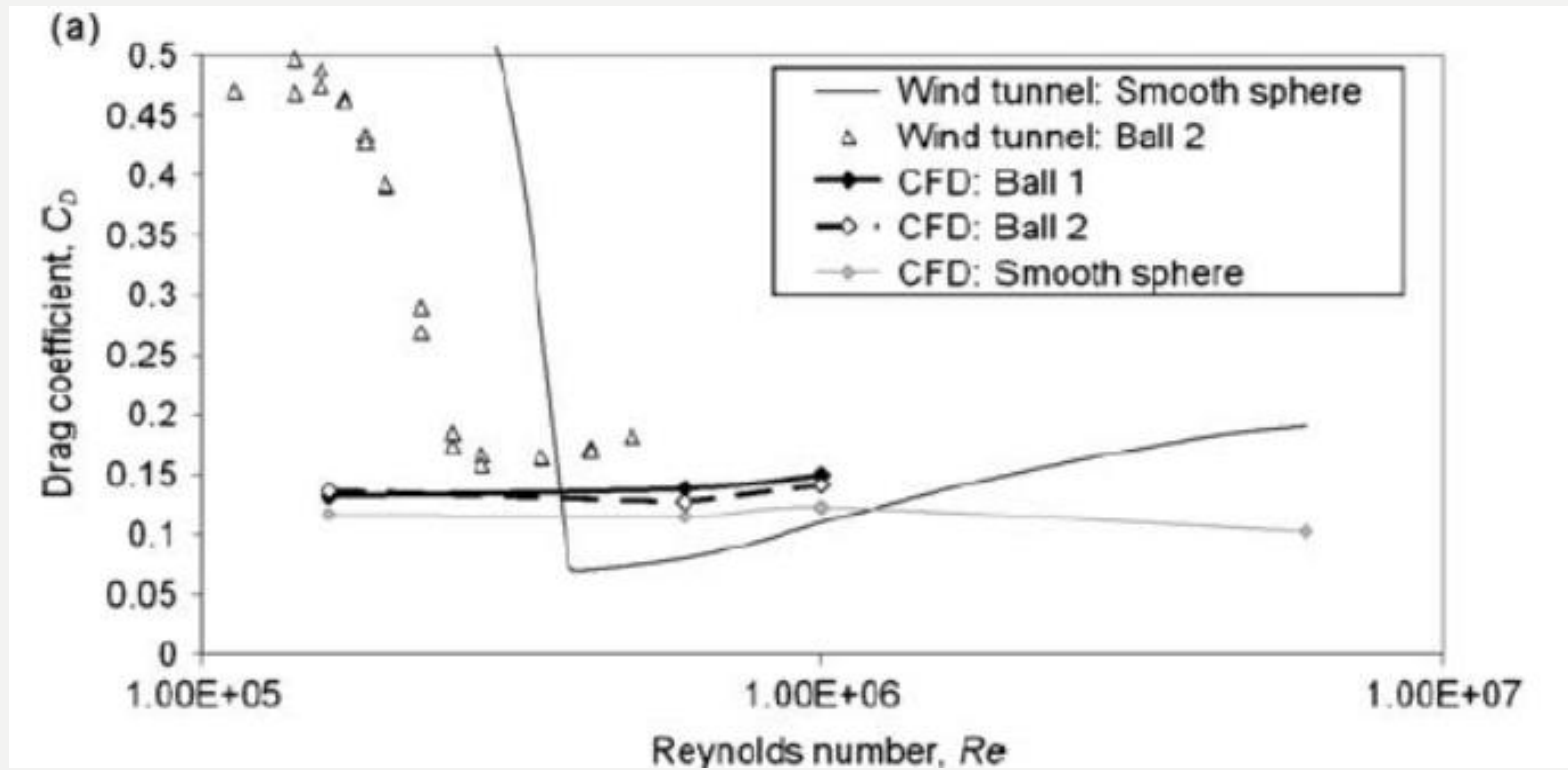
MESURES ET ANALYSES À L'AIDE DE **LA SIMULATION CFD**

SIMULATION CFD AVEC ANSYS FLUENT

Les balles étudiées étaient les suivantes (définies pour chaque balle à 0 degré dans la Fig.5) :

- Balle 1 : 32 panneaux, 20 pentagonaux et 12 hexagonaux, cousus à la main de manière traditionnelle (par exemple, l'adidas Fevertova).
- Balle 2 : 14 panneaux pré-courbés, assemblés par thermosoudage (par exemple, l'adidas Teamgeist, ballon de la Coupe du Monde 2006).





