

DYNAMIQUE DES FLUIDES

Lycée Henri Poincaré, Classe de PC*

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

I. Dynamique locale des écoulements visqueux

1. Accélération particulière
2. Équation de Navier-Stokes et conditions de bord
3. Écoulement de Poiseuille plan
4. Écoulement de Couette plan
5. Écoulement de Poiseuille cylindrique
6. Démarrage brutal d'un bord plan

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

I. Dynamique locale des écoulements visqueux

1. Accélération particulière
2. Équation de Navier-Stokes et conditions de bord
3. Écoulement de Poiseuille plan
4. Écoulement de Couette plan
5. Écoulement de Poiseuille cylindrique
6. Démarrage brutal d'un bord plan

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

I. Dynamique locale des écoulements visqueux

1. Accélération particulière
2. Équation de Navier-Stokes et conditions de bord
3. Écoulement de Poiseuille plan
4. Écoulement de Couette plan
5. Écoulement de Poiseuille cylindrique
6. Démarrage brutal d'un bord plan

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

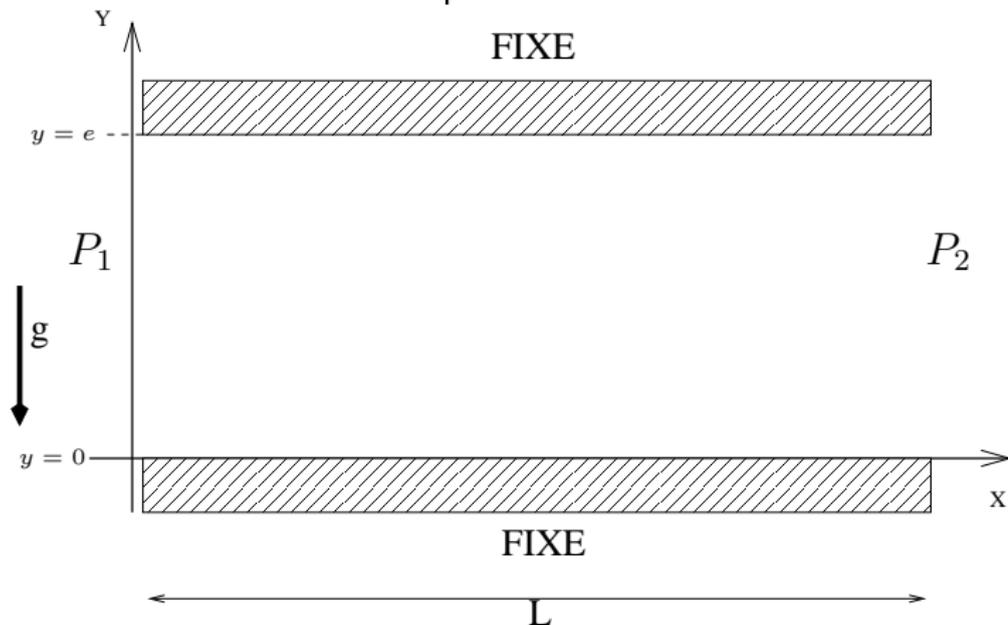
II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

