

# ANALYSE PHYSIQUE APPROFONDIE DES VAGUES POUR UNE COMPRÉHENSION AVANCÉE DANS LE MONDE DU SURF

...

EDOUARD Eliott

TIPE : Sport et Jeux | 2024

# LA DISCIPLINE



houle des vagues  
-> déplacement

- Dans les faits :  
se déplacer sur l'eau à l'aide  
d'une planche et de vagues
- Physiquement :  
opposition entre gravité et  
flottabilité des planches



Principales zones de surf :

- Hawaï
- Taiwan
- Nazaré



# **COMMENT LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES VAGUES INFLUENT ELLES SUR LES PERFORMANCES DES SURFEURS ET COMMENT POUVONS NOUS CONCEVOIR DES INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES POUR APPRÉHENDER CES PHÉNOMÈNES COMPLEXES ?**

...

**I-) Regard sur la vague et son influence**

**II-) Analyse des conditions sur la vitesse initiale**

**III-) Analyse de la stabilité du surfeur**

**IV-) Analyse de différents types de planches**

**V-) Conclusion**

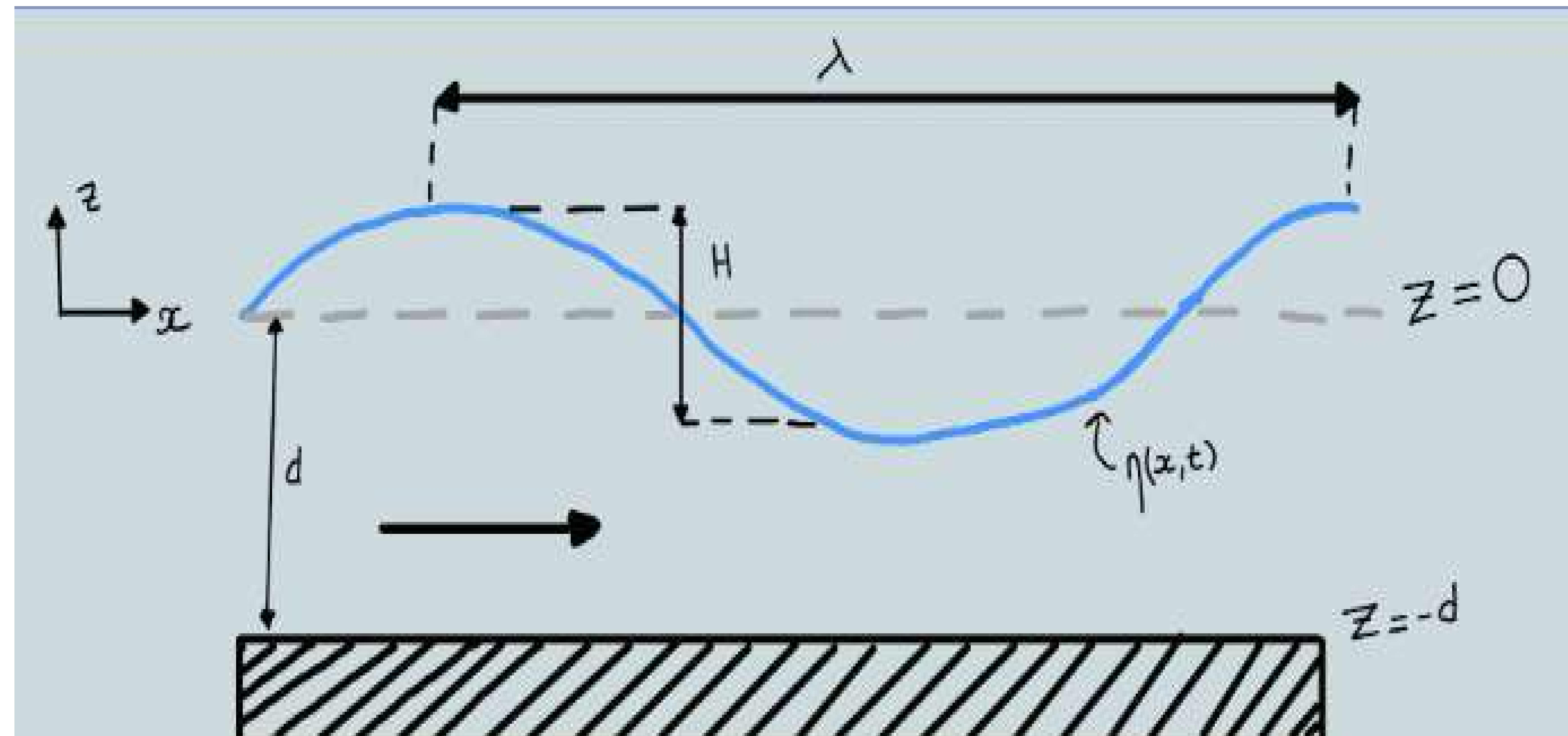
# OBJECTIFS

## Ses objectifs :

- Modéliser le déferlement d'une vague expérimentalement
- Comprendre la formation de déferlantes des vagues
- Comprendre l'influence des vagues
- Caractériser les différents paramètres
- Résoudre une équation différentielle d'ordre deux à l'aide d'un modèle numérique
- Modéliser la propagation des vagues sur python

# LES VAGUES

En principe :

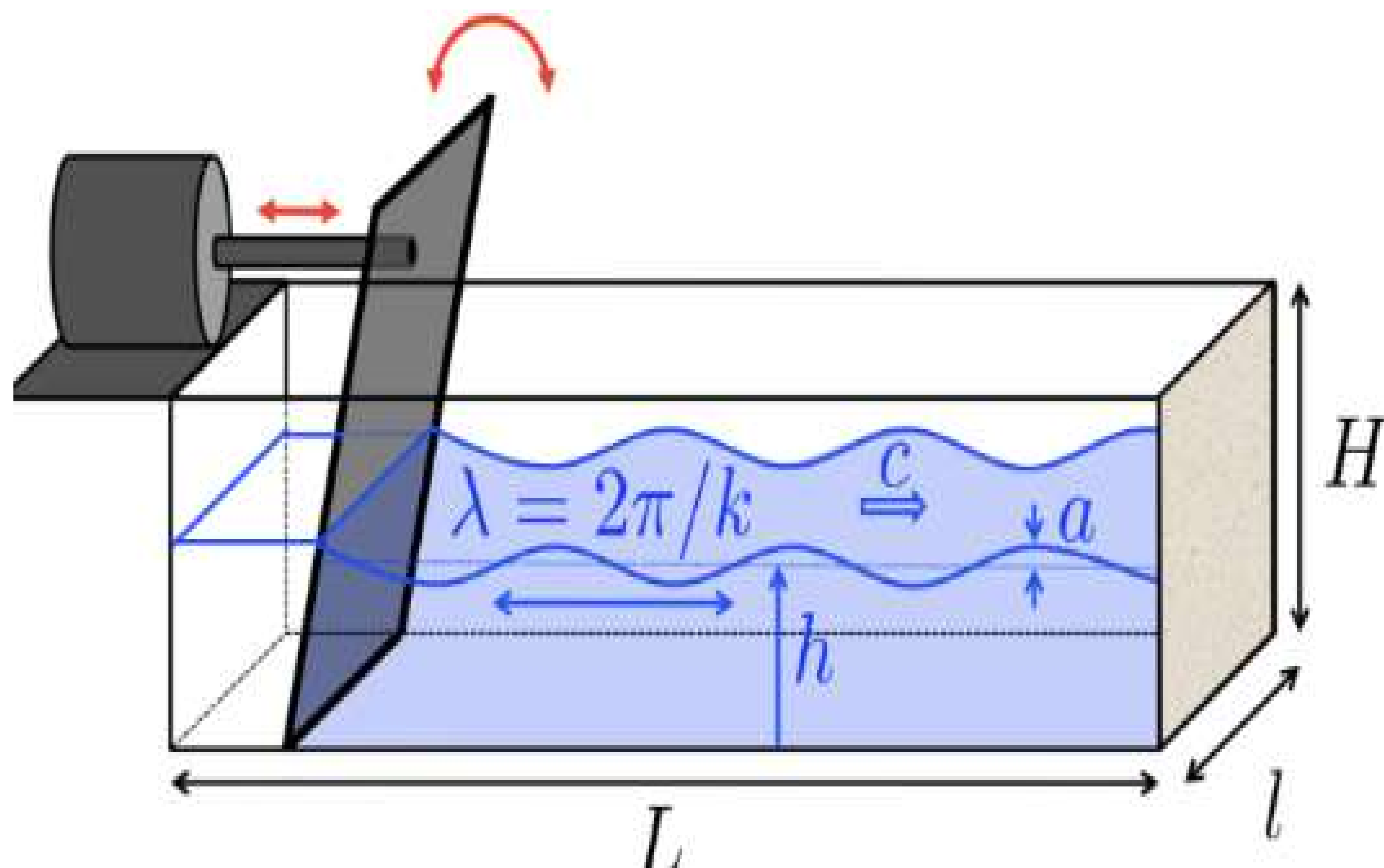


- Caractéristiques des vagues :
- longueur d'onde  $\lambda$
- la hauteur moyenne  $d$
- L'amplitude de la vague  $H/2$
- La hauteur de la vague  $\eta(x,t)$
- Les dimensions de propagation de la vague



# LES VAGUES

Notre modélisation :



Notre système

Houle de Stokes :

- fluide parfait et incompressible
- Ecoulement irrotationnel
- Profondeur d'eau constante
- Vague linéaire (termes non linéaires négligés)

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega^2 = gk \times \tanh(kh) \\ \eta = -\Phi_m \times \frac{\omega}{g} \times \cosh(kh) \sin(kx - \omega t) \end{array} \right.$$

