Dynamique des fluides

Sommaire :

Fluide parfait et fluide réel

Débit volumique et débit massique

Equation de continuité

Théorème de Bernoulli

Effet Venturi

Perte de charges

Ecoulement laminaire et écoulement turbulent

Fluide réel – Fluide parfait

Dans la partie précédente, nous avons introduit certains outils (théorème de l'hydrostatique, Théorème de Pascal) et calculé la pression qui s'exerce sur le fluide.

En revanche, dans le cas de la dynamique des fluides, nous avons besoin d'autres outils et équations pour étudier le comportement des fluides. C'est ce que nous allons voir dans ce chapitre.

Evidemment, on ne pourra pas traiter de tous les aspects de la dynamique des fluides mais on cherchera à cibler les plus essentiels.

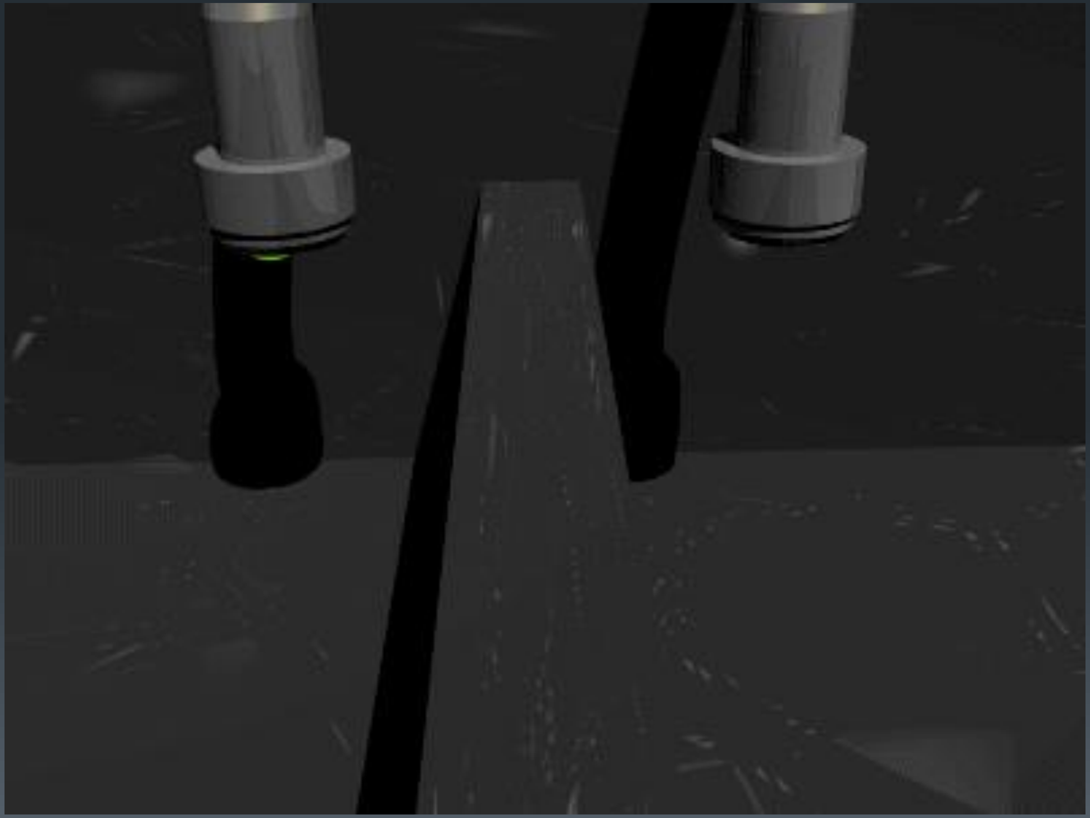
Fluide réel – Fluide parfait

La viscosité représente les frottements qui surviennent lorsque le fluide est en mouvement. Ces frottements peuvent être entre le fluide et les parois du contenant, ou entre les couches du fluide elles-mêmes.

La viscosité traduit donc la capacité de résistance à l’écoulement.

Fluide réel – Fluide parfait

La viscosité cinématique caractérise la résistance à l’écoulement d’un fluide sous l’effet de la gravité.