I. Dynamique locale des écoulements visqueux

1. Accélération particulaire
2. Équation de Navier-Stokes et conditions de bord
3. Écoulement de Poiseuille plan



I. Dynamique locale des écoulements visqueux

II. Nombre de Reynolds et régimes d'écoulements

III. Écoulement parfait

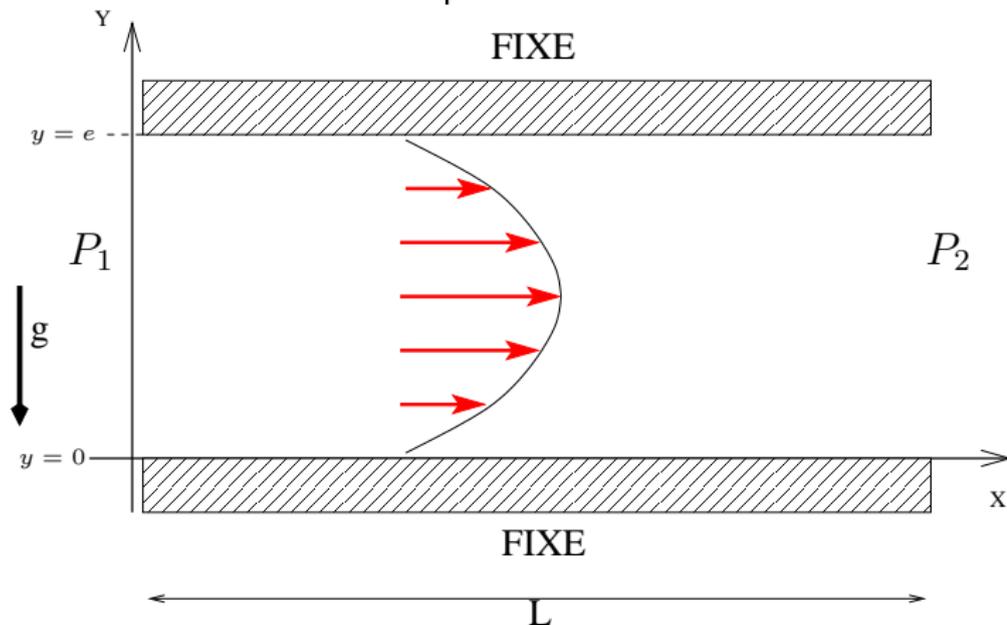
IV. Relation de Bernoulli

4. Écoulement de Couette plan

5. Écoulement de Poiseuille cylindrique

I. Dynamique locale des écoulements visqueux

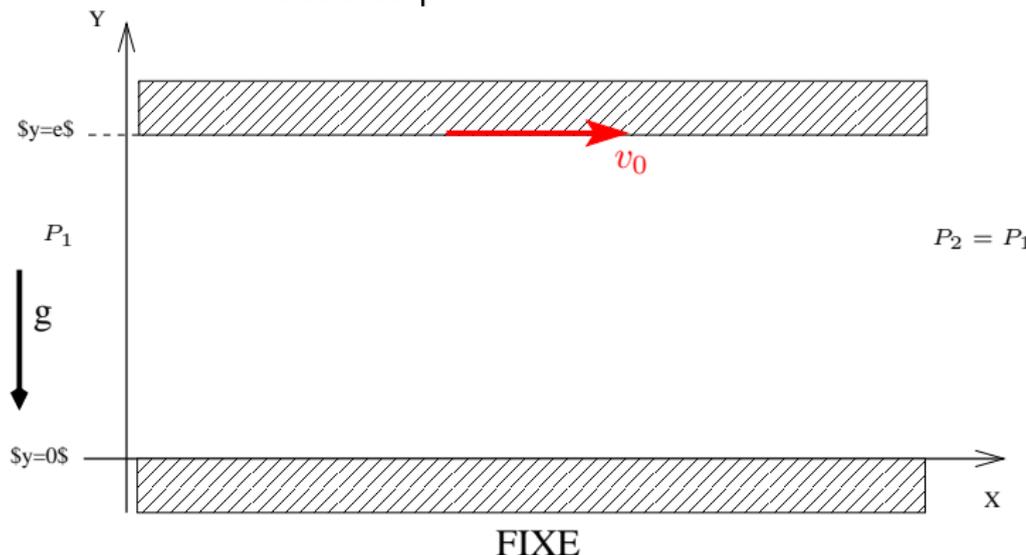
1. Accélération particulaire
2. Équation de Navier-Stokes et conditions de bord
3. Écoulement de Poiseuille plan

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueuxII. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulementsIII. Écoulement
parfaitIV. Relation de
Bernoulli

4. Écoulement de Couette plan
5. Écoulement de Poiseuille cylindrique
6. Démarrage brutal d'un bord plan

I. Dynamique locale des écoulements visqueux

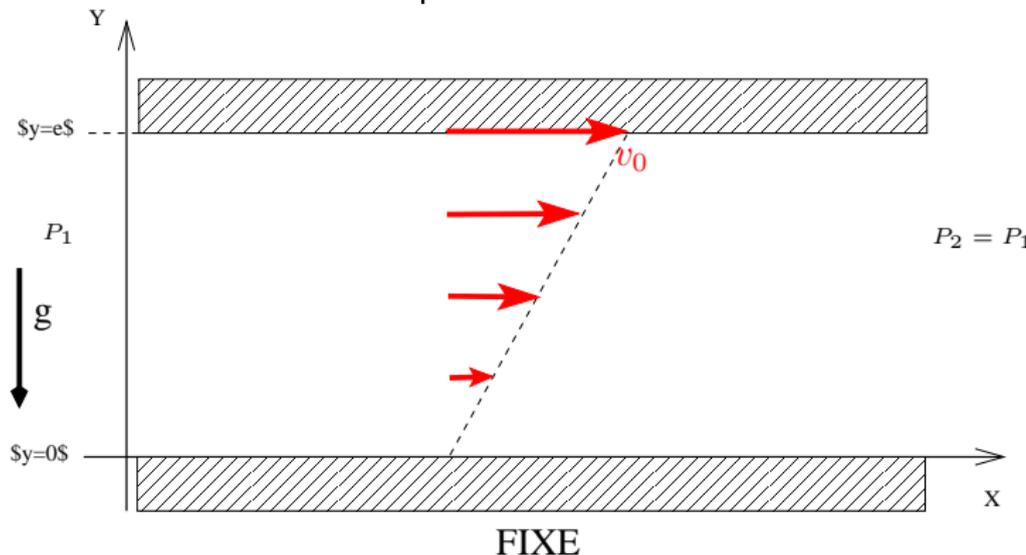
1. Accélération particulaire
2. Équation de Navier-Stokes et conditions de bord
3. Écoulement de Poiseuille plan
4. Écoulement de Couette plan

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueuxII. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulementsIII. Écoulement
parfaitIV. Relation de
Bernoulli

5. Écoulement de Poiseuille cylindrique
6. Démarrage brutal d'un bord plan

I. Dynamique locale des écoulements visqueux

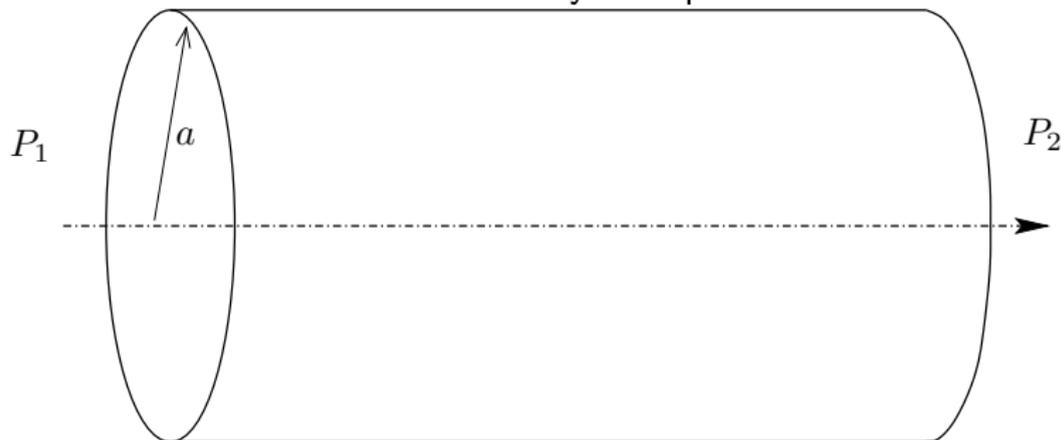
1. Accélération particulaire
2. Équation de Navier-Stokes et conditions de bord
3. Écoulement de Poiseuille plan
4. Écoulement de Couette plan

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueuxII. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulementsIII. Écoulement
parfaitIV. Relation de
Bernoulli

5. Écoulement de Poiseuille cylindrique
6. Démarrage brutal d'un bord plan

I. Dynamique locale des écoulements visqueux

1. Accélération particulière
2. Équation de Navier-Stokes et conditions de bord
3. Écoulement de Poiseuille plan
4. Écoulement de Couette plan
5. Écoulement de Poiseuille cylindrique