# LES VAGUES

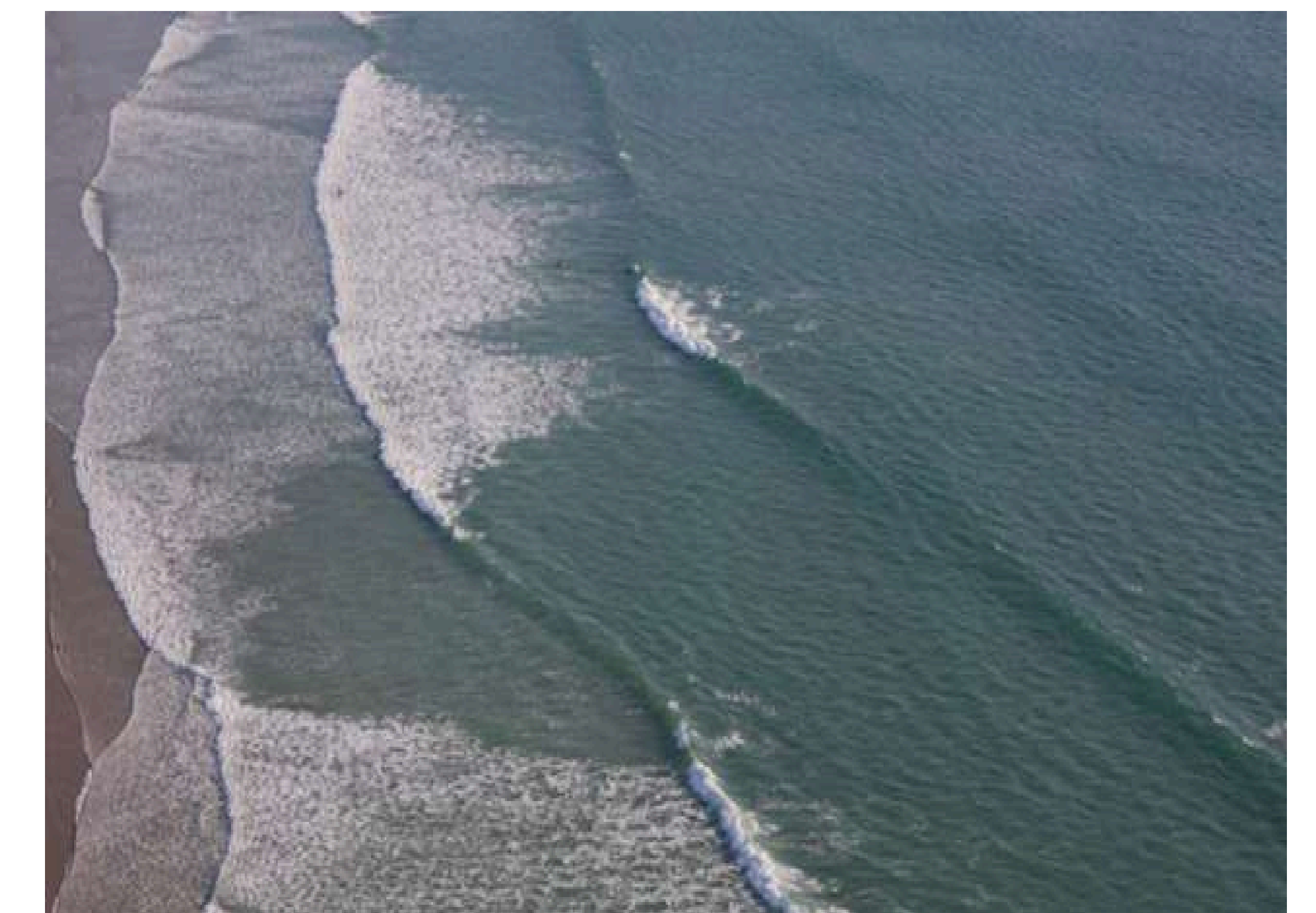
Vagues + importantes : les déferlantes



- Création de rouleaux
- Entraînent le surfeur

C'est la vague que le surfeur cherche!

En méditerranée :  
Houle trop faible  
(3m, 15-20 km/h)



Etude des paramètres à optimiser



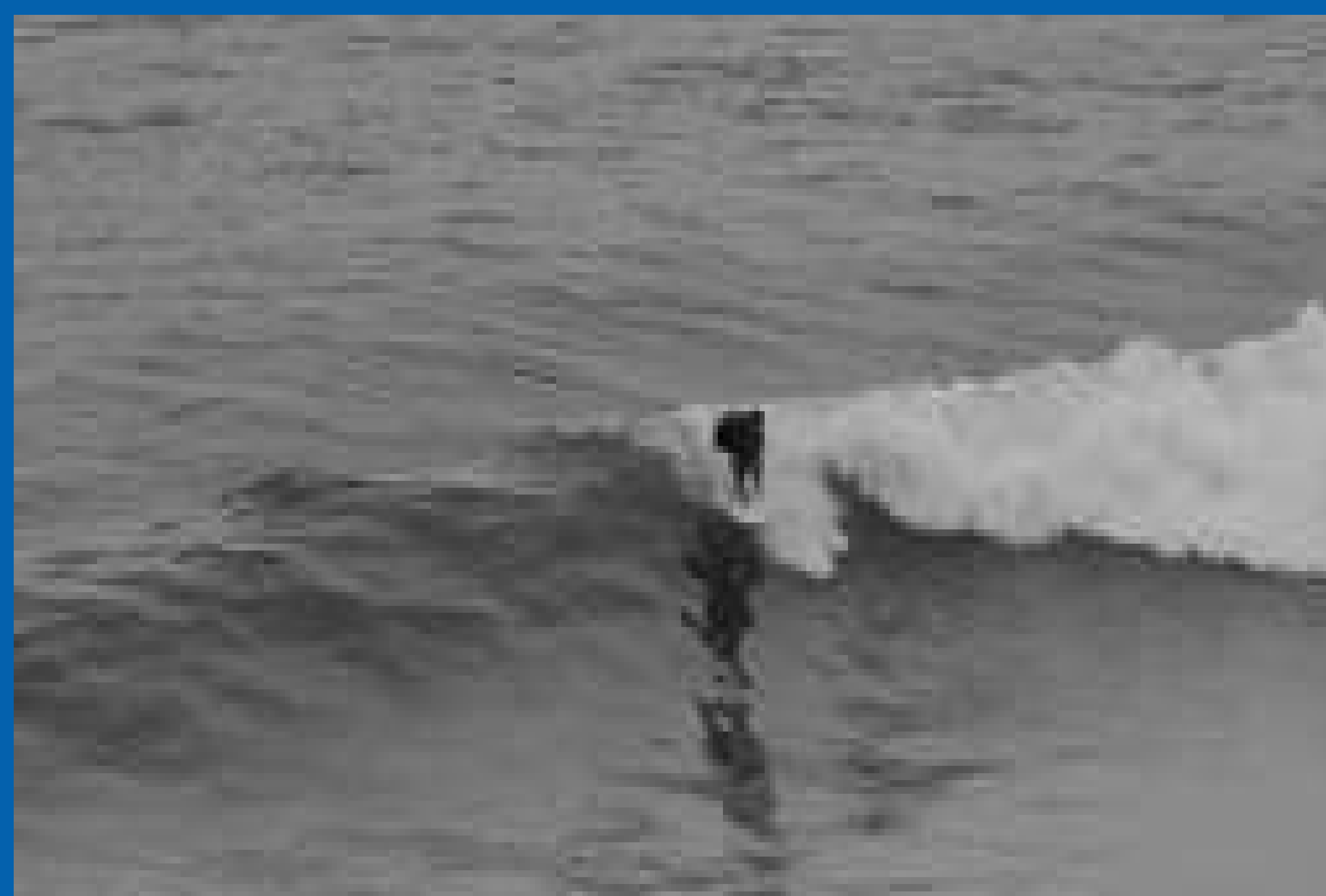
# METHODE



Etape 1 :  
le surfeur nage et  
accélère



Etape 2 :  
le surfeur est pris dans  
la vague



Etape 3 :  
le surfeur se lève  
de sa planche



Etape 4 :  
le surfeur a réussi,  
il peut surfer



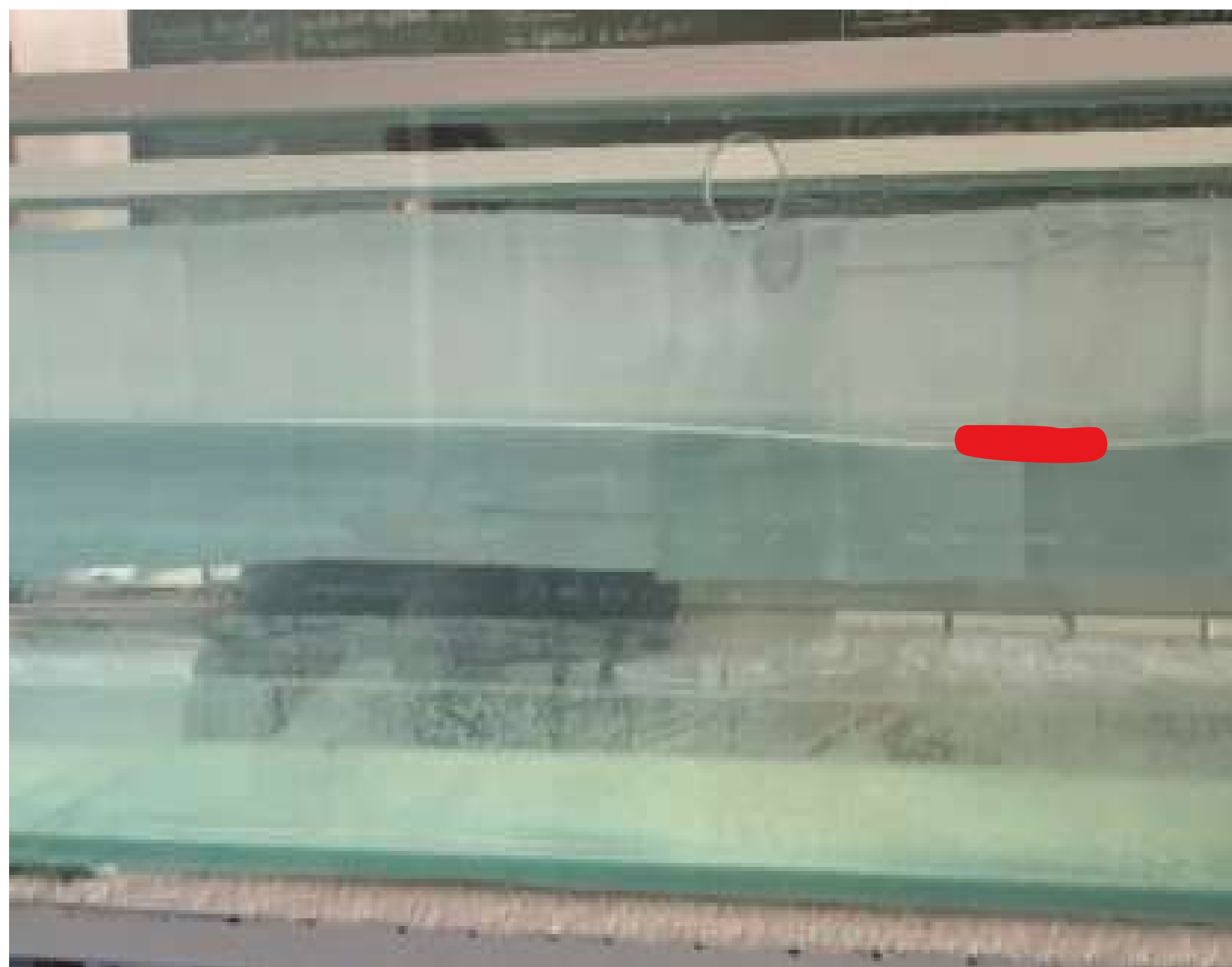
# Analyse des conditions sur la vitesse initiale

cas de surf



la vague a emporté la planche

cas de dérive



la vague n'a pas emporté la planche

On estime que la force de la vague sur la planche doit être supérieure à la force nécessaire à la planche pour s'accélérer à la vitesse de la vague

on obtient :