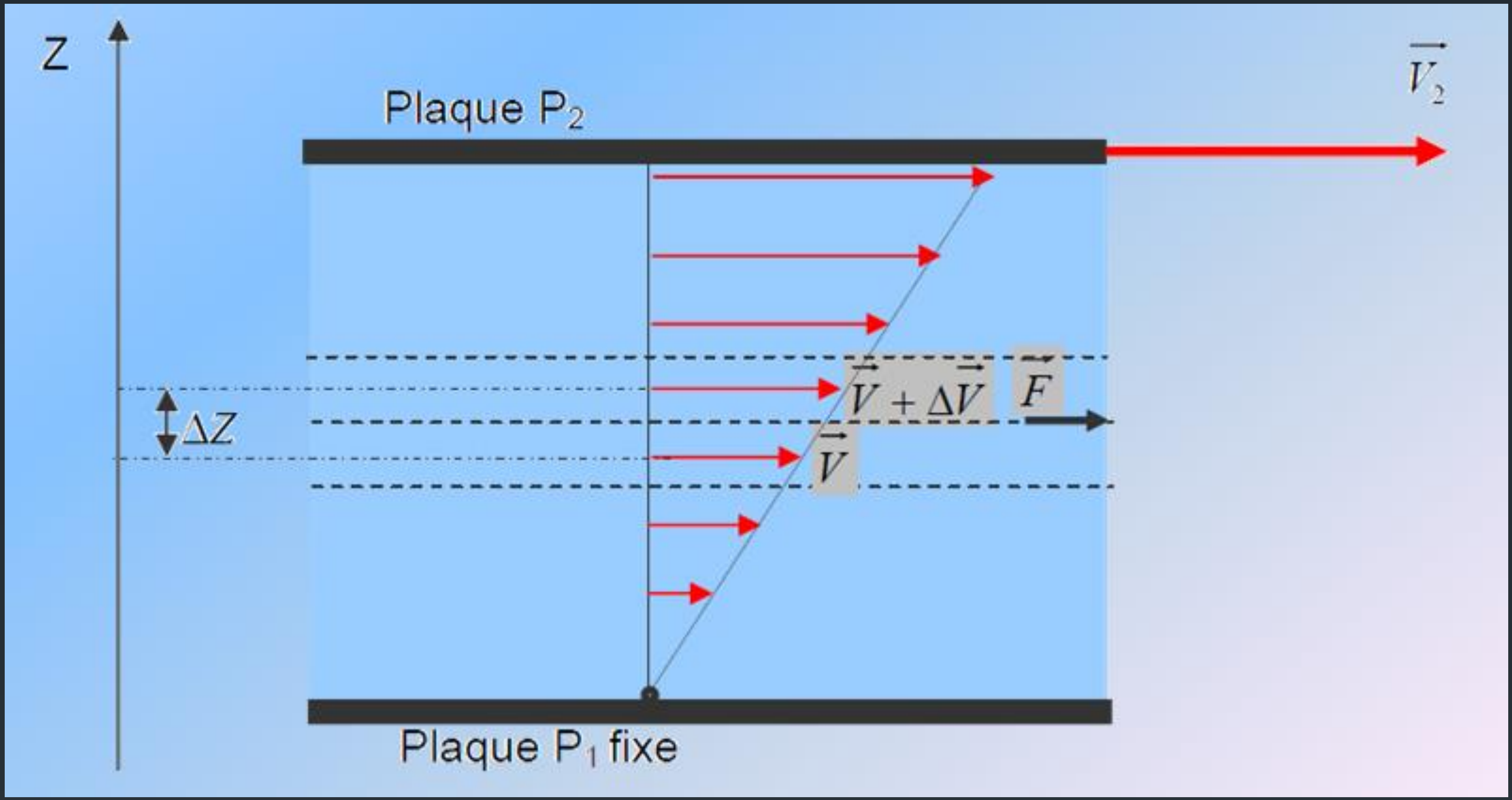


Fluide réel – Fluide parfait

La viscosité dynamique correspond à la réalité physique du comportement d'un fluide soumis à une sollicitation (effort).