- Fig. : C_D en fonction de Re pour la balle 1, balle 2, et une balle lisse

RÉSULTATS

Comme prévu, le CD est plus élevé que pour une sphère lisse en raison des coutures.

Balle 1 :

Traînée (CD) : Plus élevé en raison des nombreuses coutures.

Caractéristiques de l'écoulement : La présence de nombreuses coutures augmente la traînée mais peut stabiliser la trajectoire.

Balle 2 :

Traînée (CD) : Moins élevé que la Balle 1, environ 6% inférieur en raison de la diminution de la traînée de pression et de frottement de peau avec des coutures plus petites et moins nombreuses.

Caractéristiques de l'écoulement : Moins de coutures et une conception plus lisse qui réduit la traînée tout en maintenant la stabilité de l'écoulement.

EXPÉRIENCE

2 BALLONS CLASSIQUES : 32 PANNEAUX (20 PENTAGONAUX ET 12 HEXAGONAUX) COUSUS À LA MAIN.

BALLON 1



COUTURES MOINS PROFONDES

BALLON 2



COUTURES PLUS PROFONDES

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

- Balles à même pression : 0.8 bar
- Conditions météorologiques stables
- Grosses frappes ($V_i > 20$ m/s) et presque même force donnée à chaque ballon
- Angle de tir pour les deux balles : 0°
- Distance de tir : 25.3 m
- Une trentaine de tentatives de frappes pour chaque balle, avec la lucarne droite comme cible
- Prise en considération des résultats de la moyenne de 10 frappes réussis



RÉSULTATS

	Temps pour atteindre le but (s)	Déviation horizontale par rapport au cible (cm)	Déviation verticale par rapport au cible (cm)
Ballon 1	1.14	37	34
Ballon 2	1.26	68	42



CONCLUSIONS ET DISCUSSION

Pour les résultats de la simulation CFD :

- Les coutures et la conception des panneaux influencent fortement le coefficient de traînée et la stabilité de la trajectoire.
- Une sphère lisse présente la traînée la plus faible mais souffre de problèmes de stabilité et de contrôle, ce qui limite son efficacité dans des conditions de jeu réelles.
- La Balle 2, avec moins de coutures et une conception plus lisse, offre un bon équilibre entre réduction de la traînée et stabilité de la trajectoire, faisant d'elle la plus performante des trois.
- **Performances Globales** : La Balle 2 est plus performante en termes d'efficacité aérodynamique et de cohérence des trajectoires.

Pour les résultats de l'expérience :