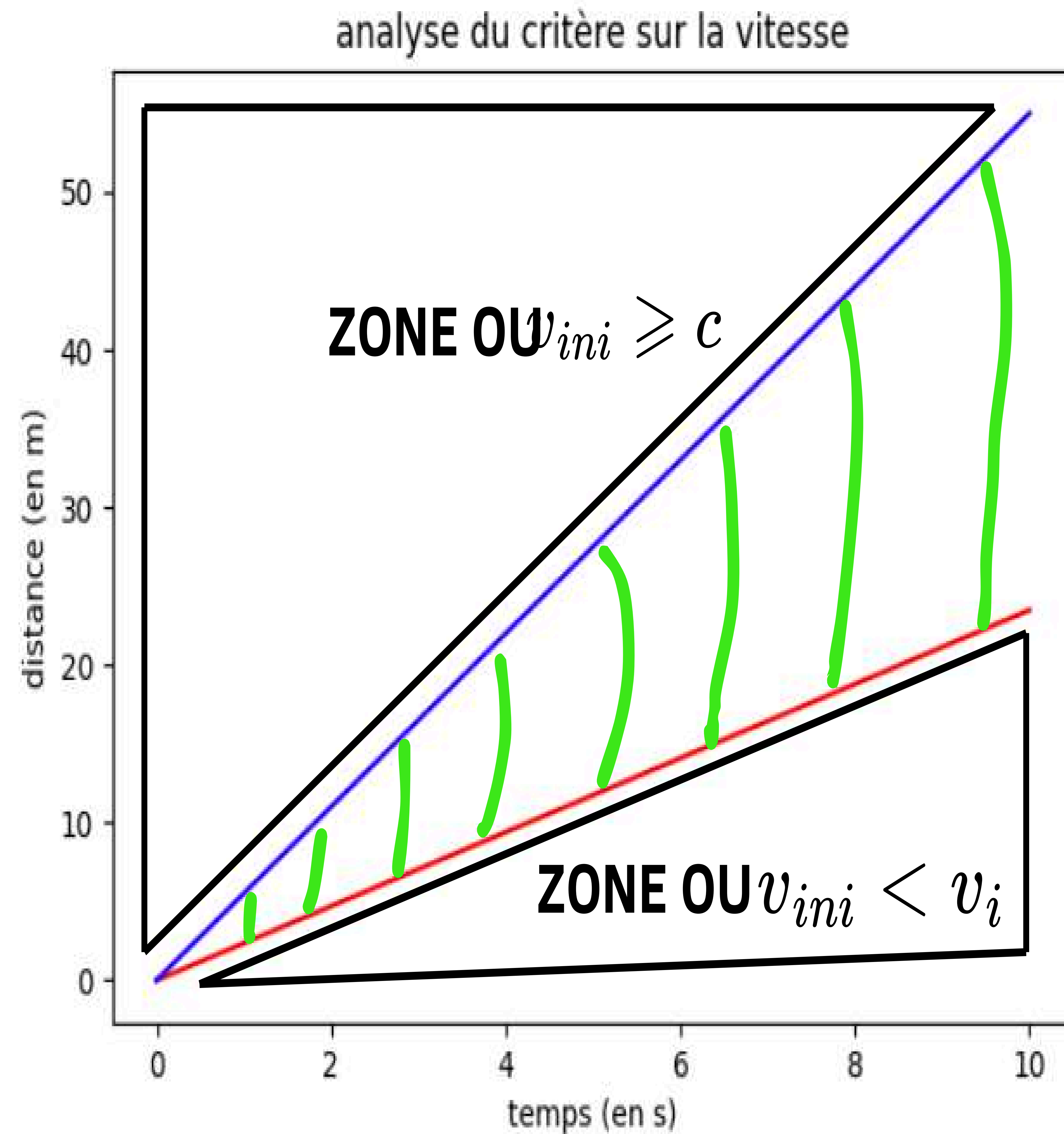
$$v_{ini} > c - \sqrt{\frac{Lg(ak)}{1 - (ak)}} = v_i$$

avec :

$c$  la célérité de la vague  
 $L$  la longueur de la planche  
 $(ak)$  la "pente" de la vague

# Analyse des conditions sur la vitesse initiale

ainsi théoriquement :



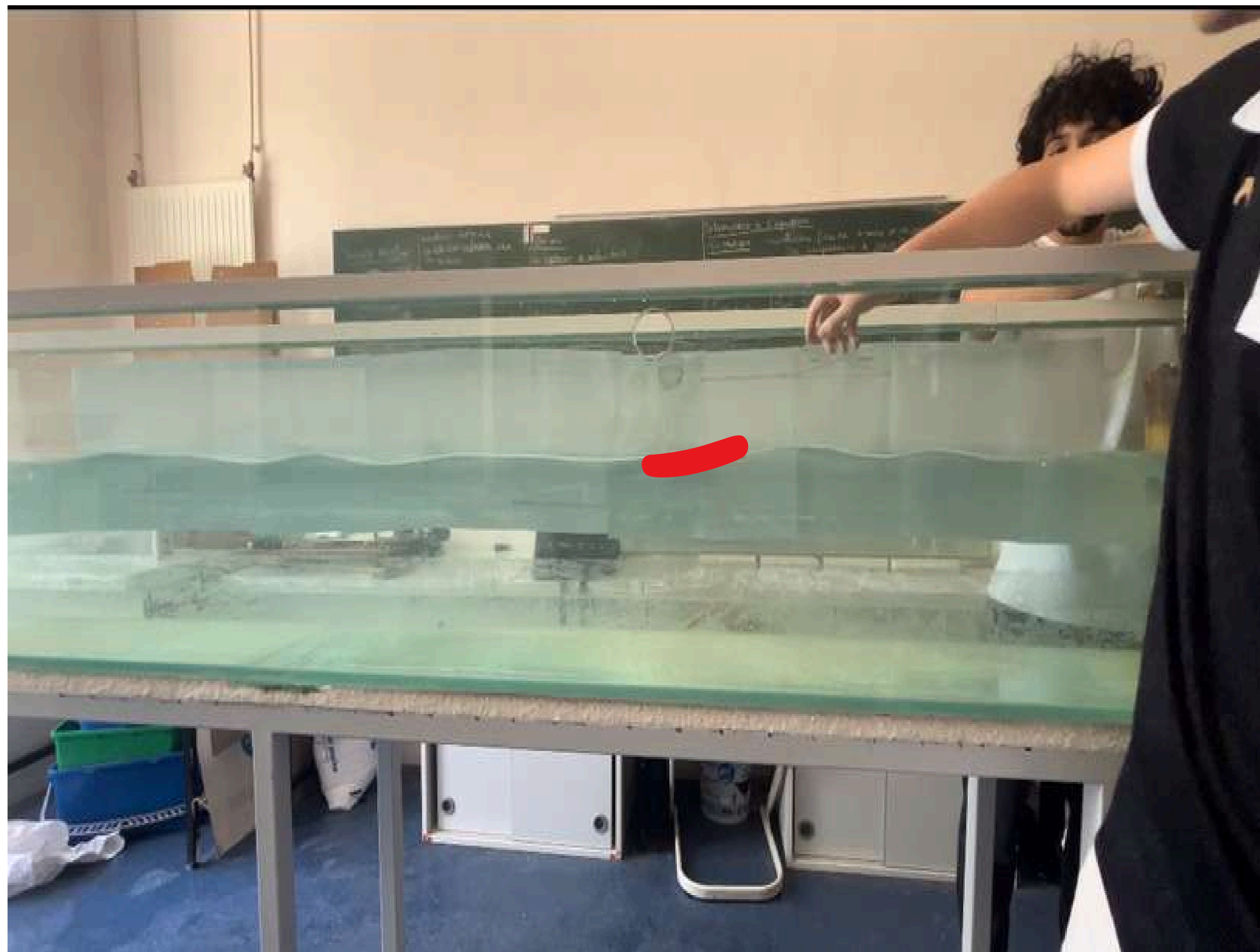
Si  $v_i \geq c$  : la vague n'attrapera jamais le surfeur

Zone recherchée pour nos expériences  
Vitesse entre 5.5m/s et 2.35m/s



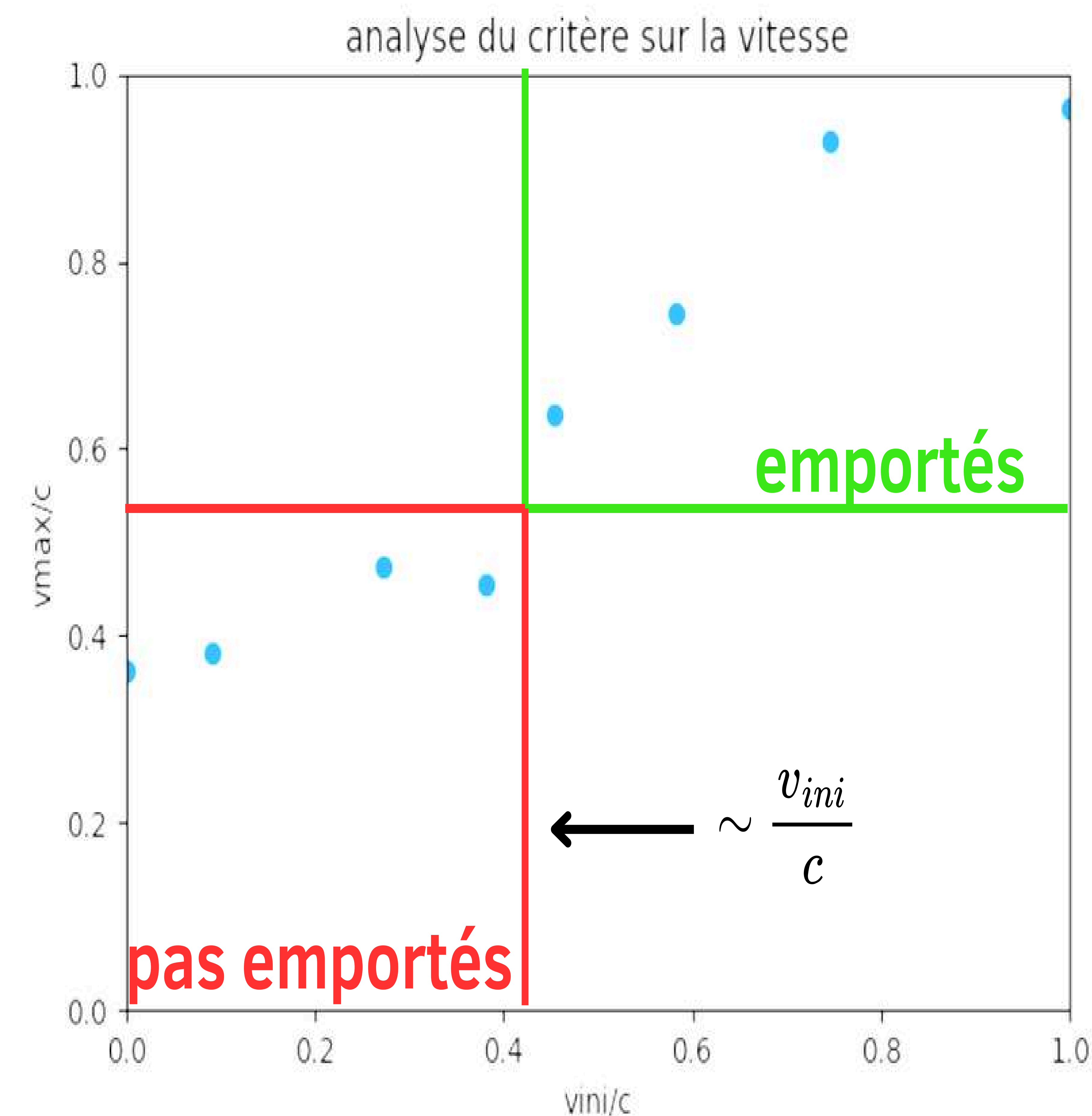
# Analyse des conditions sur la vitesse initiale

Expérience :