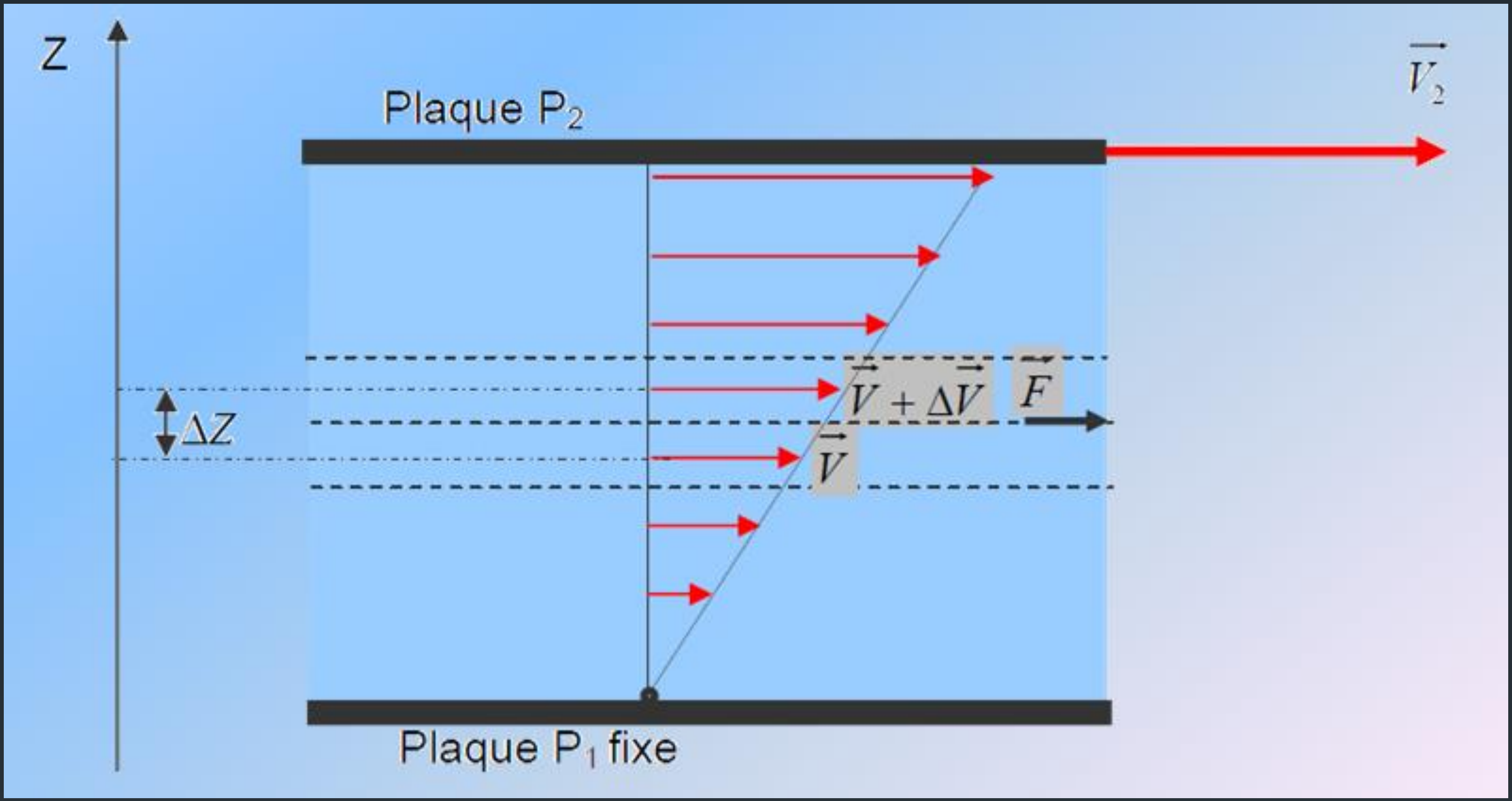
Elle exprime la « rigidité » d'un fluide à une vitesse de déformation en cisaillement.

Fluide réel – Fluide parfait



Par exemple, si on considère un fluide visqueux placé entre deux plaques P1 et P2. La plaque P1 est fixe et la plaque P2 est animée d'une vitesse V_2 .

Fluide réel – Fluide parfait



Si on représente par un vecteur, la vitesse de chaque particule située dans une section droite perpendiculaire à l'écoulement, la courbe lieu des extrémités de ces vecteurs représente le profil de vitesse.
Le mouvement du fluide peut être considéré comme résultant du glissement des couches de fluide les unes sur les autres.

La vitesse de chaque couche du fluide est fonction de la distance Z.

Fluide réel – Fluide parfait

Pour mieux caractériser le comportement d'un fluide, on distingue deux types de viscosité.

Viscosité dynamique :

$$F = \mu . S . \frac{\Delta V}{\Delta Z}$$

- F : force de glissement entre les couches en (N),
- μ : Viscosité dynamique en (kg/m.s),
- S : surface de contact entre deux couches en (m^2),
- Δ*V* : Écart de vitesse entre deux couches en (m/s),
- ΔZ : Distance entre deux couches en (m).

