

# *Rapport*

## *Bloc mécanique des fluides*

### *Etude de l'écoulement autour d'un cylindre*

Réalisé par,  
**Badr MOUFAD, Zoubir MOUSTATIA**

Enseignant,  
**Emmanuel CIEREN**

EMINES-School of Industrial Manangement,  
UM6P

Lien du code,  
<https://github.com/Badr-MOUFAD/fluid-mechanics-project>

Lien des simulations,  
<https://drive.google.com/drive/folders/...>

Le 9 Mai 2021

---

## **1. Introduction**

Dans le cadre de la mise en application des concepts de la mécanique des fluides on étudie dans ce qui suit le cas d'un cylindre émergé dans un fluide doté d'une vitesse initiale. On s'intéressera particulièrement à l'impact du nombre de Reynolds sur le type d'écoulement ainsi que sur d'autres paramètres caractérisant cet écoulement comme la portance, la trainée et le nombre de Strouhal.

Chaque étude sera accompagnée d'une visualisation des résultats ainsi que comparaison avec des données expérimentales.

## **2. Description des différents régimes d'écoulement**

### **2.1 Nombre de Reynolds**

Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimension utilisé afin de caractériser les régimes d'écoulements. Il peut être calculer en utilisant la relation:

$$Re = \frac{UL}{\mu}$$

Avec:

$U$ : La vitesse initiale du fluide

$L$ : La longueur caractéristique de notre cylindre dans ce cas le diamètre

$\mu$ : La viscosité du fluide

Afin d'étudier l'impact de nombre de Reynolds sur le régime d'écoulement il est nécessaire de faire varier ce dernier et visualiser l'effet sur les champs de vitesse du fluide. Pour ce faire On estime qu'il sera plus judicieux de faire varier la viscosité. Cela s'explique par le fait q une variation de la vitesse initiale impliquera un ajustement du pas de temps et une variation de la longueur caractéristique du cylindre nécessitera une redéfinition du maillage utilisé. Pour ces raisons il sera plus facile de varier le nombre de Reynolds en variant la viscosité du fluide utilisé.

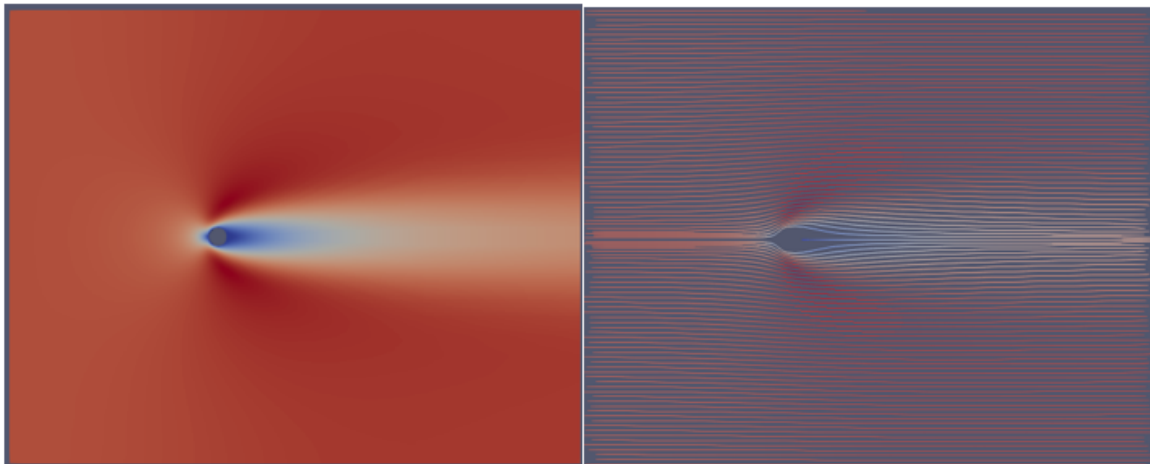
Dans tout ce qui suit la vitesse initiale sera fixé à  $U_0 = 5$  m/s et la longueur caractéristique du fluide à  $L = 2$  m. La valeur de la viscosité changera selon le nombre de Reynolds désiré.