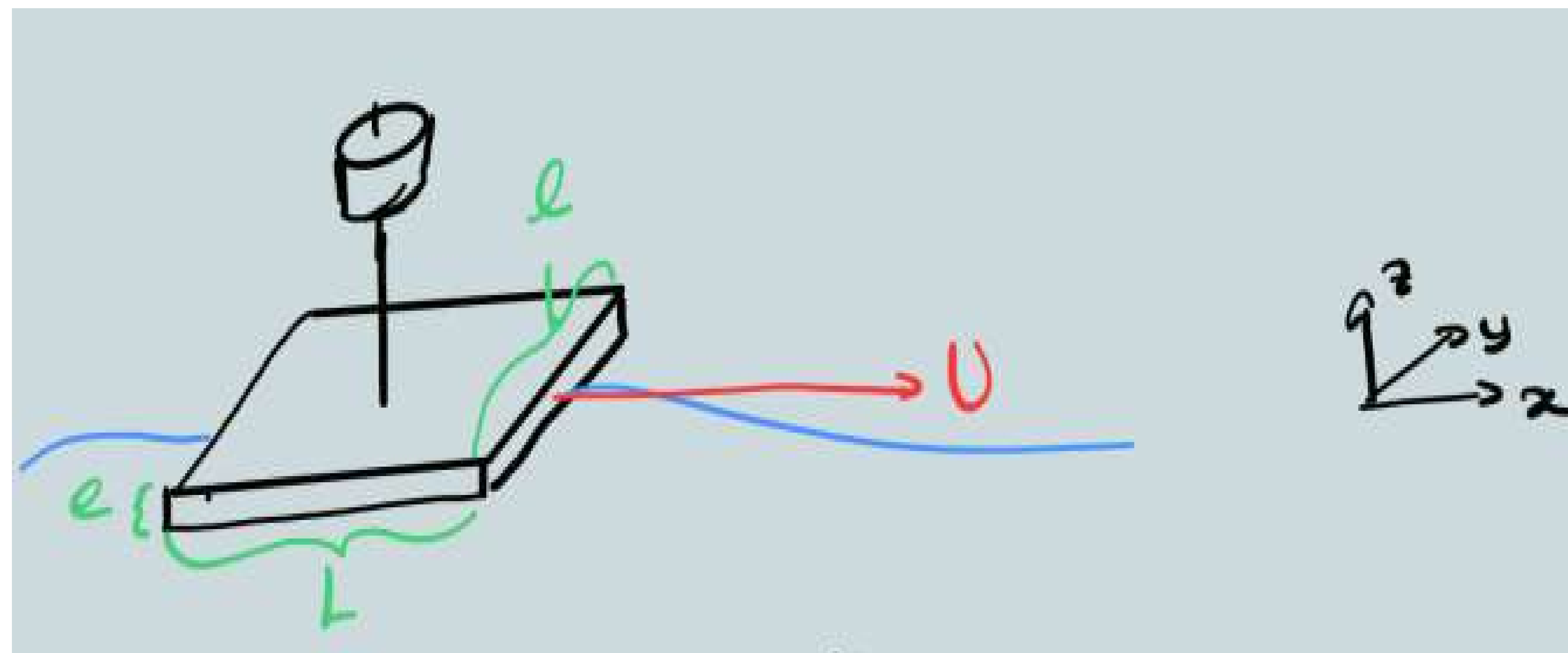
On remarque donc que pour les vitesses initiales les plus élevées, la vitesse max se rapproche grandement de la célérité de la vague

On lance à plusieurs vitesses puis on trace :