Unité SI :1 Pa·s = 1 Poiseuille = 1 kg/m·s

Remarque : ***Jean-Léonard-Marie Poiseuille*** *est un physicien et médecin qui a travaillé sur l'écoulement des fluides*

Fluide réel – Fluide parfait

L'autre type de viscosité est la viscosité cinématique. Elle est directement liée à la viscosité dynamique par la formule suivante :

$$\boxed{\upsilon = \frac{\mu}{\rho}}$$

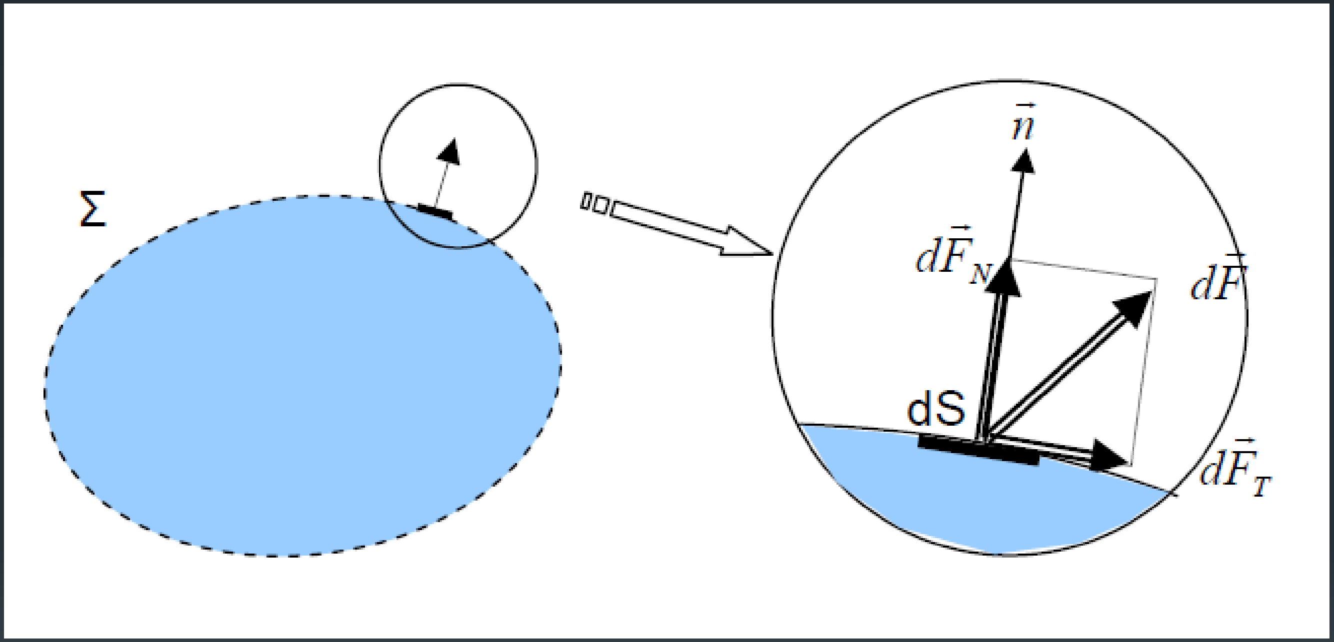
- μ : Viscosité dynamique en (kg/m.s),
- ρ : masse volumique en (kg/m^3)
- Unité SI :1 m²/s ou Stokes (St)   1 St = 10^{-4} m²/s

Pour les liquides , quand T° $\uparrow \Rightarrow \upsilon \downarrow$

Remarque : **George Gabriel Stokes** *est un physicien et mathématicien qui a travaillé sur l'écoulement des fluides*

Fluide réel – Fluide parfait

On considère le schéma ci-dessous où le fluide étudié est en bleu et entouré d'une ligne en pointillé. Le milieu extérieur est représenté en blanc.



- F_T = force tangentielle à dS F_N = force normale à la surface dS
- Fluide parfait : dFT = 0 Fluide réel : dFT $\neq$ 0

Fluide réel – Fluide parfait

Fluide parfait = Fluide non visqueux et athermique

- Pas de pertes de charge (frottements fluide/paroi et fluide/ fluide)
- Pas d'échange thermique
- Au repos, on peut considérer que : fluide réel = fluide parfait

Fluide réel – Fluide parfait

Récapitulatif de ce qu'on a traité jusqu'à présent :

- Fluides compressibles et incompressibles
- Masse volumique, poids volumique et densité
- Théorème de Pascal et Principe fondamental de l'hydrostatique
- Poussée d'Archimède

Statique

- Les types de viscosité (cinématique et dynamique)
- Fluide parfait / fluide réel

Dynamique

Ce qu'il nous reste à voir :

- Débit volumique et massique
- Equation de continuité
- Théorème de Bernoulli
- Pertes de charge
- Effet Venturi et types d'écoulement

Dynamique

Débit volumique et débit massique

On considère un écoulement stationnaire, c’est-à-dire que la vitesse d’écoulement est indépendante du temps.
Autrement dit la vitesse reste constante mais il peut y avoir des variations le long de l’écoulement si la section change.