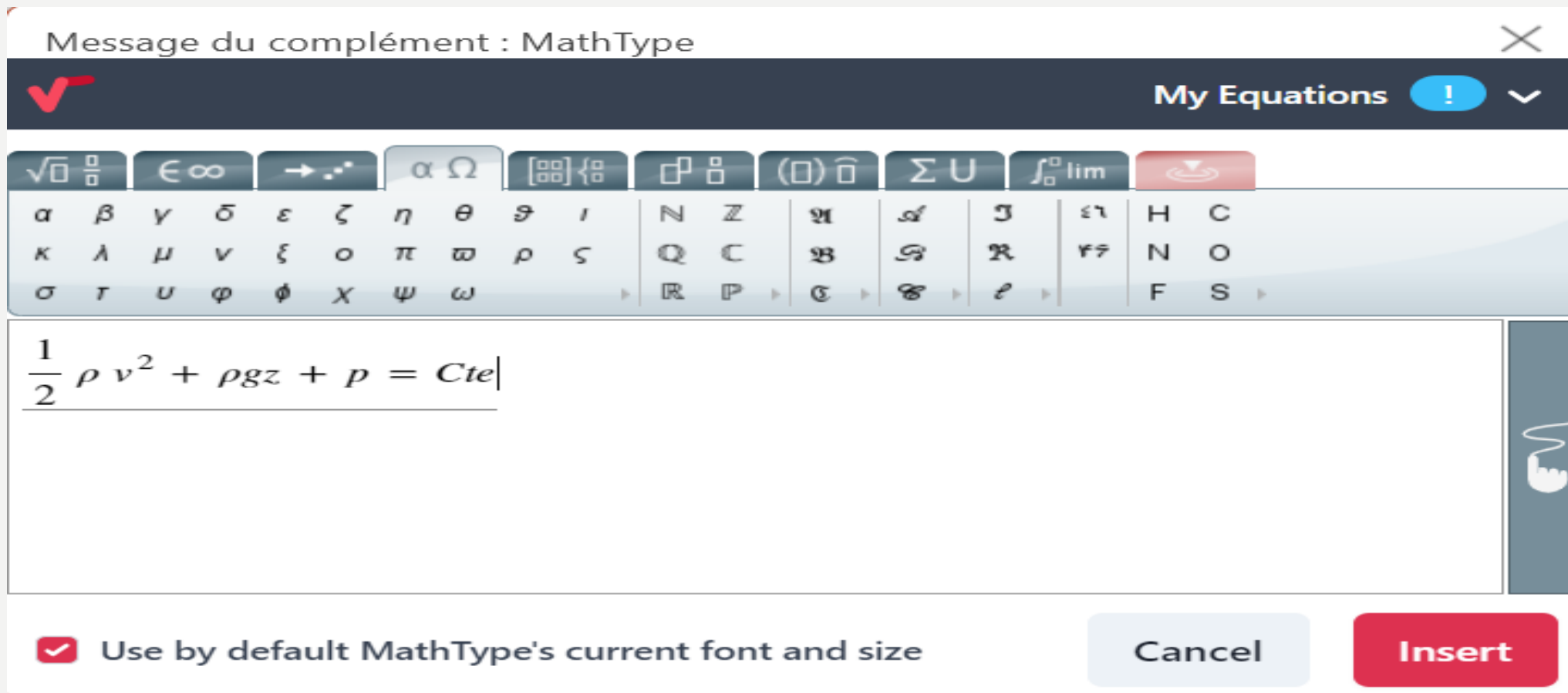
- Le ballon 1 est plus performant que ballon 2, atteignant le but plus rapidement avec des déviations horizontale et verticale inférieures. Cela suggère que les coutures moins profondes de ballon 1 contribuent à une meilleure efficacité aérodynamique et à une trajectoire plus stable.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La conception des balles de football, en particulier le nombre et la profondeur des coutures ainsi que la configuration des panneaux, influence significativement leurs trajectoires. Un équilibre entre la réduction de la traînée et la stabilité en vol est essentiel pour optimiser les performances des balles de football.

ANNEXES

IMPLÉMENTATION DES SYMBOLES À L'AIDE DE MATHTYPE



CODES PYTHON

SIMULATION : MÉTHODE DE RUNGE-KUTTA

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Constantes physiques
g = 9.81 # Accélération due à la gravité (m/s^2)
rho = 1.225 # Densité de l'air (kg/m^3)
C_d = 0.47 # Coefficient de traînée pour une sphère
r = 0.11 # Rayon du ballon de foot (m)
A = np.pi * r**2 # Surface frontale du ballon (m^2)
m = 0.43 # Masse du ballon de foot (kg)
k = 0.5 * rho * C_d * A / m