### 2.2 Régime d'écoulement

En réalisant plusieurs simulations nous avons pu distinguer 3 régimes d'écoulement distincts. Dans ce qui suit nous allons présenter la visualisation des lignes de du champs de vitesse pour chacun des régimes. On s'intéressera à la frame de seconde 25 de notre simulation pour garantir le fait que nous soyons arrivés au régime permanent. Les simulations complètes peuvent être retrouve grâce à [ce lien](#)

#### 2.2.1 Régime laminaire

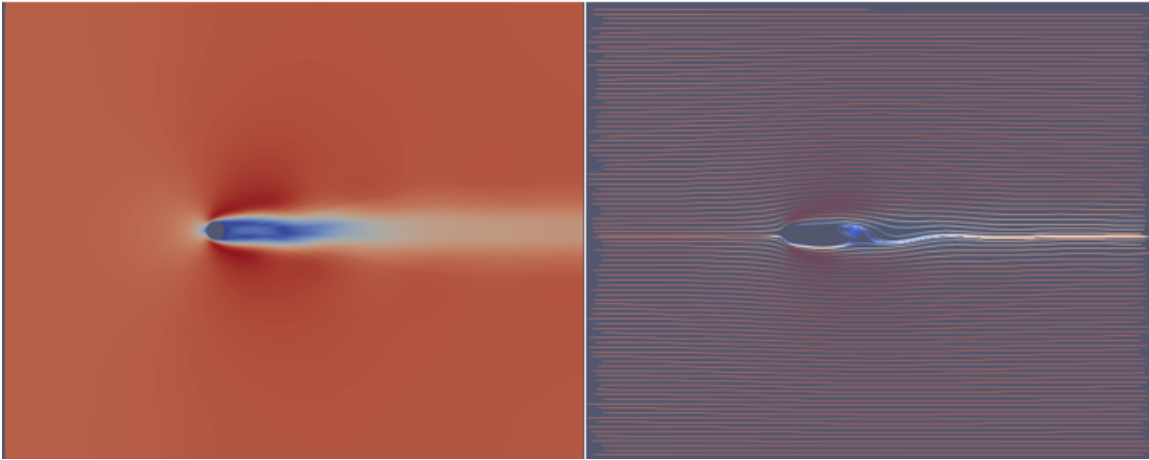
Dans le cas du régime permanent on constate que les ligne de courant reste parfaitement droite sans aucune perturbation. D'après nos simulations ce régime était verifié pour des valeur du nombre de Reynolds compris entre 10 et 100.