6. Démarrage brutal d'un bord plan

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

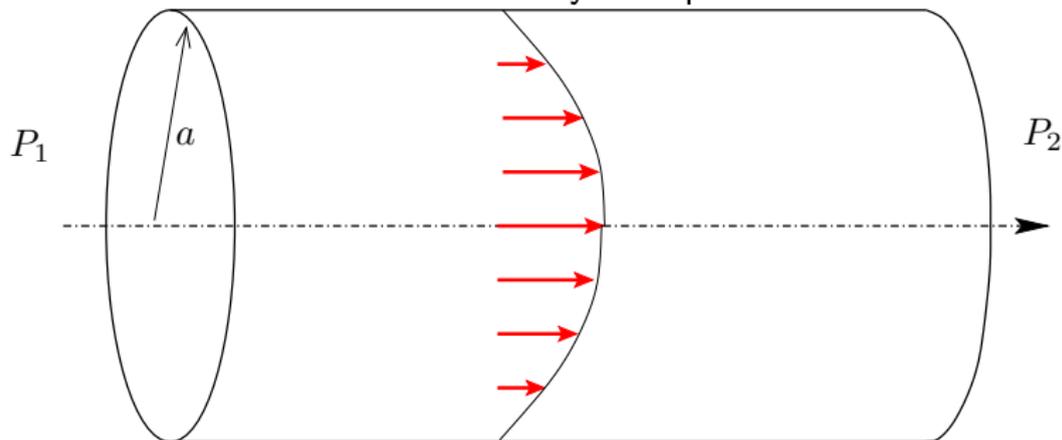
II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

I. Dynamique locale des écoulements visqueux

1. Accélération particulaire
2. Équation de Navier-Stokes et conditions de bord
3. Écoulement de Poiseuille plan
4. Écoulement de Couette plan
5. Écoulement de Poiseuille cylindrique



6. Démarrage brutal d'un bord plan

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

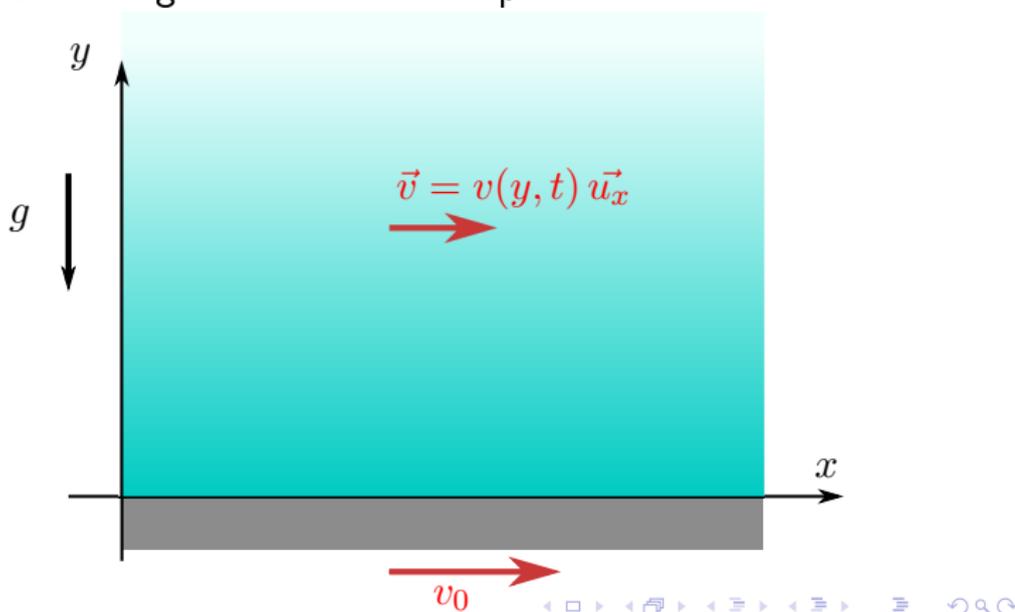
II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

I. Dynamique locale des écoulements visqueux

1. Accélération particulaire
2. Équation de Navier-Stokes et conditions de bord
3. Écoulement de Poiseuille plan
4. Écoulement de Couette plan
5. Écoulement de Poiseuille cylindrique
6. Démarrage brutal d'un bord plan



I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

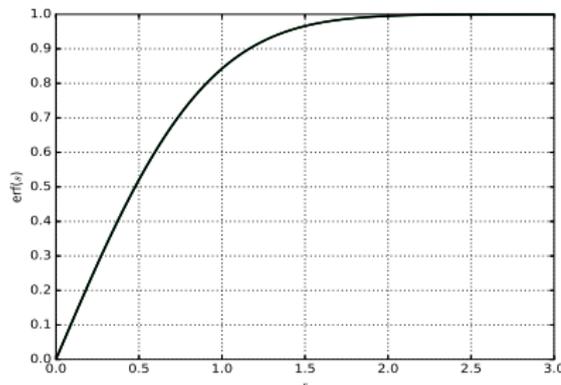
III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

I. Dynamique locale des écoulements visqueux

1. Accélération particulaire
2. Équation de Navier-Stokes et conditions de bord
3. Écoulement de Poiseuille plan
4. Écoulement de Couette plan
5. Écoulement de Poiseuille cylindrique
6. Démarrage brutal d'un bord plan

Figure – Graphe de la fonction d'erreur $\operatorname{erf}(x)$



I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

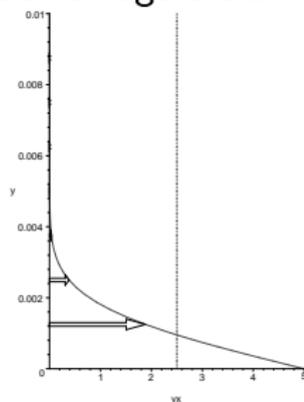
II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

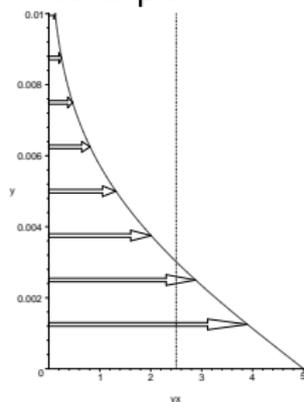
IV. Relation de
Bernoulli

I. Dynamique locale des écoulements visqueux

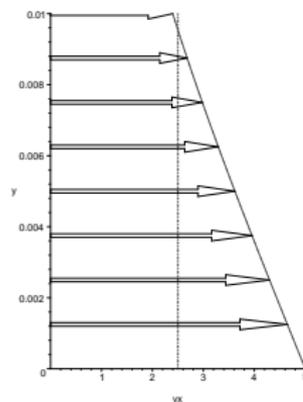
1. Accélération particulière
2. Équation de Navier-Stokes et conditions de bord
3. Écoulement de Poiseuille plan
4. Écoulement de Couette plan
5. Écoulement de Poiseuille cylindrique
6. Démarrage brutal d'un bord plan