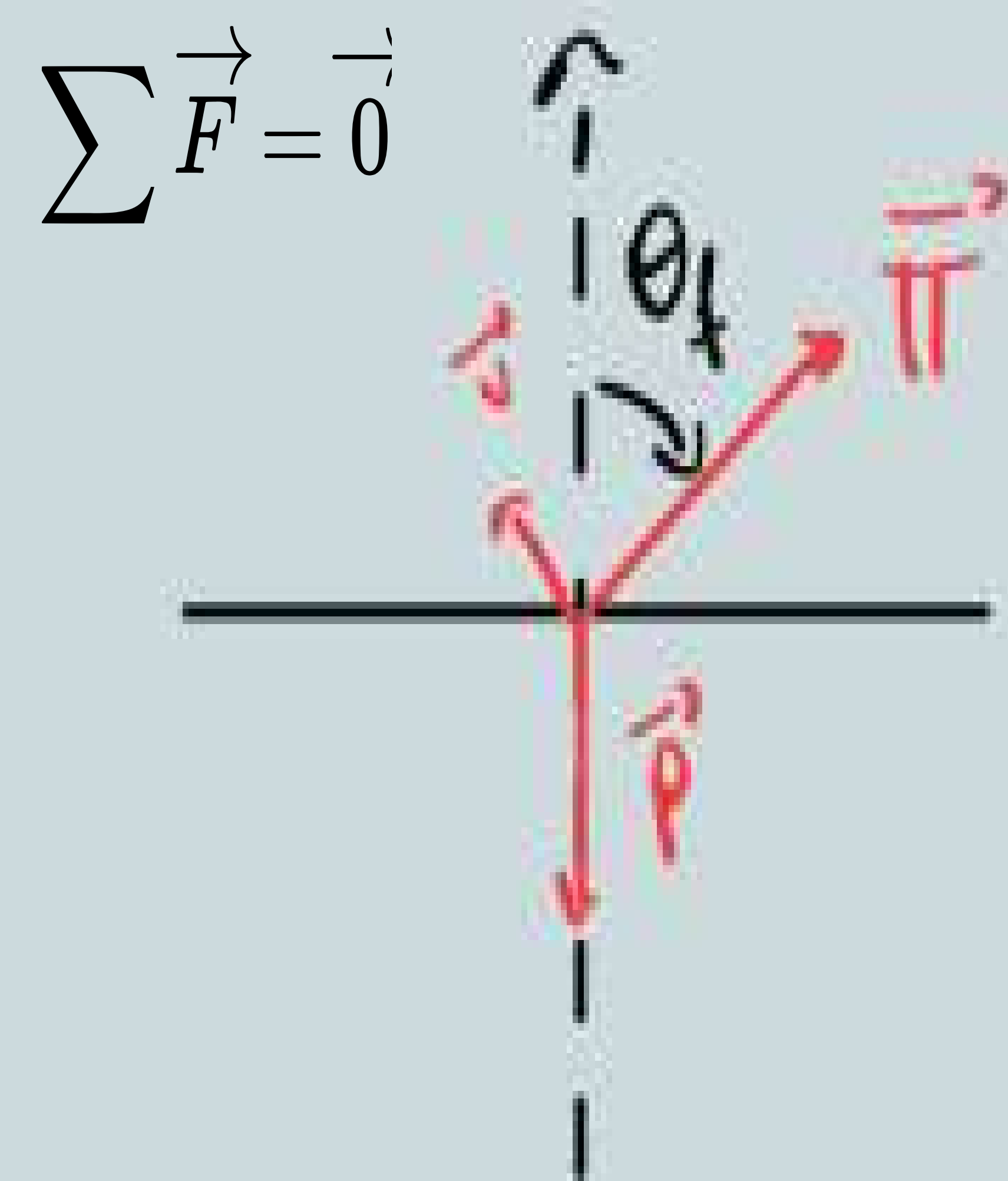


# Analyse de la stabilité du surfeur

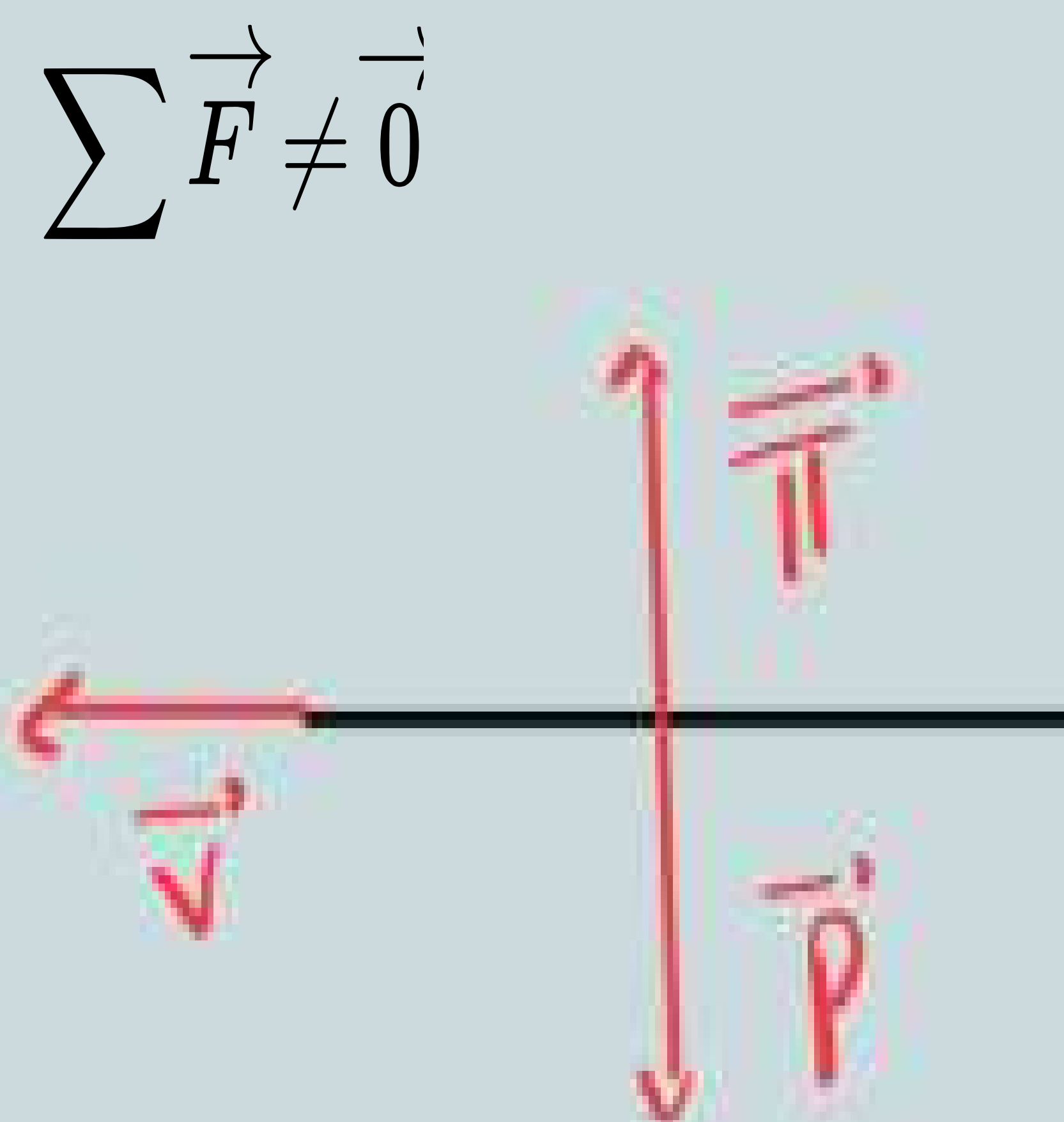


notre modèle

**cas d'équilibre**



**cas d'absence  
d'équilibre**



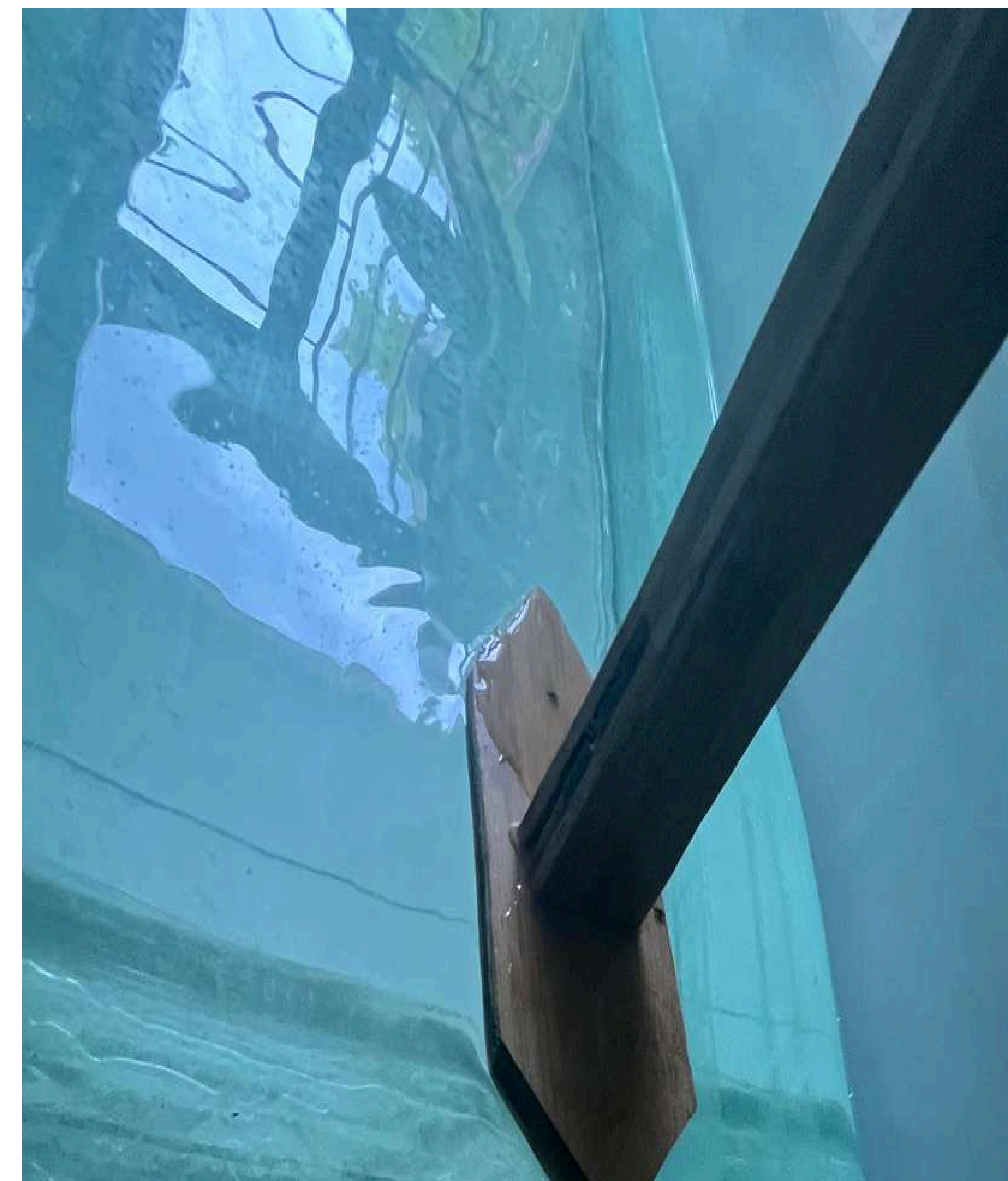
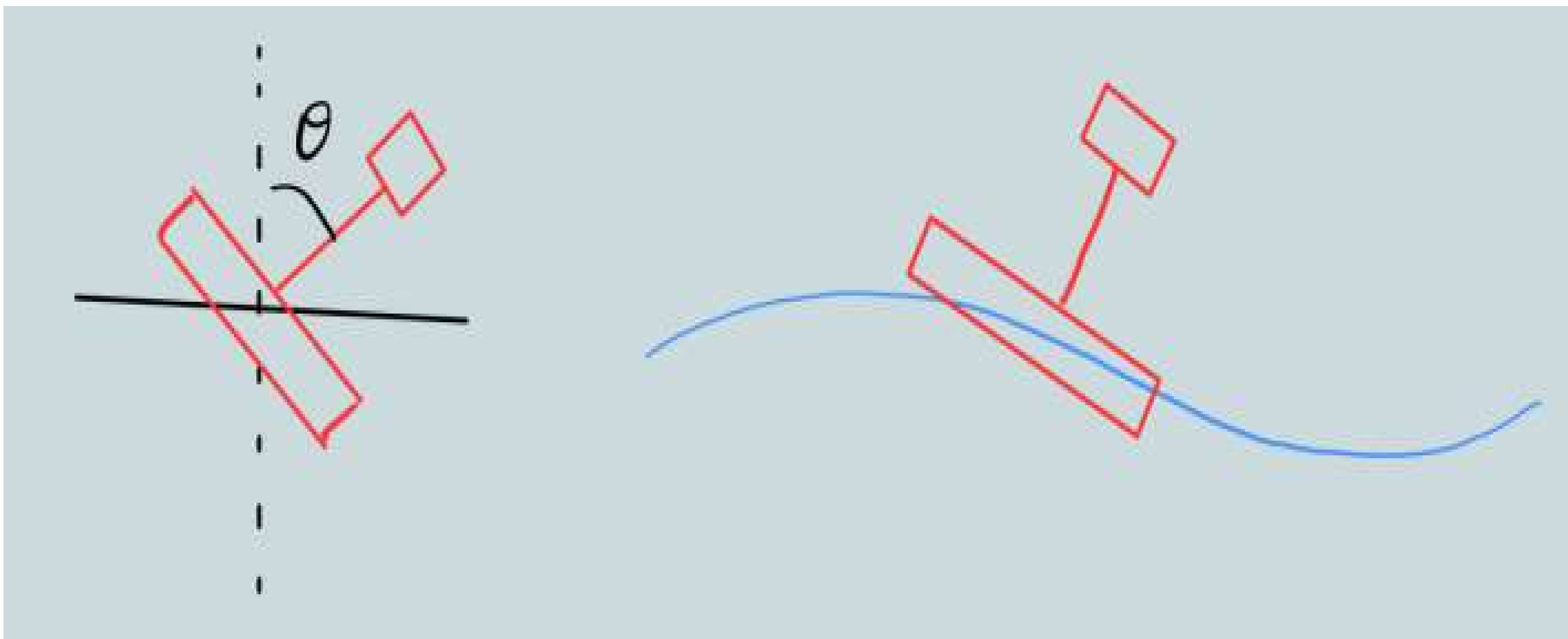
$$\left\{ \begin{array}{l} h_i = \frac{\rho L l^3}{12M} \\ v^2 = \frac{2Mh}{\rho L l^2 C_x} + \frac{gl}{6C_x} \end{array} \right.$$

**On trouve une hauteur idéale de 0.937m**

# ANALYSE DE LA STABILITÉ DU SURFEUR

III

## ● Expérience :



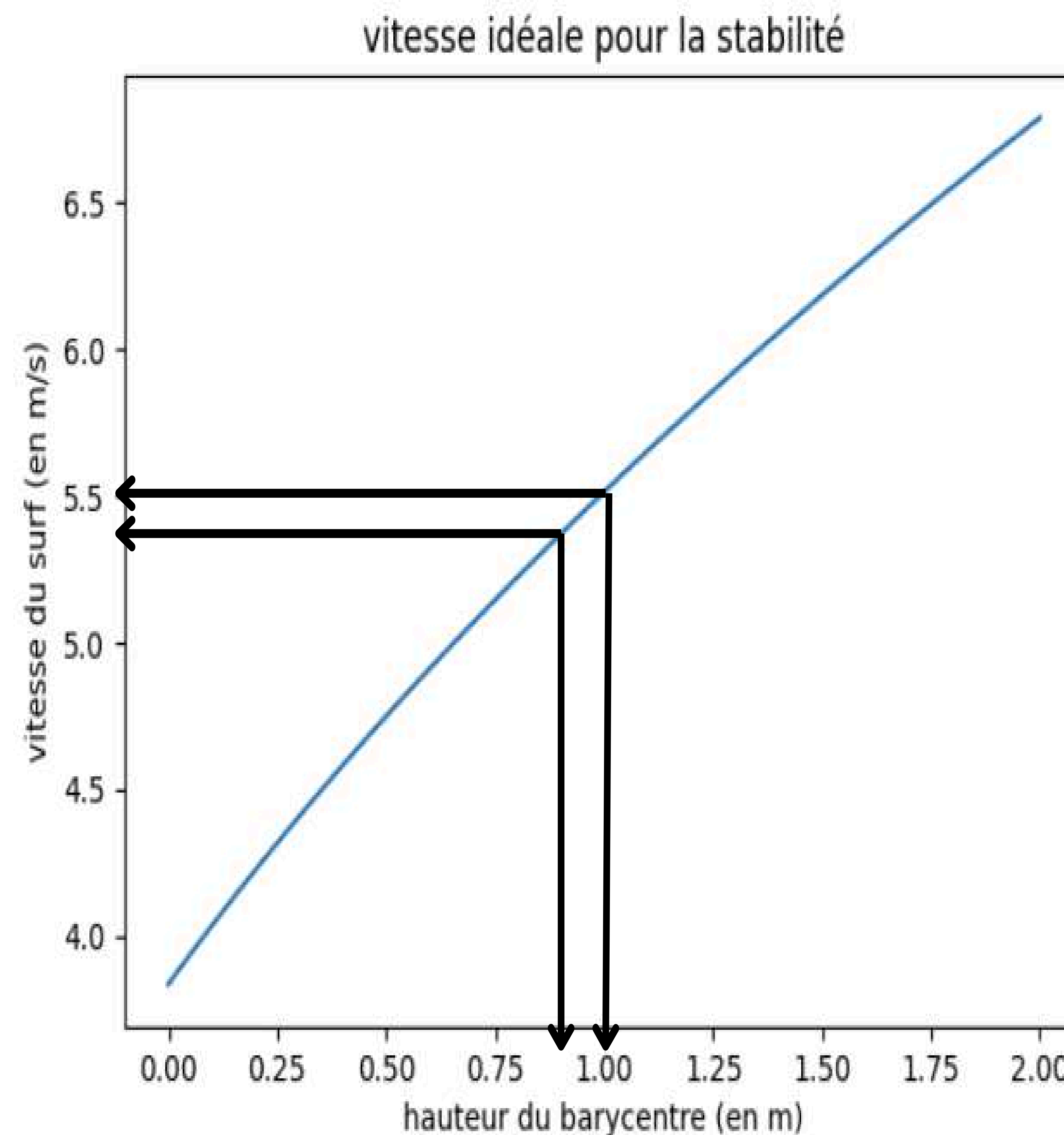
# ANALYSE DE LA STABILITÉ DU SURFEUR

III

hauteur du barycentre	chavirage?	angle maximal
15 cm	oui	/
12,5 cm	non	12°
10 cm	non	8°
7,5 cm	non	10°
5 cm	non	10,5°

- ainsi on a une hauteur expérimentale de 10cm (équivalent à 1m)

On reporte nos valeurs théoriques et expérimentales sur la courbe de v :

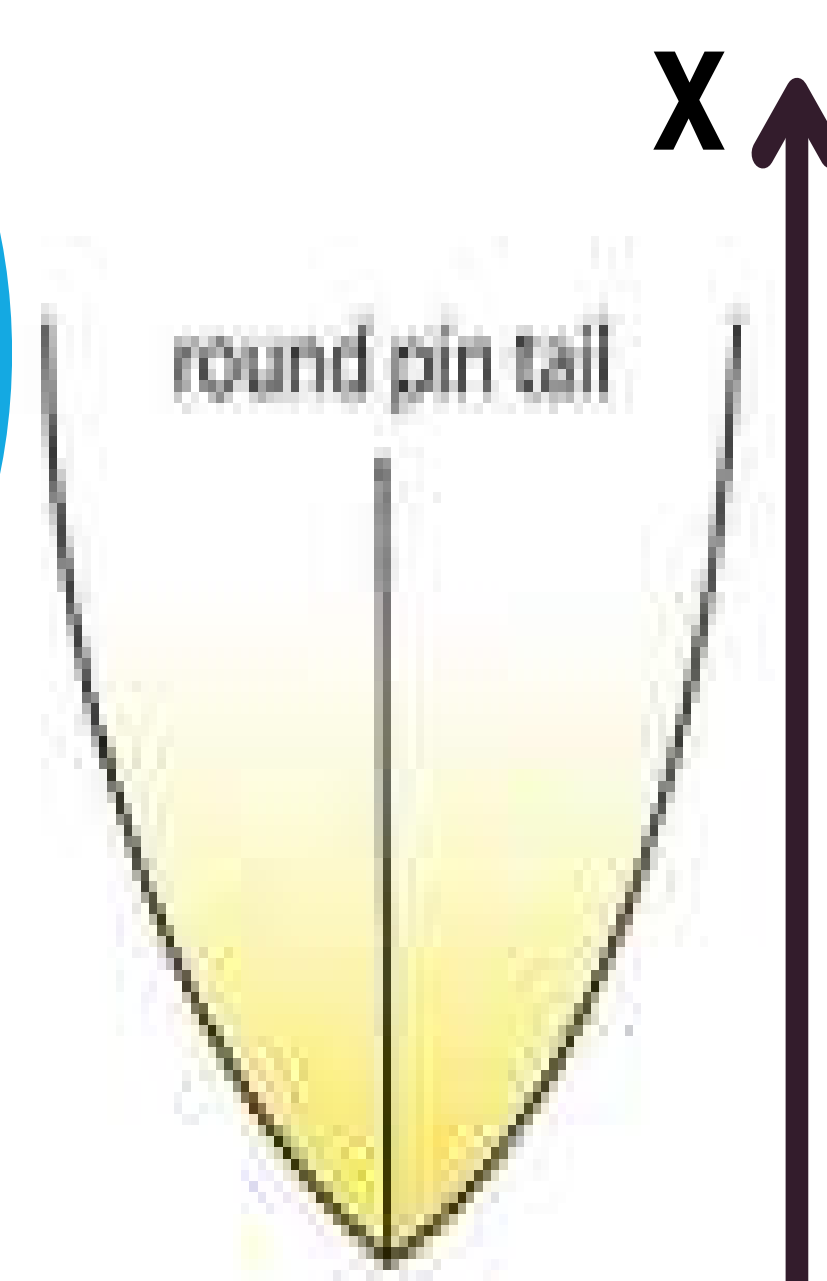


- On obtient donc
- une vitesse theorique de 5.4m/s
  - une vitesse expérimentale de 5.5 m/s