**Fig. 1.** Visualisation de la vitesse et des lignes de courant pour  $R_e = 10$

### 2.2.2 Régime transitoire

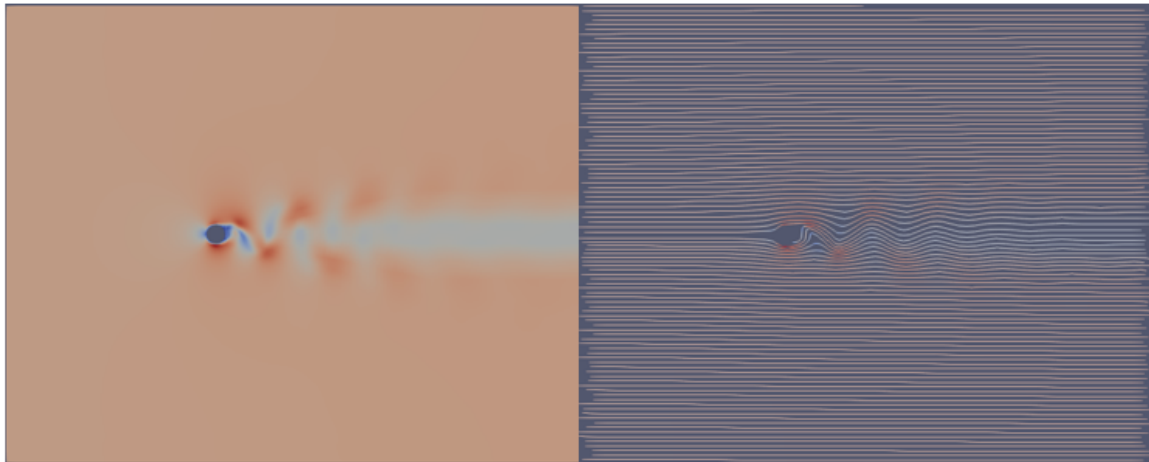
Pour ce qui est du régime transitoire on remarque l'apparition de perturbation à proximité du corps suivi d'un tourbillonnement qui éventuellement se transformera en turbulence pour des nombre de Reynolds un peu plus élevé. Bien que ce régime est très bref dans (il n'est vérifié que pour un nombre limité de valeur de Reynolds) on a constaté qu'il était vérifié pour des valeurs allant de 100 à 140



**Fig. 2.** Visualisation de la vitesse et des lignes de courant pour  $Re = 100$

### 2.2.3 Régime turbulent

Dans le cas du régime turbulent on constate clairement l'apparition d'ondulation au niveau des lignes de courant à partir du moment où on dépasse le cylindre. Ce régime est vérifié au-delà d'un nombre de Reynolds de 140.



**Fig. 3.** Visualisation de la vitesse et des lignes de courant pour  $Re = 5000$

### 3. Caractérisation de l'écoulement par les coefficients de trainé et de portance

#### 3.1 Définition

Les coefficients de trainé ( $C_d$ ) et de portance ( $C_l$ ) sont des nombres sans dimension qui quantifient respectivement les forces horizontales et verticales auxquelles le cylindre est assujéti. Ils sont calculés par l'intermédiaire des relations suivantes :

$$C_d = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad C_l = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho V^2 S}$$

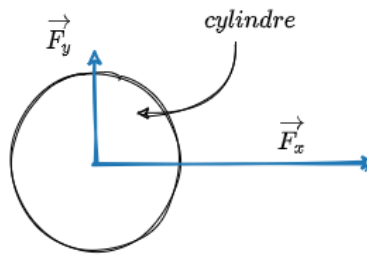
Avec :