$t = 1$ s



$t = 10$ s



$t = 100$ s

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

I. Dynamique locale des écoulements visqueux

1. Accélération particulière
2. Équation de Navier-Stokes et conditions de bord
3. Écoulement de Poiseuille plan
4. Écoulement de Couette plan
5. Écoulement de Poiseuille cylindrique
6. Démarrage brutal d'un bord plan

▶ 2_02005.mov

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

II. Nombre de Reynolds et régimes d'écoulements

1. Analyse d'ordre de grandeur
2. Classification des écoulements
3. Règle empirique de Reynolds sur la turbulence
4. Écoulement autour d'une sphère [► ici](#)
5. Chute d'une bille dans un liquide

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

II. Nombre de Reynolds et régimes d'écoulements

1. Analyse d'ordre de grandeur
2. Classification des écoulements
3. Règle empirique de Reynolds sur la turbulence
4. Écoulement autour d'une sphère [► ici](#)
5. Chute d'une bille dans un liquide

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

II. Nombre de Reynolds et régimes d'écoulements

1. Analyse d'ordre de grandeur
2. Classification des écoulements
3. Règle empirique de Reynolds sur la turbulence
4. Écoulement autour d'une sphère [► ici](#)
5. Chute d'une bille dans un liquide

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

II. Nombre de Reynolds et régimes d'écoulements

1. Analyse d'ordre de grandeur
2. Classification des écoulements
3. Règle empirique de Reynolds sur la turbulence

Définitions

Écoulement laminaire

Dans un écoulement laminaire, les lignes de courants glissent les unes sur les autres et prennent l'allure de feuillets parallèles. Le champ de vitesses est bien ordonné à l'échelle macroscopique.

Écoulement turbulent

Dans un écoulement turbulent, les lignes de courants s'entremêlent de manière inextricable jusqu'à se mélanger à très petite échelle. Le champ de vitesse est très désordonné et présente des variations chaotiques.

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

4. Écoulement autour d'une sphère [ici](#)

5. Chute d'une bille dans un liquide

II. Nombre de Reynolds et régimes d'écoulements

1. Analyse d'ordre de grandeur
2. Classification des écoulements
3. Règle empirique de Reynolds sur la turbulence

Règle de Reynolds

Le régime d'écoulement observé est déterminé par la valeur du nombre de Reynolds $Re = UL/\nu$, indépendamment des valeurs prises séparément par U , L et ν . Pour une géométrie donnée, il existe en général une valeur critique Re_c de l'ordre de quelques milliers telle que :

- ▶ Si $Re \leq Re_c$, l'écoulement est laminaire
- ▶ Si $Re > Re_c$, l'écoulement est turbulent

4. Écoulement autour d'une sphère [ici](#)
5. Chute d'une bille dans un liquide

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

II. Nombre de Reynolds et régimes d'écoulements

1. Analyse d'ordre de grandeur
2. Classification des écoulements
3. Règle empirique de Reynolds sur la turbulence



$$Re < Re_c$$



$$Re > Re_c$$

4. Écoulement autour d'une sphère [► ici](#)
5. Chute d'une bille dans un liquide

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

II. Nombre de Reynolds et régimes d'écoulements

1. Analyse d'ordre de grandeur
2. Classification des écoulements
3. Règle empirique de Reynolds sur la turbulence
4. Écoulement autour d'une sphère [► ici](#)
5. Chute d'une bille dans un liquide

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

II. Nombre de Reynolds et régimes d'écoulements

1. Analyse d'ordre de grandeur
2. Classification des écoulements
3. Règle empirique de Reynolds sur la turbulence
4. Écoulement autour d'une sphère [► ici](#)
5. Chute d'une bille dans un liquide

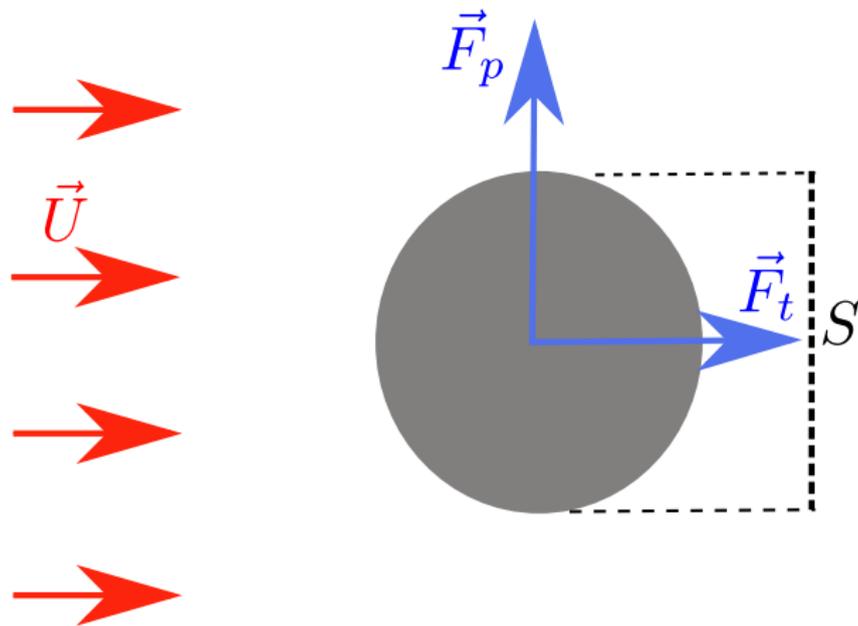
I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