# LES PLANCHES

1



dessous plat 



**vitesse et stabilité moyenne**

2

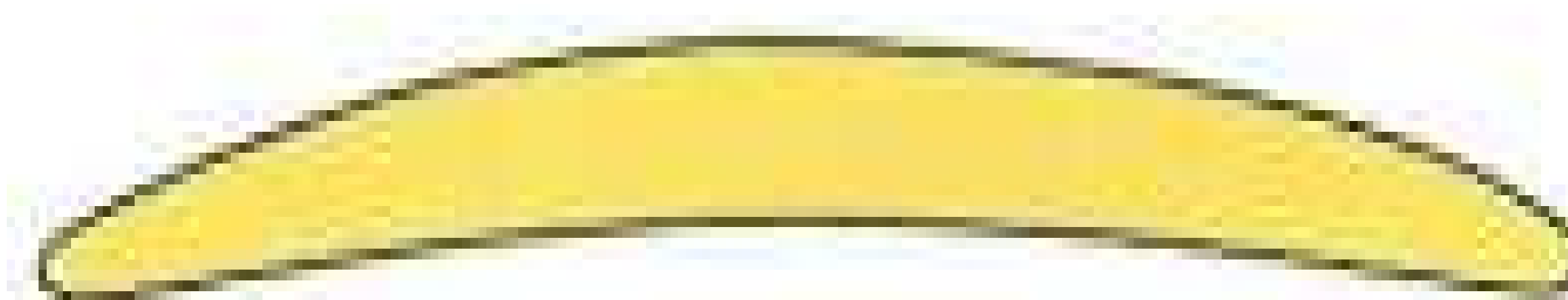
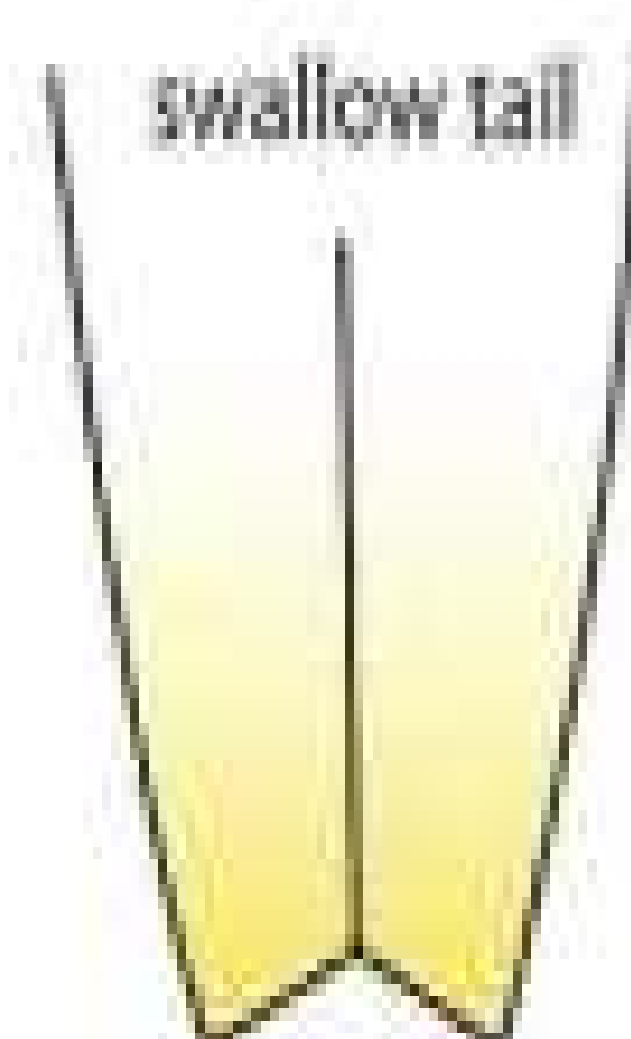


Vee bottom



**bonne vitesse et forte stabilité  
(adaptée forte houle)**

3



Concave

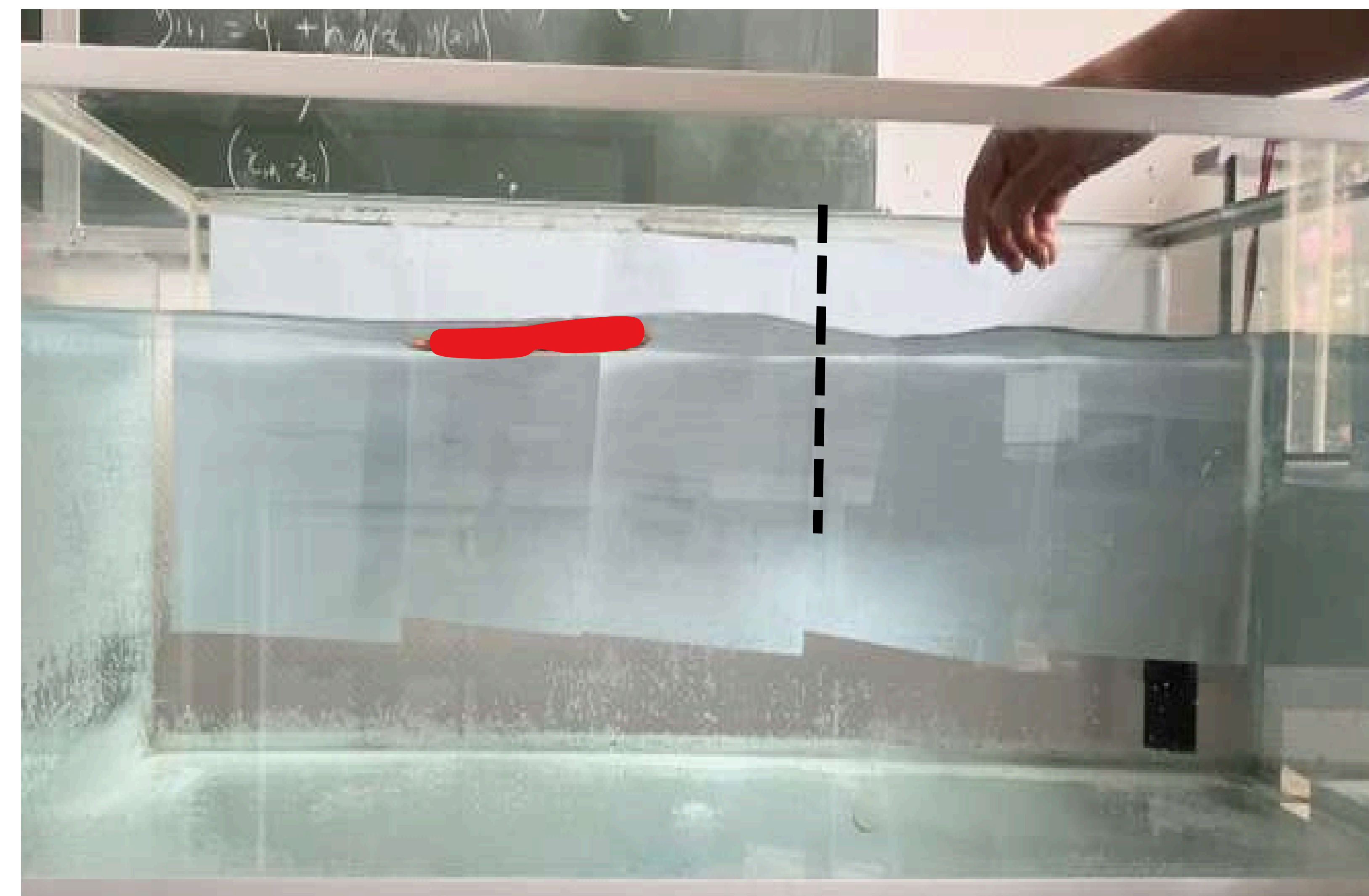
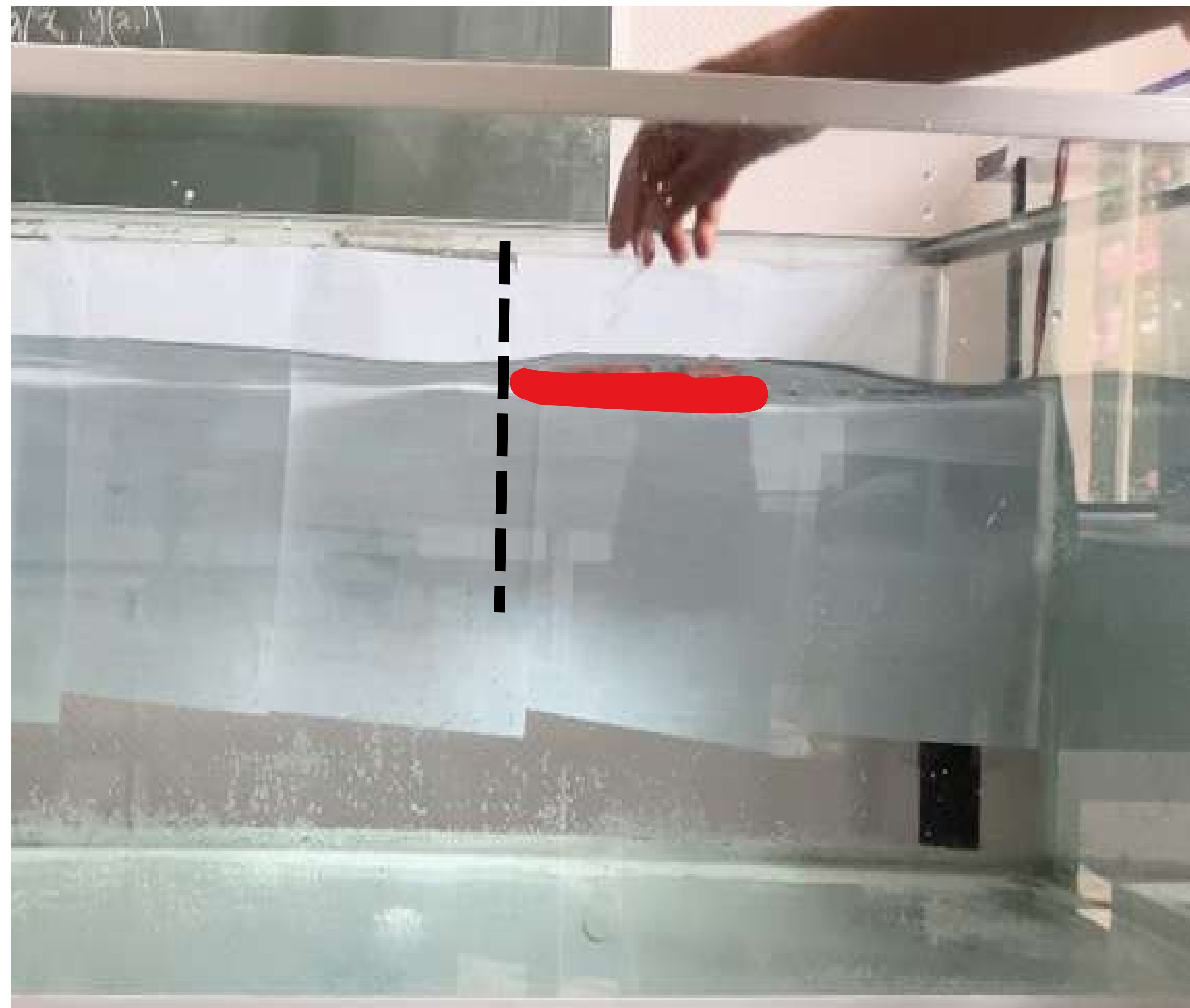