$F_x, F_y$  sont respectivement les forces horizontales et verticale

$\rho$  la masse volumique du fluide

$U$  la vitesse caractéristique

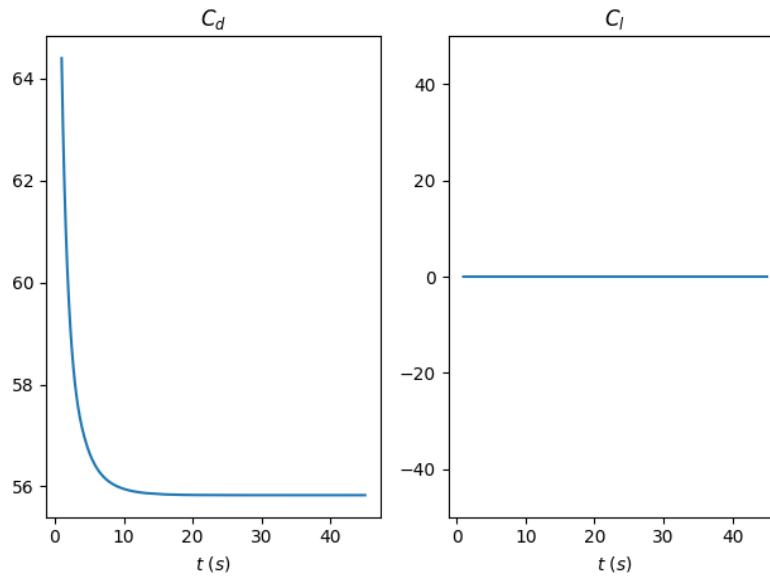
$S$  la surface caractéristique



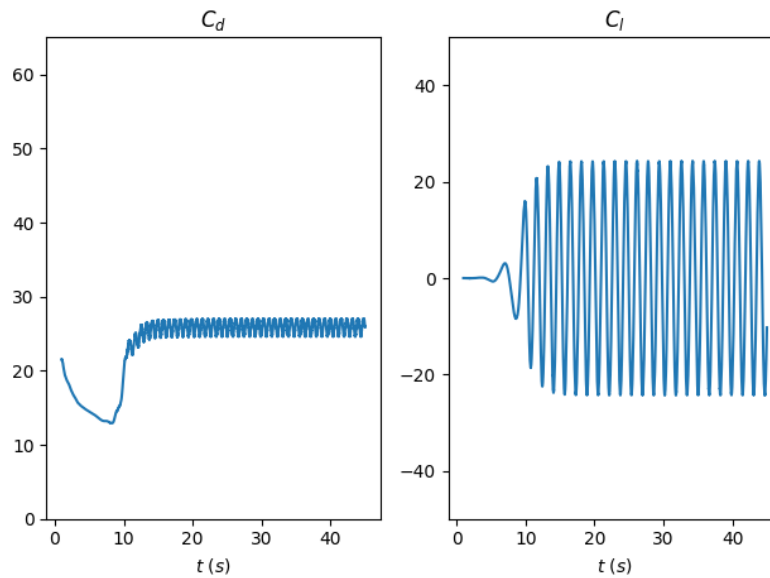
**Fig. 4.** Schéma représentant les résultantes des forces sur le cylindre  
(les longueurs des flèches ont un objectif illustratif et donc été prises arbitrairement)

#### 3.2 Evolution de $C_d$ et $C_l$ en fonction du nombre de $Re$

L'objectif dans cette partie est de tracer l'évolution de  $C_d$  et  $C_l$  en fonction du nombre de  $Re$ . On trace tout d'abord l'évolution temporelle de ces deux coefficients pour un nombre de  $Re$  particulier.



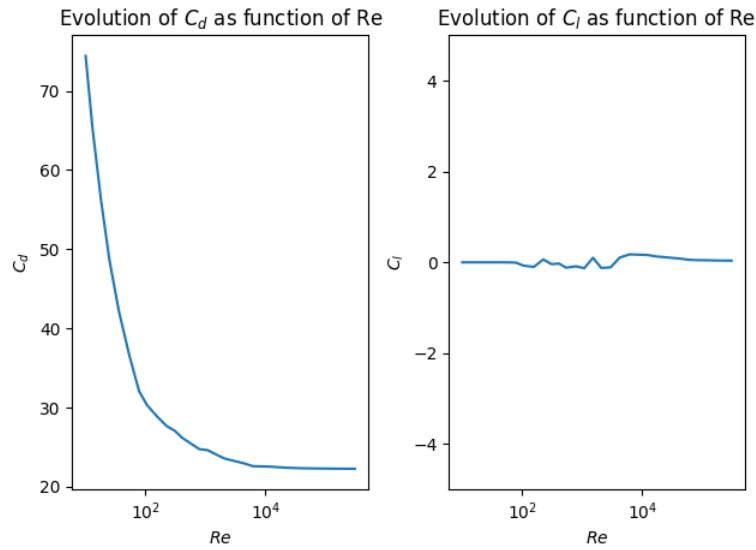
**Fig. 5.** Evolution cas laminaire  $Re = 18$



**Fig. 6.** Evolution cas turbulent  $Re = 2090$

**NB:** Nous avons réalisé une simulation des évolutions temporelles de  $C_d$  et  $C_l$  en fonction du nombre de  $Re$ . Veuillez vous référer au drive pour la visionner.