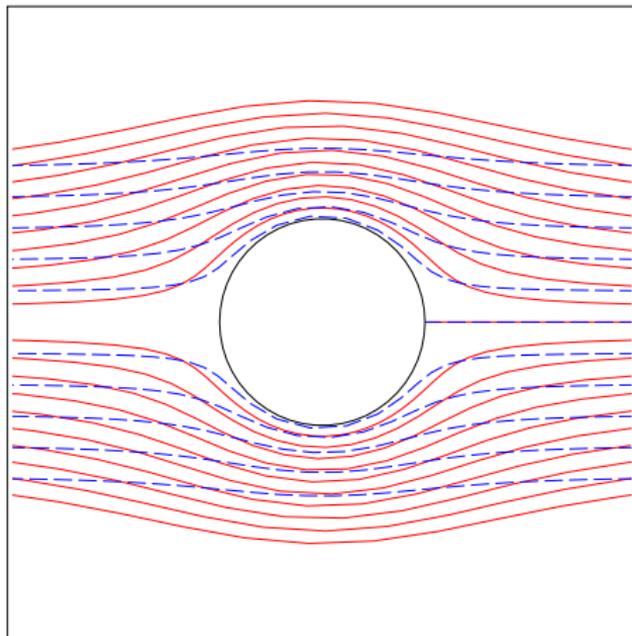
Écoulement autour d'une sphère



Écoulement autour d'une sphère

Re \ll 1 Solution de Stokes

$$F = 6\pi\eta R V$$



Écoulement autour d'une sphère

$$1 \lesssim \text{Re} \lesssim 3 \cdot 10^1$$

Pas d'expression simple pour F

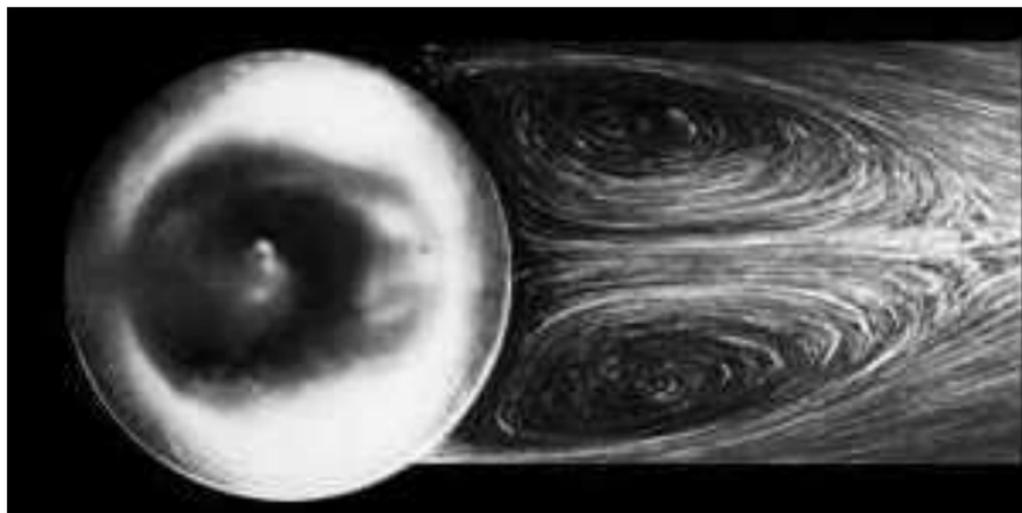
$$\text{Re}=27$$



Écoulement autour d'une sphère

$$3 \cdot 10^1 \lesssim \text{Re} \lesssim 10^3$$

$$\text{Re} = 118$$

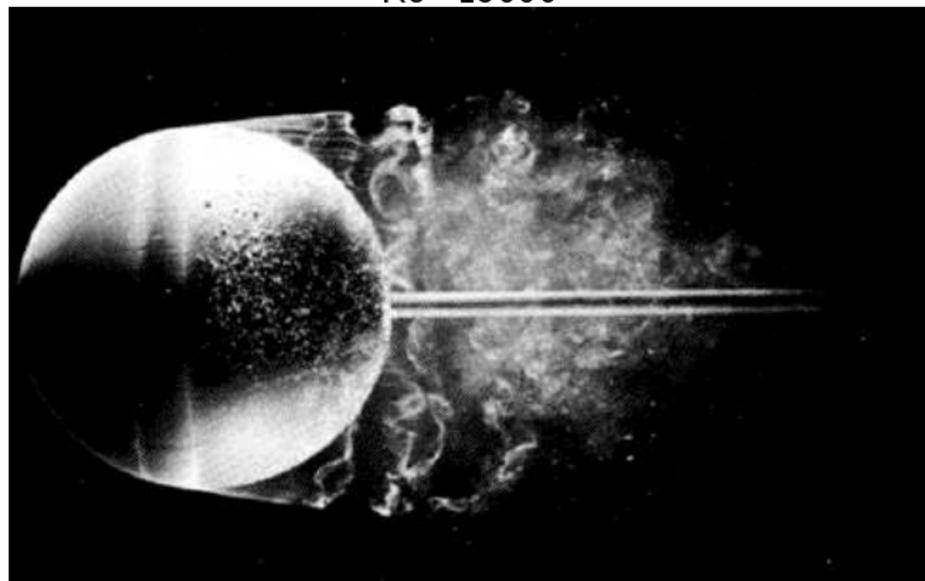


Écoulement autour d'une sphère

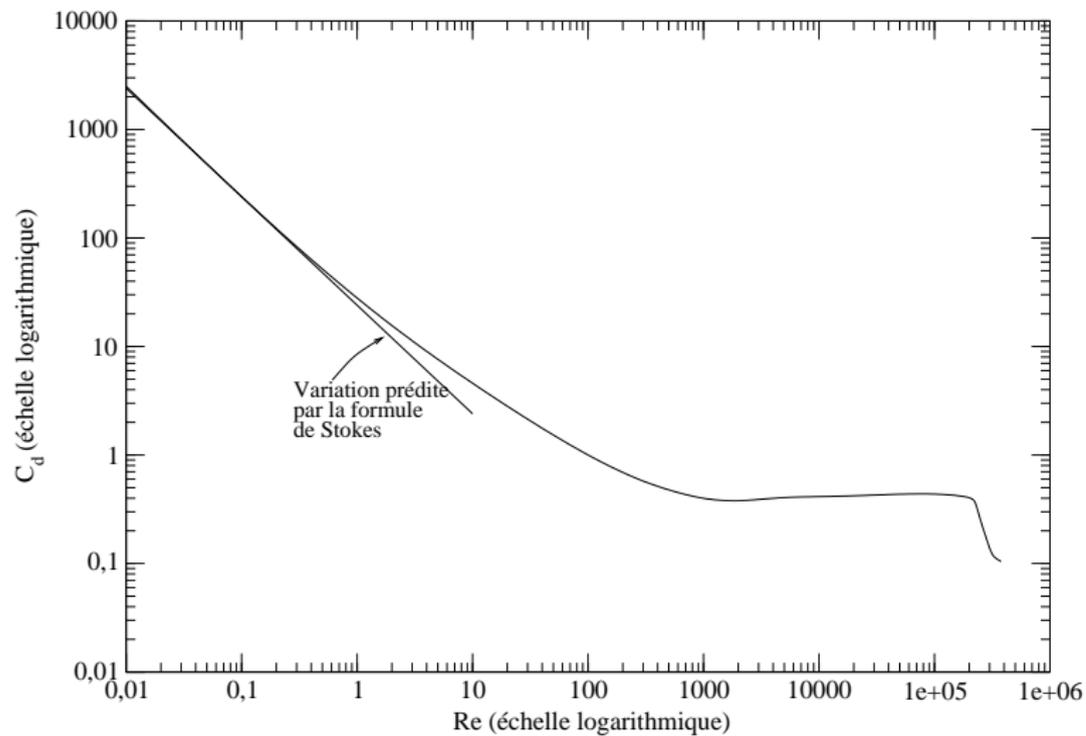
$$\text{Re} \gtrsim 10^3$$

$$F = C_d \pi R^2 \frac{1}{2} \rho V^2 \quad \text{avec} \quad C_d \simeq 0,4.$$

$$\text{Re} = 15000$$



Écoulement autour d'une sphère



III. Écoulement parfait

1. Couche limite selon le raisonnement de Stokes
2. Couche limite par analyse d'ordre de grandeur
3. Écoulement parfait et équation d'Euler

Définition

Dans un écoulement parfait, tout phénomène diffusif est négligé. Les particules fluides évoluent de manière adiabatique réversible, c'est à dire isentropique

4. Exemples
 - a. Implosion d'une cavité vide

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

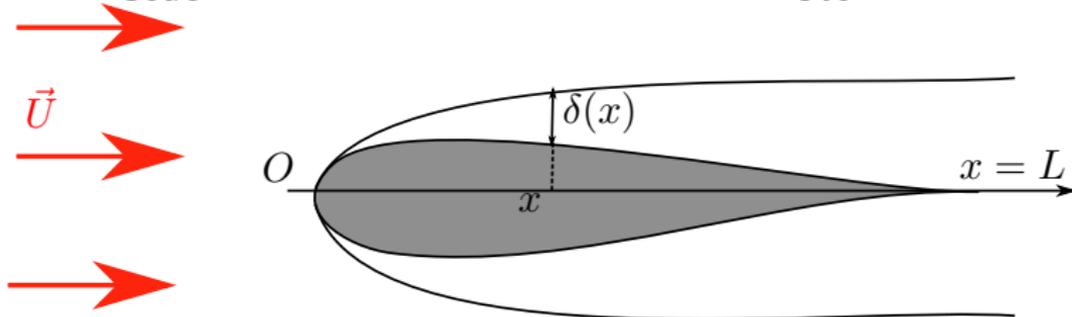
II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

III. Écoulement parfait