Débits : Lorsqu’on travaille sur l’écoulement d’un fluide, par exemple dans une pompe, on distingue deux types de débits :

Débit volumique et débit massique

Débits : Lorsqu'on travaille sur l'écoulement d'un fluide, par exemple dans une pompe, on distingue deux types de débits :

Débit volumique :

$$Q_V = \frac{\text{Volume}}{\Delta t} = \text{Section x vitesse}$$

en $m^3/s = m^2.m/s$

Débit massique :

$$Q_m = \frac{\text{Masse}}{\Delta t} = \rho.S.v$$

en $kg/s = kg/m^3.m^2.m/s$

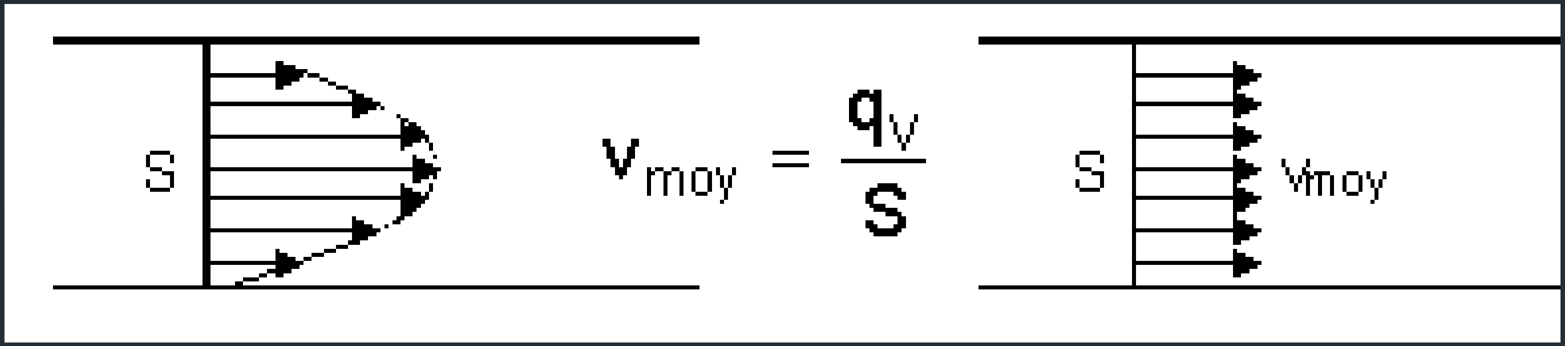
$$\boxed{Q_m = \rho \, Q_V}$$

Le débit volumique est une mesure de l'espace occupé par le fluide. Puisque les gaz sont compressibles, le débit volumique change quand la température et/ou la pression change.

Le débit massique est une mesure du nombre de molécules (et donc de la quantité de matière) en circulation. Il est basé sur un débit volumique dans des conditions précises.