Hormis l'écoulement laminaire, on remarque que les deux coefficients n'ont pas une valeur constante au cours de la simulation. Ainsi pour parvenir à tracer l'évolution des deux coefficients en fonction du nombre de  $Re$ , il est nécessaire de calculer une moyenne temporelle sur la durée de la simulation, plus précisément au niveau du régime permanent. Cela étant fait, on réussit à tracer les graphes suivants :



**Fig. 7.** Evolution de  $C_d$  et  $C_l$  en fonction du nombre de  $Re$

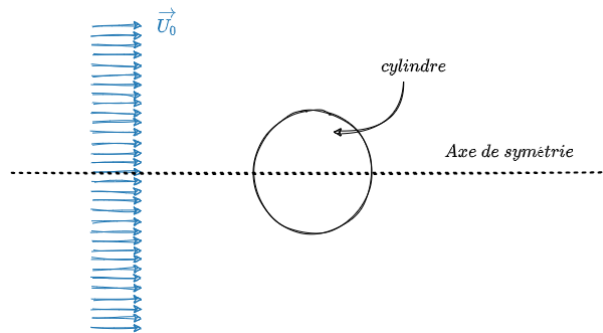
### 3.3 Discussion des résultats de $C_l$

D'après le graphe précédent, on note que la valeur de  $C_l$  reste relativement nulle quel que soit la valeur du nombre de  $Re$ . Ceci signifie qu'on pratique la résultante des forces verticales reste en moyenne nulle peu importe la valeur du nombre de  $Re$ .

Cette observation peut être justifiée par deux arguments.

#### Argument physique :

A l'instant initial, le système est symétrique par rapport à l'axe horizontal en raison de la symétrie du cylindre et du champ de vitesse initial (voir le graphe ci-dessous). Donc il n'y a aucune raison qui va pousser le cylindre à décoller ou atterrir. D'où le fait que la moyenne de  $C_l$  soit nulle.



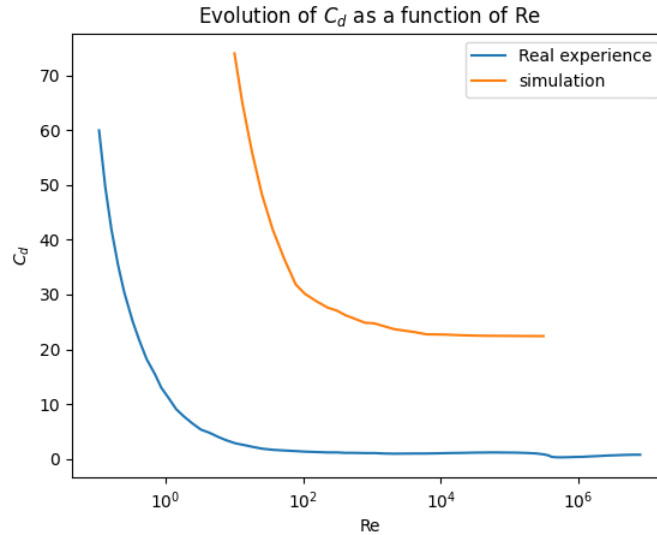
**Fig. 8.** Schéma de la situation initiale du cylindre

#### Argument mathématique :

On remarque que l'évolution de  $C_l$  dans le temps possède une allure qui oscille autour de 0 (voir le graphe ci-dessus). Donc il est clair qu'on aura une moyenne nulle car les termes positifs vont annuler les termes négatifs.

### 3.4 Discussion des résultats de $C_d$

On remarque pour des nombres de  $Re < 10^2$   $C_d$  décroît rapidement à la manière d'une décroissance exponentielle. En contre partie pour des  $Re > 10^2$  les  $C_d$  reste constant. Pour mieux appréhender la situation, on propose de tracer dans le même graphique les résultats de  $C_d$  issus de la simulation et de l'expérience.