1. Couche limite selon le raisonnement de Stokes



2. Couche limite par analyse d'ordre de grandeur

3. Écoulement parfait et équation d'Euler

Définition

Dans un écoulement parfait, tout phénomène diffusif est négligé. Les particules fluides évoluent de manière adiabatique réversible, c'est à dire isentropique

4. Exemples

a. Implosion d'une cavité vide

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

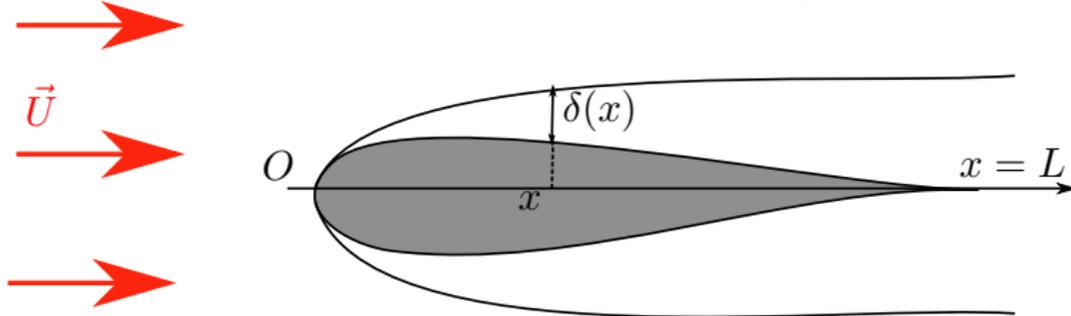
II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

III. Écoulement parfait

1. Couche limite selon le raisonnement de Stokes



▶ impflow.mov

▶ 2_01005b.mov

2. Couche limite par analyse d'ordre de grandeur

3. Écoulement parfait et équation d'Euler

Définition

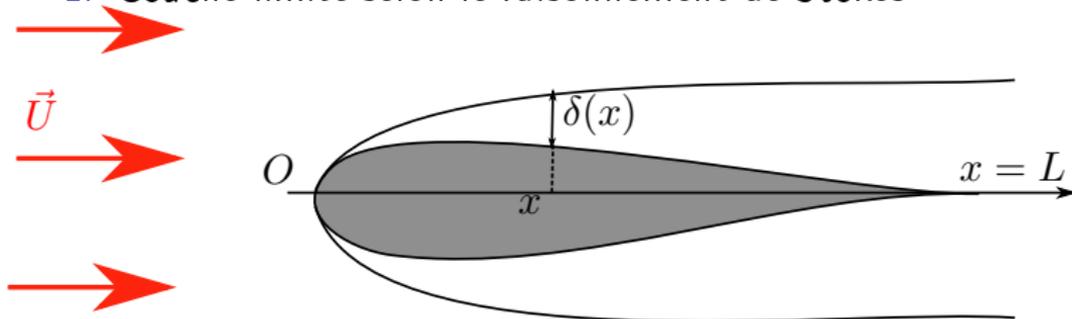
Dans un écoulement parfait, tout phénomène diffusif est négligé. Les particules fluides évoluent de manière adiabatique réversible, c'est à dire isentropique

4. Exemples

a. Implosion d'une cavité vide

III. Écoulement parfait

1. Couche limite selon le raisonnement de Stokes



2. Couche limite par analyse d'ordre de grandeur

3. Écoulement parfait et équation d'Euler

Définition

Dans un écoulement parfait, tout phénomène diffusif est négligé. Les particules fluides évoluent de manière adiabatique réversible, c'est à dire isentropique