**bonne stabilité et grande vitesse  
(adaptée faible houle)**

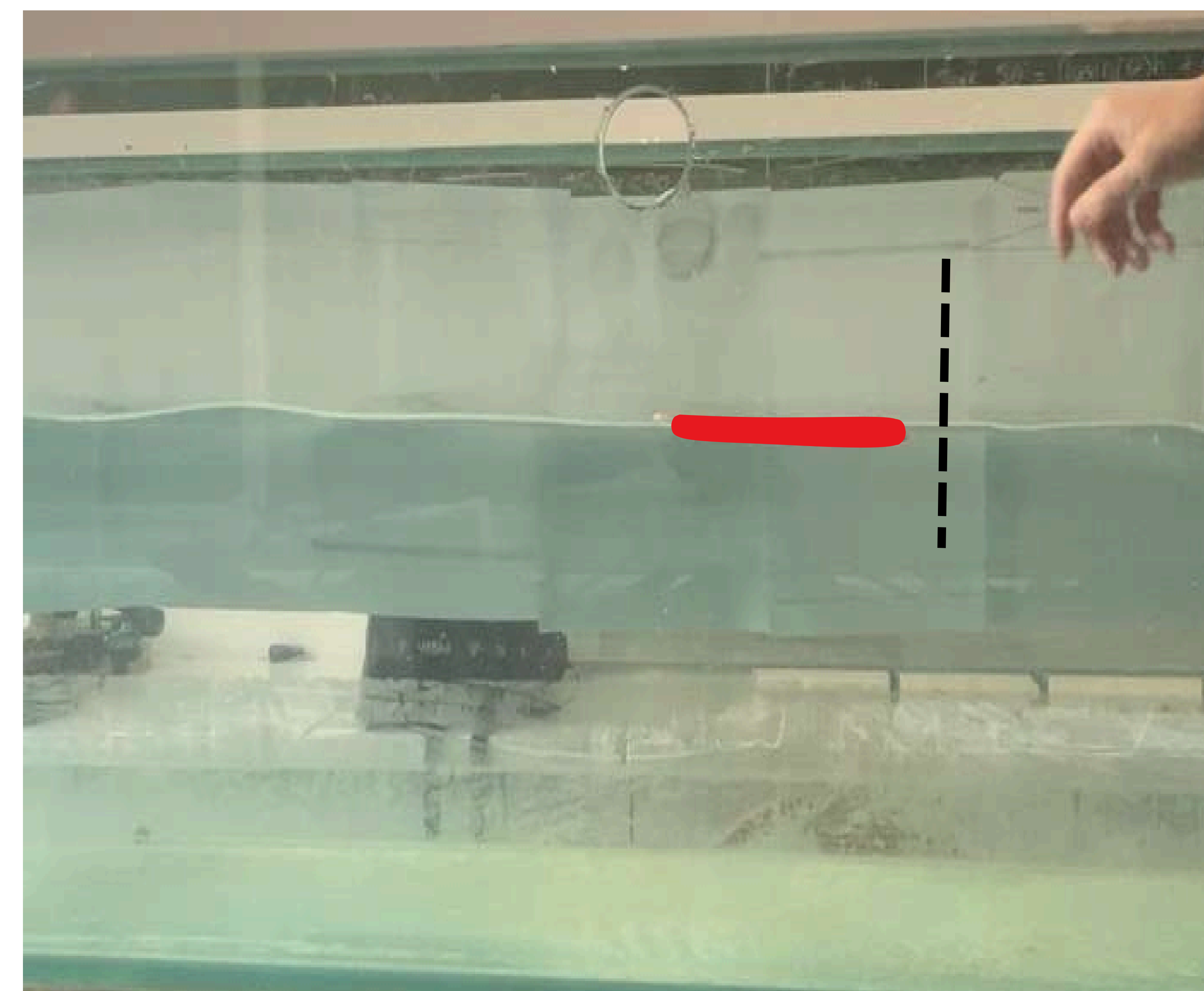
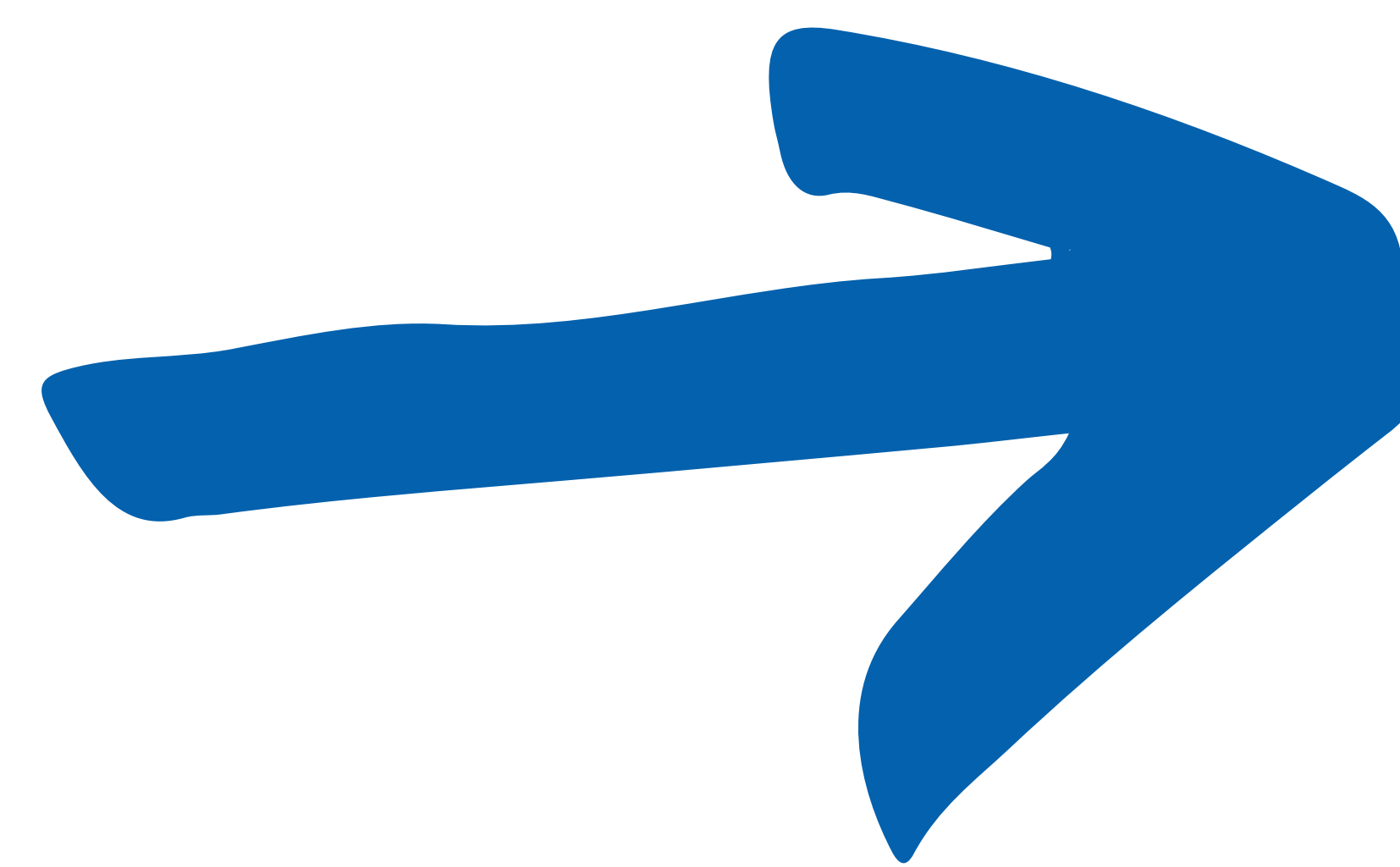
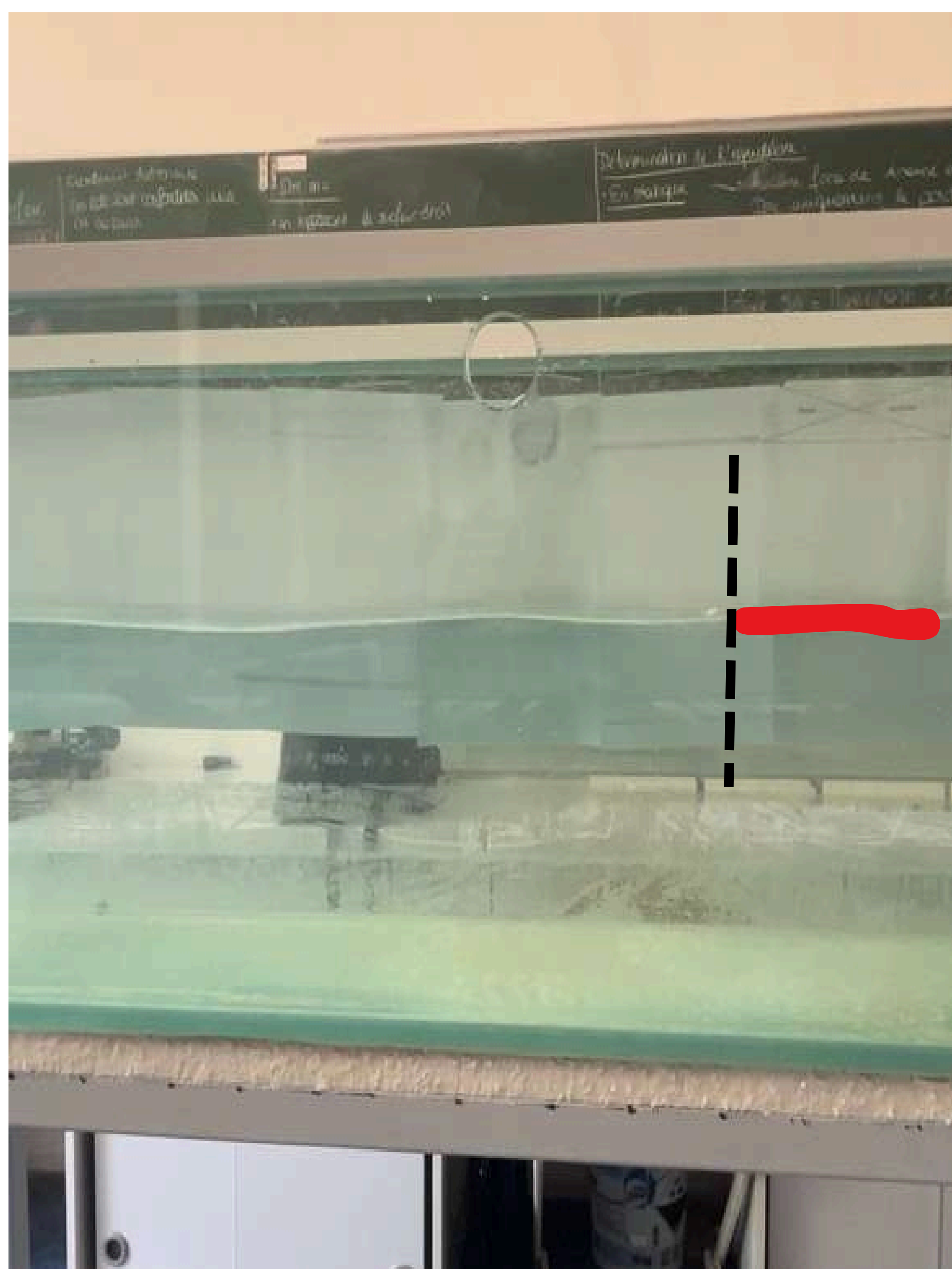