Débit volumique et débit massique

$$Q_V = vitesse_{moy} \times S$$



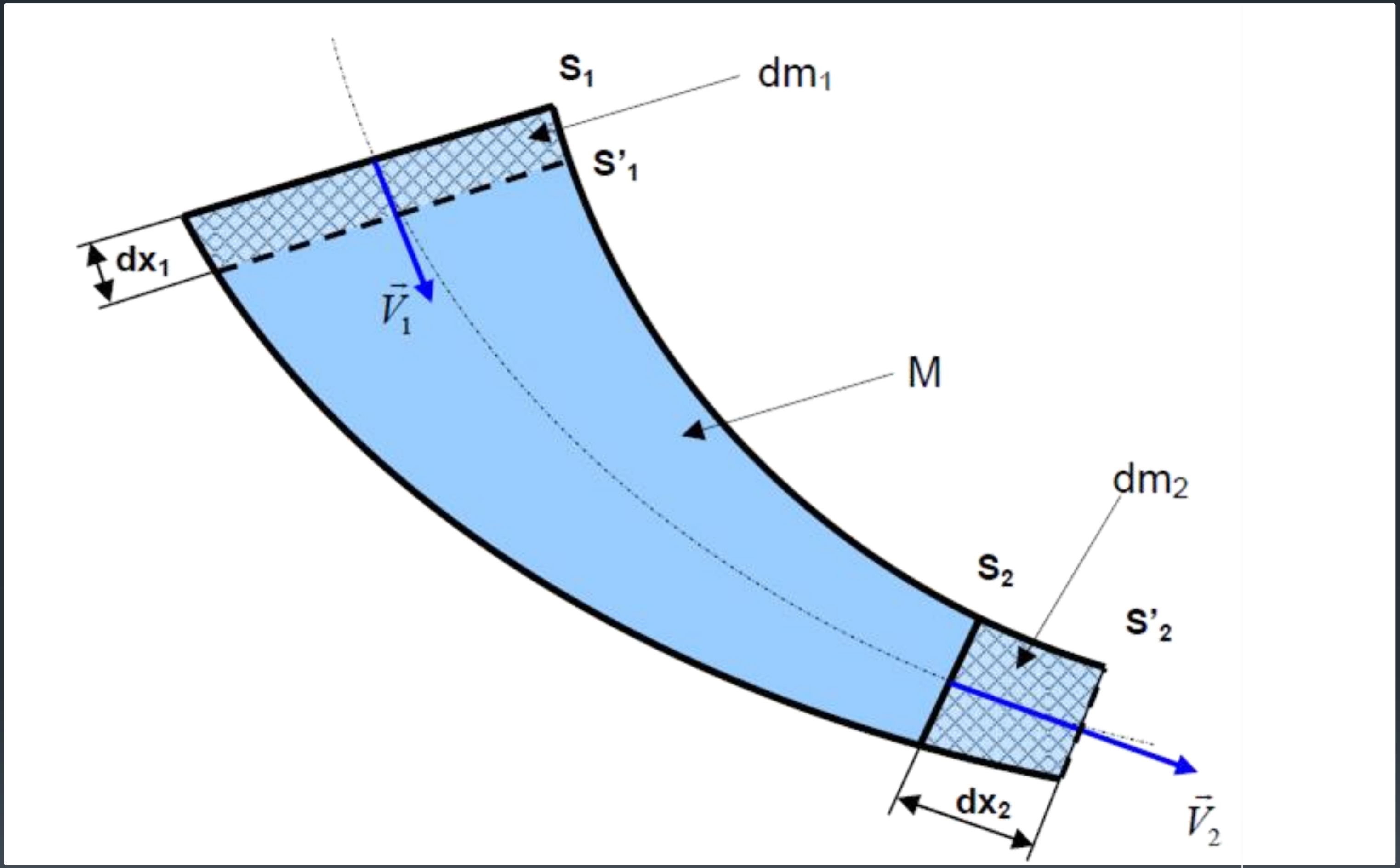
Fluide non parfait

Fluide parfait

Rappel : un fluide parfait a une viscosité nulle, donc pas de frottements entre couches ni contre les parois du contenant.

Equation de continuité

On considère la figure suivante.



Pour un écoulement stationnaire, on a l'égalité suivante :

$$d\ masse_1 = d\ masse_2$$

Equation de continuité

Pour un écoulement stationnaire, on a l'égalité suivante :

$$d\ masse_1 = d\ masse_2$$

$$\rho_1\ .dVolume_1 = \rho_2\ .dVolume_2$$

$$\rho_1\ .Section_1\ .dx_1 = \rho_2\ .Section_2\ .dx_2$$

$$\rho_1\ .Section_1\ .vitesse_1\ dt = \rho_2\ .Section_2\ .vitesse_2\ dt$$

Pour une même période dt, on a donc une conservation du débit massique

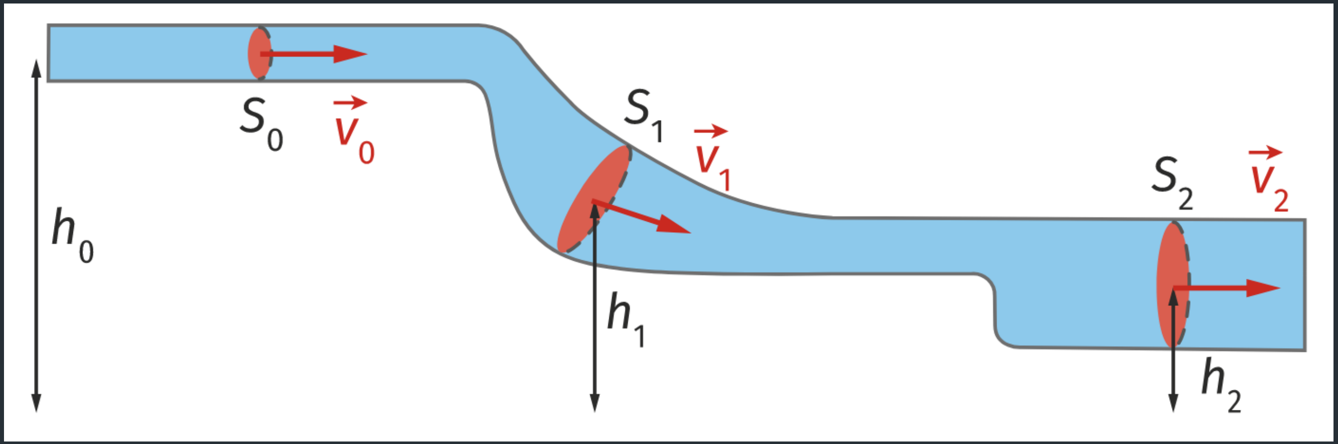
$$\boxed{\rho_1\ Section_1\ .vitesse_1 = \rho_2\ Section_2\ .vitesse_2}$$