4. Exemples

a. Implosion d'une cavité vide

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

III. Écoulement parfait

1. Couche limite selon le raisonnement de Stokes
2. Couche limite par analyse d'ordre de grandeur
Effet de l'incidence [▶ voir film sur le cd](#)
3. Écoulement parfait et équation d'Euler

Définition

Dans un écoulement parfait, tout phénomène diffusif est négligé. Les particules fluides évoluent de manière adiabatique réversible, c'est à dire isentropique

4. Exemples
 - a. Implosion d'une cavité vide

I. Dynamique locale des écoulements visqueux

II. Nombre de Reynolds et régimes d'écoulements

III. Écoulement parfait

IV. Relation de Bernoulli

III. Écoulement parfait

1. Couche limite selon le raisonnement de Stokes
2. Couche limite par analyse d'ordre de grandeur
3. Écoulement parfait et équation d'Euler

Définition

Dans un écoulement parfait, tout phénomène diffusif est négligé. Les particules fluides évoluent de manière adiabatique réversible, c'est à dire isentropique

4. Exemples

a. Implosion d'une cavité vide

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

III. Écoulement parfait

1. Couche limite selon le raisonnement de Stokes
2. Couche limite par analyse d'ordre de grandeur
3. Écoulement parfait et équation d'Euler

Définition

Dans un écoulement parfait, tout phénomène diffusif est négligé. Les particules fluides évoluent de manière adiabatique réversible, c'est à dire isentropique

4. Exemples
 - a. Implosion d'une cavité vide

I. Dynamique locale des écoulements visqueux

II. Nombre de Reynolds et régimes d'écoulements

III. Écoulement parfait

IV. Relation de Bernoulli

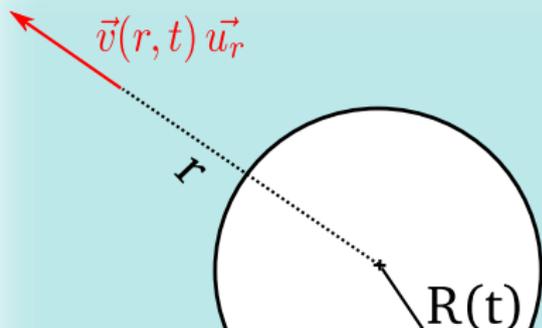
III. Écoulement parfait

1. Couche limite selon le raisonnement de Stokes
2. Couche limite par analyse d'ordre de grandeur
3. Écoulement parfait et équation d'Euler

Définition

Dans un écoulement parfait, tout phénomène diffusif est négligé. Les particules fluides évoluent de manière adiabatique réversible, c'est à dire isentropique

4. Exemples
 - a. Implosion d'une cavité vide



I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

IV. Relation de Bernoulli

1. Énoncé et démonstration
2. Formule de Torricelli
3. Effet Venturi
4. Pression d'arrêt et tube de Pitot
5. Force de Magnus et portance

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

**IV. Relation de
Bernoulli**

IV. Relation de Bernoulli

1. Énoncé et démonstration

Soit un écoulement parfait, stationnaire et incompressible sous l'effet des seules forces de pression et de pesanteur. Alors la somme $P + \rho gz + \frac{1}{2}\rho v^2$ est constante le long de chaque ligne de courant.

2. Formule de Torricelli
3. Effet Venturi
4. Pression d'arrêt et tube de Pitot
5. Force de Magnus et portance

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

IV. Relation de Bernoulli

1. Énoncé et démonstration

Soit un écoulement parfait, stationnaire et incompressible sous l'effet des seules forces de pression et de pesanteur. Alors la somme $P + \rho gz + \frac{1}{2}\rho v^2$ est constante le long de chaque ligne de courant.

2. Formule de Torricelli
3. Effet Venturi
4. Pression d'arrêt et tube de Pitot
5. Force de Magnus et portance

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

IV. Relation de Bernoulli

1. Énoncé et démonstration

Soit un écoulement parfait, stationnaire et incompressible sous l'effet des seules forces de pression et de pesanteur. Alors la somme $P + \rho gz + \frac{1}{2}\rho v^2$ est constante le long de chaque ligne de courant.

2. Formule de Torricelli
3. Effet Venturi
4. Pression d'arrêt et tube de Pitot
5. Force de Magnus et portance

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

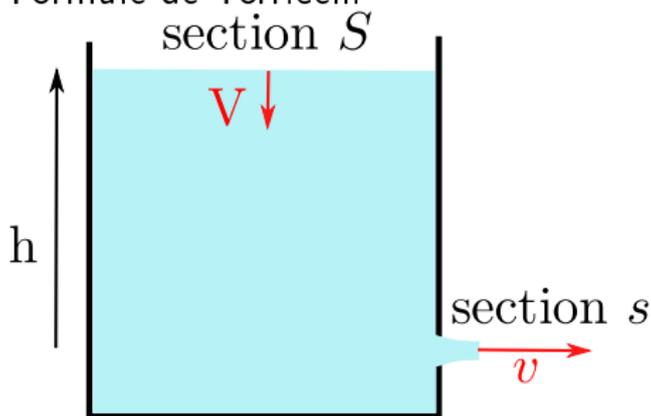
II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

IV. Relation de Bernoulli

1. Énoncé et démonstration
2. Formule de Torricelli



3. Effet Venturi
4. Pression d'arrêt et tube de Pitot
5. Force de Magnus et portance

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

IV. Relation de Bernoulli

1. Énoncé et démonstration
2. Formule de Torricelli
3. Effet Venturi
4. Pression d'arrêt et tube de Pitot
5. Force de Magnus et portance

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

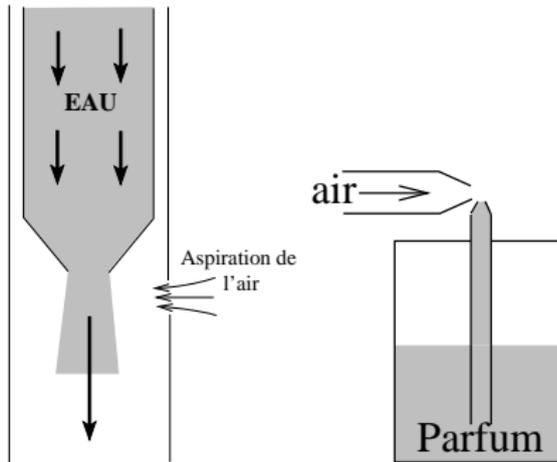
III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