**Fig. 9.** Comparaison des évolutions de  $C_d$  en fonction du nombre de  $Re$  dans le cas de la simulation et de l'expérience

Vue de loin, on observe que les deux graphes ont relativement la même allure. En effet, la courbe de simulation est équivalente à une translation suivante l'axe  $x$  et l'axe  $y$  de la courbe expérimentale.

On note aussi que les deux courbes ont une partie décroissante et partie constante, ce qui nous laisse penser à un régime transitoire (1<sup>ère</sup> phase) et régime permanent (2<sup>ème</sup> phase).

Bien que la courbe issue de la simulation ait l'air d'être comme la courbe expérimentale, il est clair que les valeurs de deux courbes restent radicalement différentes. Pour expliquer la différence précédente entre expérience et simulation nous avons émis comme hypothèse le fait que ces écarts sont dus à la finesse du maillage utilisé.

Néanmoins, même si on raffine davantage le maillage adopté on aboutit aux mêmes résultats. En conséquence, les raisons des écarts entre expérience et simulation restent toujours inconnues.

## 4. Caractérisation de l'écoulement par le nombre de Strouhal

Notre objectif dans cette dernière partie est de tracer l'évolution du nombre de Strouhal ( $S_t$ ) en fonction de nombre de  $Re$ . Mais avant de se pencher sur cela, commençons par une définition et interprétation du nombre de  $S_t$ .

### 4.1 Définition

"Le nombre de Strouhal est un nombre sans dimension décrivant les mécanismes de circulation oscillante" (d'après Wikipédia). Il est calculé par la relation suivante

$$S_t = f \frac{L}{U}$$

Remarquons qu'elle fait intervenir un terme  $f$  lié à la fréquence d'oscillation (fréquence dominante), un terme  $L$  représentant la longueur caractéristique de l'objet et un autre terme  $U$  liée à la vitesse caractéristique de l'écoulement.

## 4.2 Interprétation du nombre de $S_t$

On peut réarranger l'expression de  $S_t$  de sorte à faire apparaître des temps caractéristiques

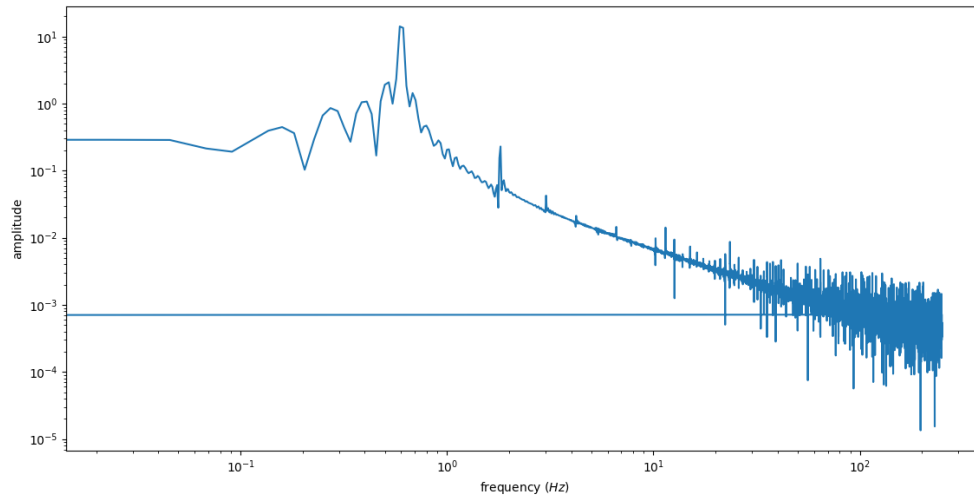
$$S_t = f \frac{L}{U} = \frac{1}{T} \underbrace{\frac{L}{U}}_{\text{temps caractéristique}} = \frac{\tau}{T}$$

Tel que  $\tau$  est le temps caractéristique de l'écoulement et  $T$  la période des oscillations

Dans le cas où  $S_t \ll 1$  on aura  $\tau \ll T$ , ceci signifie qu'on doit attendre longtemps pour entrer dans une phase oscillante du système et donc on peut admettre que le système soit stationnaire. Dans le cas contraire où  $S_t \gg 1$  (c'est-à-dire  $\tau \gg T$ ) le système entrera rapidement dans une phase oscillante.