Si de plus, le fluide est incompressible, alors on a aussi une *conservation du débit volumique*

$$\boxed{Section_1\ .vitesse_1 = Section_2\ .vitesse_2}$$

Equation de continuité

Le débit volumique d'un fluide incompressible en régime permanent est identique en tous points d'une canalisation où le fluide circule.



$$\boxed{S_0 V_0 = S_1 . V_1 = S_2 . V_2}$$

Lorsque la canalisation présente des différences de diamètres, **le débit reste toujours constant**, **c'est** donc **la vitesse du fluide qui varie** : elle augmente lorsque la section diminue et inversement.

<u>Conséquence:</u> la vitesse du fluide augmente lorsque la section diminue

Equation de continuité

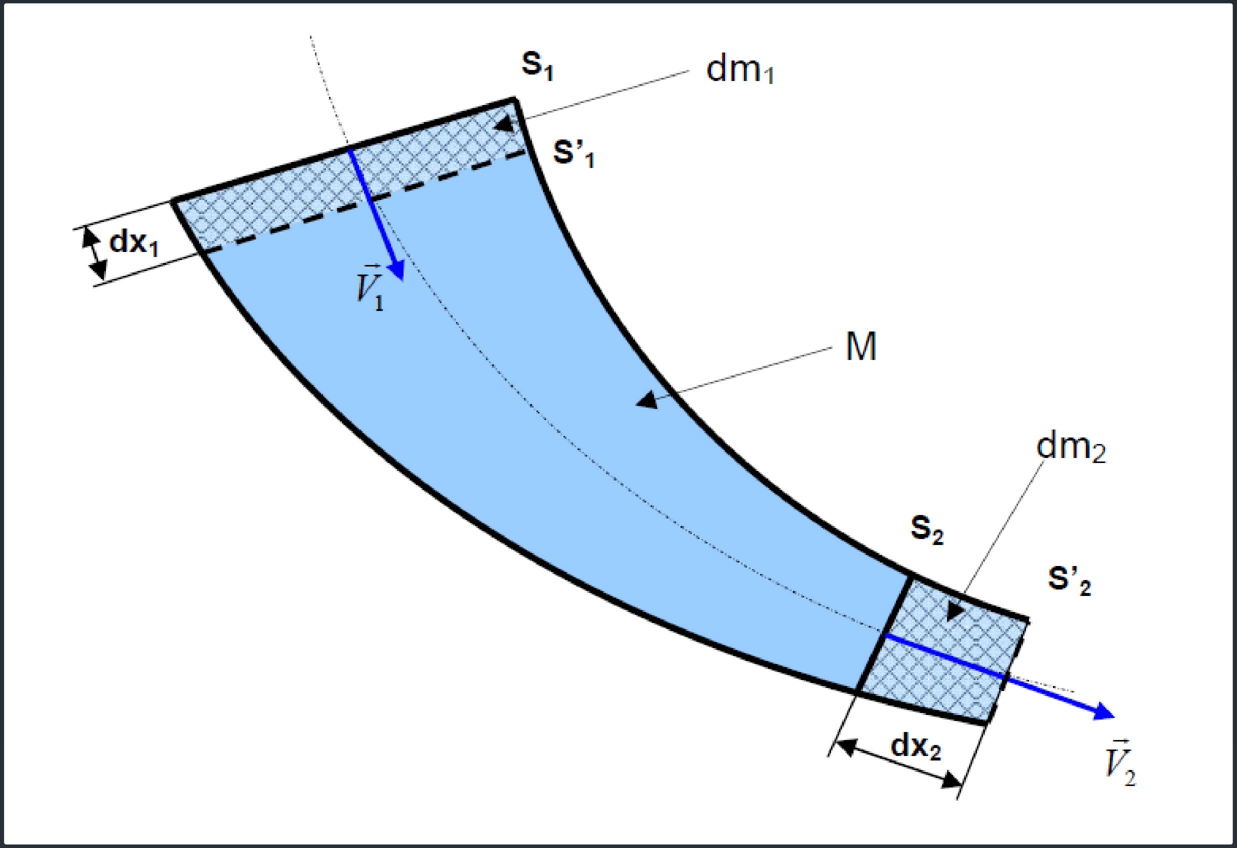
<u>Remarque :</u>

La loi de conservation de la masse (tout ce qui rentre finit par ressortir) permet d'expliquer qu'il y a alors nécessairement le **même débit en entrée et en sortie** en régime permanent.