IV. Relation de Bernoulli

1. Énoncé et démonstration
2. Formule de Torricelli
3. Effet Venturi

a. Aspect qualitatif



b. Mesure de débit par effet Venturi

4. Pression d'arrêt et tube de Pitot
5. Force de Magnus et portance

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

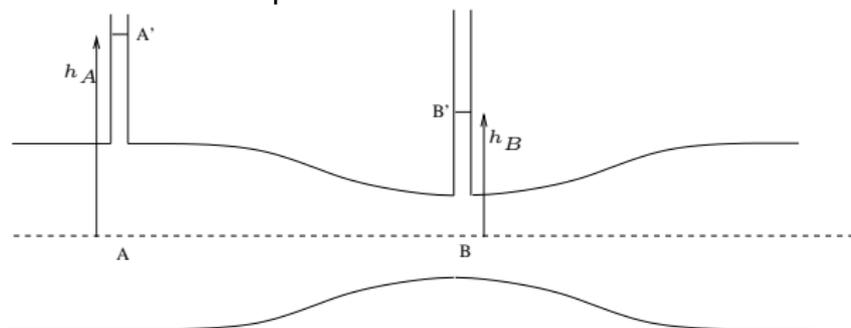
II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

IV. Relation de Bernoulli

1. Énoncé et démonstration
2. Formule de Torricelli
3. Effet Venturi
 - a. Aspect qualitatif
 - b. Mesure de débit par effet Venturi



4. Pression d'arrêt et tube de Pitot
5. Force de Magnus et portance

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

IV. Relation de Bernoulli

1. Énoncé et démonstration
2. Formule de Torricelli
3. Effet Venturi
4. Pression d'arrêt et tube de Pitot
5. Force de Magnus et portance

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

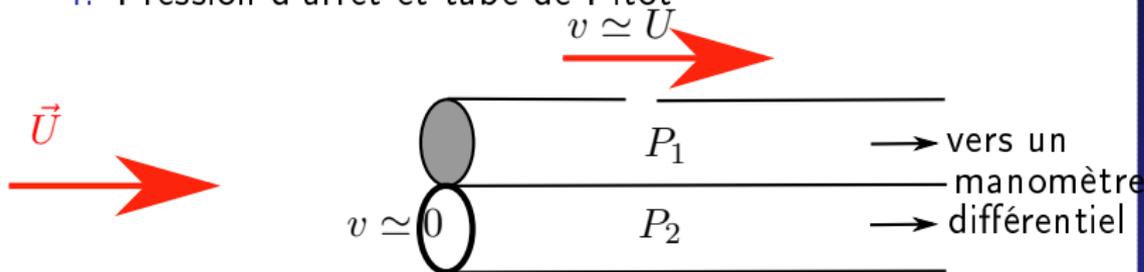
II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

IV. Relation de Bernoulli

1. Énoncé et démonstration
2. Formule de Torricelli
3. Effet Venturi
4. Pression d'arrêt et tube de Pitot



5. Force de Magnus et portance

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

IV. Relation de Bernoulli

1. Énoncé et démonstration
2. Formule de Torricelli
3. Effet Venturi
4. Pression d'arrêt et tube de Pitot
5. Force de Magnus et portance
 - a. Force de Magnus sur un cylindre en rotation
 - b. Portance d'une aile d'avion

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

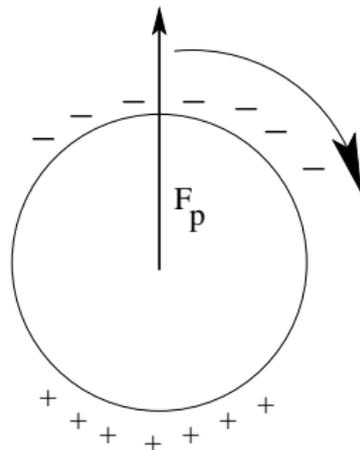
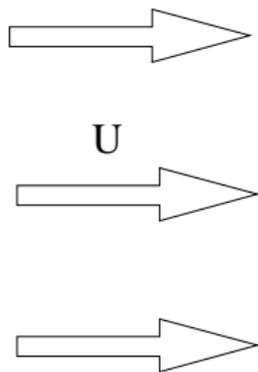
II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

IV. Relation de Bernoulli

1. Énoncé et démonstration
2. Formule de Torricelli
3. Effet Venturi
4. Pression d'arrêt et tube de Pitot
5. Force de Magnus et portance
 - a. Force de Magnus sur un cylindre en rotation



b. Portance d'une aile d'avion

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

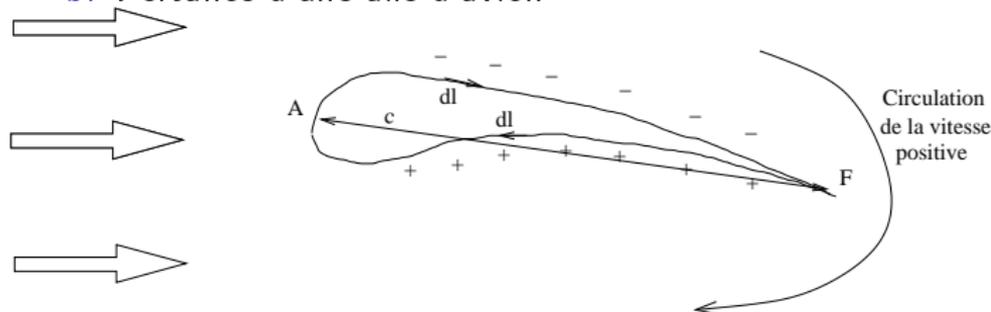
II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli

IV. Relation de Bernoulli

1. Énoncé et démonstration
2. Formule de Torricelli
3. Effet Venturi
4. Pression d'arrêt et tube de Pitot
5. Force de Magnus et portance
 - a. Force de Magnus sur un cylindre en rotation
 - b. Portance d'une aile d'avion

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueuxII. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulementsIII. Écoulement
parfaitIV. Relation de
Bernoulli

IV. Relation de Bernoulli

1. Énoncé et démonstration
2. Formule de Torricelli
3. Effet Venturi
4. Pression d'arrêt et tube de Pitot
5. Force de Magnus et portance

I. Dynamique
locale des
écoulements
visqueux

II. Nombre de
Reynolds et
régimes
d'écoulements

III. Écoulement
parfait

IV. Relation de
Bernoulli