## 4.3 Méthode de calcul de $S_t$

D'après l'expression de  $S_t$ , il est perceptible qu'on a besoin que de déterminer la fréquence dominante des oscillations pour calculer le nombre de  $S_t$  pour une valeur prédéfini du nombre de  $Re$ . Pour se faire, on réalise une **transformé de Fourier** du coefficient de portance ( $C_l$ ). La fréquence d'oscillation correspondra à la fréquence ayant l'amplitude maximal.



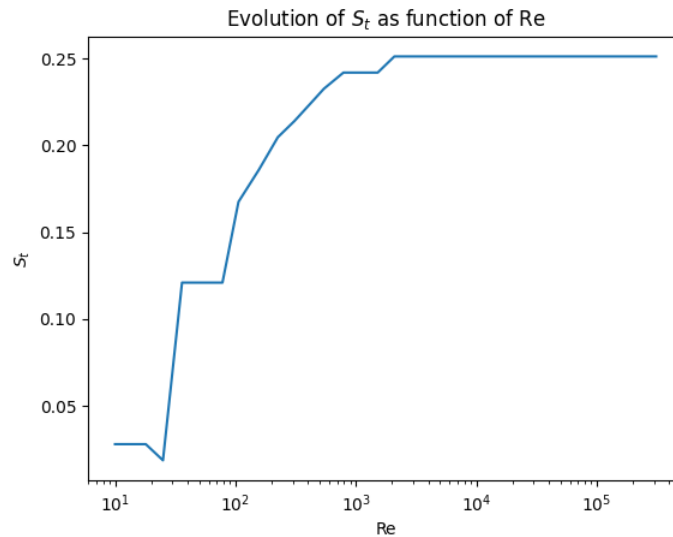
**Fig. 10.** Spectre du coefficient  $C_l$  pour un nombre de  $Re = 1090$

D'après la figure ci-dessus, on voit que la fréquence ayant l'amplitude maximal est  $0.6\text{Hz}$

## 4.4 Evolution de $S_t$ en fonction de $Re$

Pour tracer le graphe  $S_t(Re)$ , on répète la procédure précédente pour plusieurs valeurs de  $Re$ . On obtient le graphe suivant





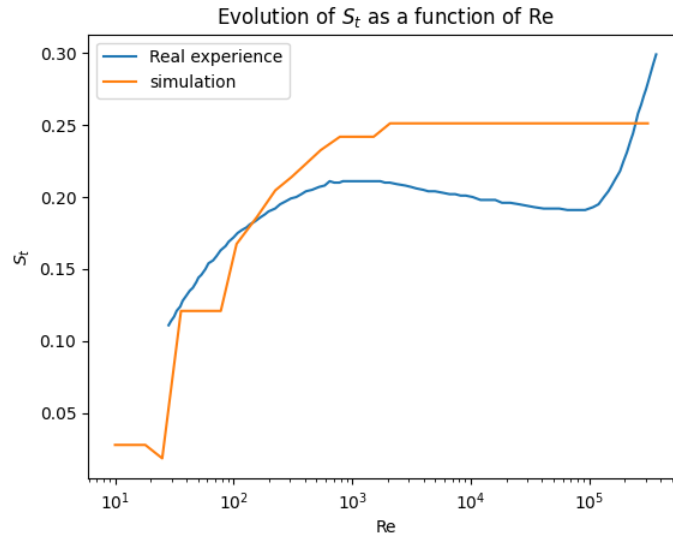
**Fig. 11.** Evolution du nombre de  $S_t$  en fonction du nombre de  $Re$