# LES PLANCHES

Sur eau statique :



Sur eau avec des petites ondulations :



TIPE : Sport et Jeux | 2024

# LES PLANCHES

Nombre de lancers	Planche 1	Planche 2	Planche 3
1	2,5	3,27	4,02
2	2,24	3,21	4,09
3	2,43	3,24	3,98
Moyenne :	2,39	3,24	4,03

vitesse (en km/h)

En statique comme avec des ondulations, la planche 3 est la plus rapide

→ on confirme donc notre raisonnement



# CONCLUSION

V

Dans notre situation

- Nous avons analysé les vagues présentes
- 
- Nous avons déterminé des paramètres à optimiser
- 
- Nous avons conçu la planche idéale



**Le surf en méditerranée est maintenant facilité!**

# CONCLUSION

V

## Critiques :

- Beaucoup d'approximations
- Aérodynamisme des planches
- Bassin peu représentatif
- Pas de tests en situation réelle

## Améliorations :

- Ajout d'un système en bout de bassin
- Changer la matière des planches
- Un meilleur système pour la stabilité

# ANNEXE

```
##définition des grandeurs
g=9.81
L=1.8
ak=0.36
c=5.5

def vitesse(t):
    v=(c-((L*g*ak)/(1-ak))**0.5)*t
    return v

c1=[]
t1=[]
v1=[]
i=0
while i<=10:
    c1.append(c*i)
    v1.append(vitesse(i))
    t1.append(i)
    i+=0.01

##Tracé
plt.plot(t1, v1, 'r-')
plt.plot(t1, c1, 'b-')
plt.title('analyse du critère sur la vitesse')
plt.xlabel('temps (en s)')
plt.ylabel('distance (en m)')
plt.show()
```

Tracé de la courbe de  
“zone” pour la vitesse  
initiale

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3
4 ##définition des grandeurs
5 M=20
6 p=1000
7 L=1.8
8 l=0.5
9 Cx=0.5
10 g=9.81
11
12 def vitesse(h):
13     v=((2*M*h*g)/(p*L*(1**2)*Cx)+(g*l)/(6*Cx))**0.5
14     return v
15
16 print(vitesse(0.937), vitesse(1))
17 h1=[]
18 v1=[]
19 i=0
20 while i<=2:
21     v1.append(vitesse(i))
22     h1.append(i)
23     i+=0.001
24
25
26 ##Tracé
27 plt.plot(h1, v1)
28 plt.title('vitesse idéale pour la stabilité')
29 plt.xlabel('hauteur du barycentre (en m)')
30 plt.ylabel('vitesse du surf (en m/s)')
31 plt.show()
```

Tracé de la courbe de la  
vitesse (partie 3) Sur python  
TIPE : Sport et Jeux | 2024

```
13
14 vini=[0, 0.5, 1.5, 2.1, 2.5, 3.2, 4.1, 5.5]
15 vmax=[2, 2.1, 2.6, 2.5, 3.5, 4.1, 5.1, 5.3]
16 vi1=[]
17 vm1=[]
18 for i in range(len(vini)):
19     vi1.append(vini[i]/c)
20     vm1.append(vmax[i]/c)
21
22
23
24 ##Tracé
25 plt.scatter(vi1, vm1)
26 plt.xlim(0,1)
27 plt.ylim(0,1)
28 plt.xlabel('vini/c')
29 plt.ylabel('vmax/c')
30 plt.title('analyse du critère sur la vitesse')
31 plt.show()
32
```

Tracé des points  
pour la vitesse



# ANNEXE

Détermination de la relation de dispersion

$$\Phi(x, z, t) = X(x, t) \times Z(z)$$

$$\longrightarrow \begin{cases} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = -\mu \times X \\ \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = \mu \times Z \end{cases} \quad \text{car le Laplacien est nul}$$

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial z}\right)_{z=0} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \Rightarrow \begin{cases} X(x, t) = \cos(kx - \omega t) \\ \left(\frac{\partial Z}{\partial z}\right)_{z=0} = A\omega \end{cases}$$

$$\longrightarrow \mu = k^2 \Rightarrow Z(z) = \alpha \cosh(kz) + \beta \sinh(kz)$$

$$\Rightarrow Z(z) = \frac{A\omega}{k} \left( \frac{\cosh(k(z + H))}{\sinh(kH)} \right)$$

$$\eta(x, t) = A \sin(kx - \omega t) = -\frac{1}{g} \times \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} = \frac{\omega}{g} \sin(kx - \omega t) Z(0)$$

$$A = \frac{A\omega^2}{gk \times \tanh(kH)} \Rightarrow \omega^2 = gk \tanh(kH)$$

# ANNEXE

Critère de surf :

$$F > F_{surf} \quad \text{avec}$$

$$\begin{cases} F \approx \Pi p \sim \rho S_i L g(ak) \\ F_{surf} = (\rho_b S \lambda) \frac{(c - v_{ini})^2}{\lambda} \end{cases}$$

Or d'après la loi de l'hydrostatique

$$\rho S_i (1 - (ak)) = \rho_b S$$

Ainsi on a :

$$v_{ini} > c - \sqrt{\frac{Lg(ak)}{1 - (ak)}} = v_i$$

Avec

- $S_i$  la section immergée
- $\rho_b$  la masse volumique de la planche

# ANNEXE

En statique : Aucune force de trainée et de portance. On prend en compte le poids et la poussée d'Archimède

$$J\ddot{\theta} = M \left( \vec{P} \right) - M \left( \vec{\Pi} \right)$$

Donc:  $J\ddot{\theta} = M g \sin(\theta) h_i - M \left( \vec{\Pi} \right)$

(h la hauteur du barycentre)

$$\begin{aligned} M \left( \vec{\Pi} \right) &= \overrightarrow{OM} \wedge \rho g V \cdot \vec{e}_z \\ &= \frac{\rho g L l^3}{12} \sin(\theta) \end{aligned}$$

Donc à l'équilibre on a

$$M \left( \vec{\Pi} \right) = M \left( \vec{P} \right)$$

Donc

$$h_i = \frac{\rho L l^3}{12 M}$$



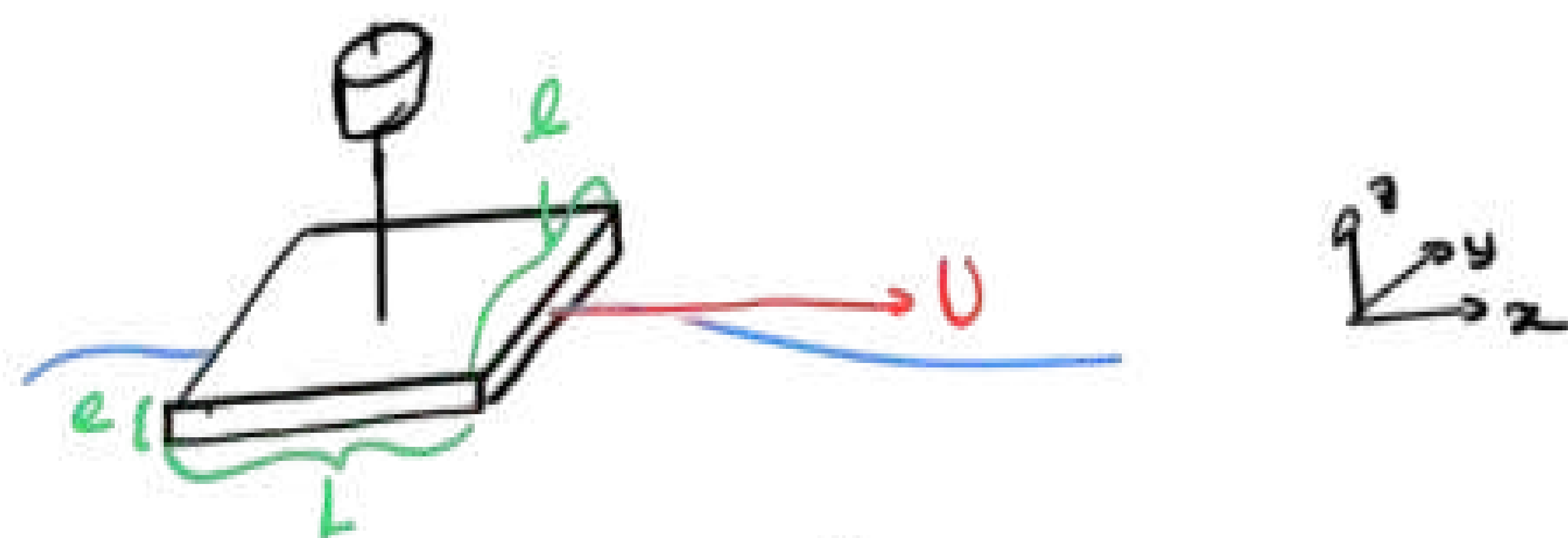
# ANNEXE

• Stabilité des surfeurs:

• en dynamique:

Pour modéliser simplement le problème, on suppose que le système { planche + surfeur de masse  $m$  } est animé d'une vitesse  $U$ .

On a donc le système:



Expérimentalement, il suffit de mettre la planche dans le bassin et d'observer la stabilité de ce dernier en fonction de la vitesse.

→ On peut étudier en évaluant les variations de  $h^*$  (avec  $h^*$  la hauteur du barycentre, que l'on considère le barycentre de la masse, et simple pour exploiter les résultats).

L'expérience se fait donc en filmant le "trajet" de la planche et en pointant avec un logiciel la hauteur du barycentre.

Théoriquement, on ajoute une nouvelle force, la force de traînée d'expression  $\vec{F} = -\frac{\rho C_x S V^2}{2} \vec{e}_x$

De plus, on a  $S = L$  et un bras de levier qui vaut (en considérant l'approximation des petits angles)  $l\theta$ .

D'où le moment des forces

$$\mathcal{M}(\vec{F}) = \frac{\rho C_x L^2 V^2}{2} \theta$$

À l'équilibre, on a:

$$17gh^* \theta + \frac{\rho g L^3}{12} \theta + \frac{\rho L^2 V^2 \theta C_x}{2} = 0$$

$$\text{D'où } 17gh^* + \frac{\rho g L^3}{12} + \frac{\rho L^2 V^2 C_x}{2} = 0$$

$$\text{D'où } \frac{\rho L^2 V^2 C_x}{2} = \left( 17gh^* + \frac{\rho g L^3}{12} \right)$$

$$\text{et } V^2 = \left( \frac{217gh^*}{\rho L^2 C_x} + \frac{g L}{6 C_x} \right)$$