# Conditions initiales
v_y0 = 10.0 # Vitesse initiale verticale (m/s)
y0 = 0.0 # Position initiale (m)
t_max = 2.0 # Temps maximum (s)
dt = 0.01 # Pas de temps (s)

def dv_y_dt(v_y):
    return -g - k * v_y**2

def dy_dt(v_y):
    return v_y

def runge_kutta_4th_order(v_y0, y0, t_max, dt):
    t = np.arange(0, t_max, dt)
    v_y = np.zeros_like(t)
    y = np.zeros_like(t)

    v_y[0] = v_y0
    y[0] = y0
```

```
    for i in range(1, len(t)):
        k1_vy = dv_y_dt(v_y[i-1])
        k1_y = dy_dt(v_y[i-1])

        k2_vy = dv_y_dt(v_y[i-1] + 0.5 * dt * k1_vy)
        k2_y = dy_dt(v_y[i-1] + 0.5 * dt * k1_y)
        (variable) k3_y: Any
        k3_y = dy_dt(v_y[i-1] + 0.5 * dt * k2_y)

        k4_vy = dv_y_dt(v_y[i-1] + dt * k3_vy)
        k4_y = dy_dt(v_y[i-1] + dt * k3_y)

        v_y[i] = v_y[i-1] + (dt / 6.0) * (k1_vy + 2*k2_vy + 2*k3_vy + k4_vy)
        y[i] = y[i-1] + (dt / 6.0) * (k1_y + 2*k2_y + 2*k3_y + k4_y)

    return t, v_y, y

t, v_y, y = runge_kutta_4th_order(v_y0, y0, t_max, dt)

plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.subplot(1, 2, 1)
plt.plot(t, v_y)
plt.xlabel('temps (s)')
plt.ylabel('Vy (m/s)')
plt.title('vy = f(t)')

plt.subplot(1, 2, 2)
plt.plot(t, y)
plt.xlabel('temps (s)')
plt.ylabel('y (m)')
plt.title('y = f(t)')

plt.tight_layout()
plt.show()
```

CODES PYTHON

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# Définir les paramètres
Re_values = [2.1e5, 1.7e5, 1.1e5, 0.9e5]
Sp = np.linspace(0, 0.6, 50)

# Modèle simplifié pour le coefficient de Magnus sans bruit
def magnus_coefficient(Sp, Re):
    return 0.2 * (1 - np.exp(-2 * Sp)) * (Re / 1e5)**0.2

# Tracés
plt.figure(figsize=(10, 6))

markers = ['d', 's', '^', 'o']
for i, Re in enumerate(Re_values):
    C_M = magnus_coefficient(Sp, Re)
    plt.plot(Sp, C_M, marker=markers[i], linestyle='--', label=f'Re = {Re:.1e}')

# Ajustement des courbes (polynôme de degré 3)
for Re in Re_values:
    C_M = magnus_coefficient(Sp, Re)
    z = np.polyfit(Sp, C_M, 3)
    p = np.poly1d(z)
    plt.plot(Sp, p(Sp), "k--")

# Étiquettes et légendes
plt.xlabel('Spin Parameter, $Sp$')
plt.ylabel('Magnus Coefficient, $C_M$')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.title('Magnus Coefficient vs Spin Parameter')
plt.show()
```

DÉMONSTRATION DU PRINCIPE DE BERNOULLI

Pour démontrer le principe de Bernoulli, considérons un petit volume de fluide se déplaçant le long d'une ligne de courant. Appliquons le théorème de l'énergie mécanique à ce volume de fluide.

La première loi de la thermodynamique pour un fluide incompressible et non visqueux peut être écrite sous la forme suivante, en négligeant les transferts de chaleur et les travaux autres que ceux dus à la pression :

Travail des forces de pression + Variation d'énergie cinétique + Variation d'énergie potentielle = 0

-Le travail effectué par les forces de pression lorsque le fluide se déplace d'un point 1 à un point 2 le long de la ligne de courant est donné par : $\delta W = P_1 dV - P_2 dV$

-La variation de l'énergie cinétique par unité de volume est : $\Delta E_{cinétique} = \frac{1}{2} \rho v_2^2 - \frac{1}{2} \rho v_1^2$

-La variation de l'énergie potentielle gravitationnelle par unité de volume est : $\Delta E_{potentielle} = \rho g h_2 - \rho g h_1$

En combinant ces expressions, et en divisant par dV , on obtient : $\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 + P_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + P_2$

D'où le principe de Bernoulli : $\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z + p = Cte$