On distingue de ce graphe deux parties :

- Partie où  $S_t$  croît, ce qui signifie que la fréquence des oscillations croît de son tour
- Partie où  $S_t$  est constante, ce qui veut dire que la fréquence des oscillations reste inchangée même si on augmente le nombre de  $Re$

### 4.5 Comparaison avec les résultats expérimentaux

Pour mieux visualiser la différence entre les résultats de la simulation et les résultats expérimentaux, on trace un graphe dans lequel on représente simultanément les résultats de la simulation (graphe précédent) et les résultats expérimentaux.



**Fig. 12.** évolution de  $S_t$  en fonction de nombre de  $Re$  d'après les résultats de la simulation et les résultats expérimentaux

- Pour  $Re < 10^3$  on note que les courbes ont la même allure ( $S_t$  est croissant)
- Pour  $10^3 < Re < 10^5$  on remarque que la simulation se stabilise alors que  $S_t$  expérimental diminue légèrement
- Au-delà de  $10^5$ , le  $S_t$  expérimental croit exponentiellement alors que le  $S_t$  de la simulation reste toujours constant

Ces différences peuvent être éventuellement dû au fait que lorsqu'on augmente le nombre de  $Re$  les variation des grandeurs devient si intense de sorte que le solveurs utilisé ne parvient pas à les détecter.

## 5. Conclusion

L'étude d'un cylindre émergé dans un fluide qui est un cas relativement simple nous a permis de tirer plusieurs conclusions concernant la mécanique des fluides. Tout d'abord nous avons pu distinguer entre les différents types d'écoulement selon la valeur du nombre de Reynolds. Ensuite nous avons pu conclure que le coefficient de portance est nul vu la symétrie du problème et que le coefficient de traîne ainsi que le nombre de Strouhal passaient respectivement par une phase décroissante, une phase croissante pour un écoulement laminaire puis restaient constant pour un écoulement turbulent.

## 6. Annexe

On présente dans ce tableau l'ensemble des nombres  $Re$  utilisés avec la moyenne des coefficients  $C_d$  et  $C_l$  correspondante et aussi le nombre  $S_t$ .

Pour plus de détail concernant ces valeurs numériques, veuillez vous référer à la [GitHub repository](#).

$Re$	$C_d$	$C_l$	$S_t$
10	74.214516	0.000051	0.027273
13	65.176763	0.000026	0.036364
18	56.137244	0.000013	0.090909
25	48.467482	0.000004	0.109091
36	41.988419	-0.000004	0.118182
54	36.386117	0.000023	0.118182
78	31.948473	-0.005797	0.127273
106	30.214723	-0.074374	0.163636
157	28.784777	-0.101076	0.190909
225	27.634761	0.064127	0.200000
309	27.041980	-0.040683	0.218182
410	26.177393	-0.027028	0.227273
543	25.579376	-0.119292	0.236364
789	24.775314	-0.088929	0.236364
1090	24.644691	-0.130981	0.236364
1520	24.098380	0.102328	0.245455
2090	23.595867	-0.126338	0.245455
2990	23.305857	-0.112136	0.245455
4260	23.025286	0.107721	0.254545
6200	22.641442	0.177815	0.254545
9020	22.610878	0.170542	0.254545
12600	22.572255	0.162299	0.254545
17400	22.499880	0.131006	0.254545
21800	22.453037	0.119711	0.254545
29400	22.414288	0.103589	0.254545
41900	22.376600	0.084573	0.254545
59900	22.362538	0.057906	0.254545
82300	22.348732	0.049385	0.254545
124000	22.331038	0.046756	0.254545
178000	22.323596	0.041057	0.254545
244000	22.316734	0.039541	0.254545
312000	22.314346	0.037790	0.254545