Le débit volumique se conserve tout le long de la canalisation uniquement si le fluide est incompressible.

En effet si le fluide est compressible, celui-ci peut se comprimer par endroit (le volume diminue donc le débit aussi) et au contraire se détendre à d'autre (le débit augmente). Il n'y a que le débit massique qui se conserve toujours.

Théorème de Bernoulli

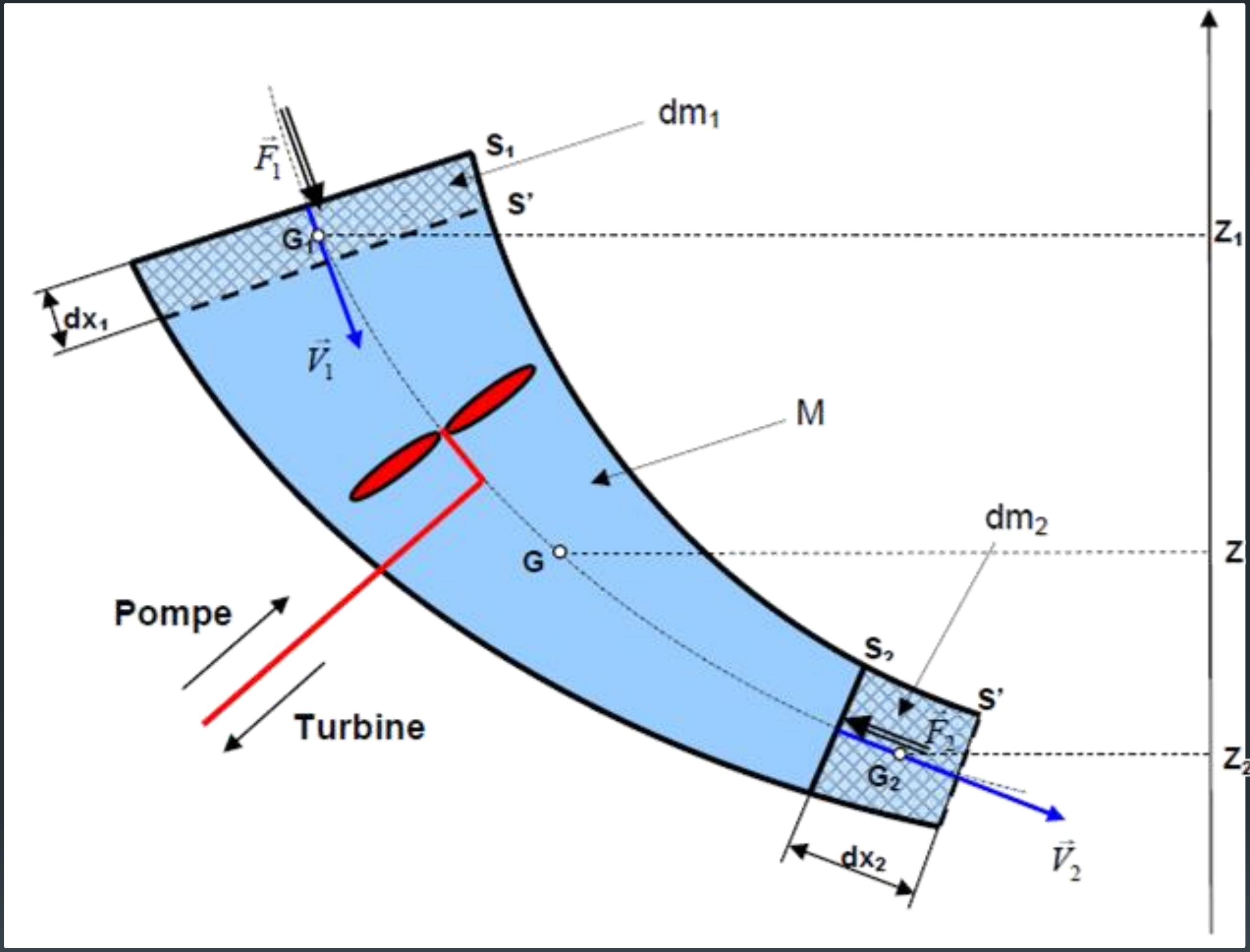


Enoncé :

Pour un fluide **parfait incompressible** en **régime permanent**, sans échange de travail, on a le long d'une **ligne de courant**:

$$\boxed{\frac{V_2^2}{2}+\frac{P_2}{\rho}+g.z_2=\frac{V_1^2}{2}+\frac{P_1}{\rho}+g.z_1}$$

Théorème de Bernoulli



Dans le cas d'un échange de travail, par exemple si une pompe fournit de l'énergie au fluide :

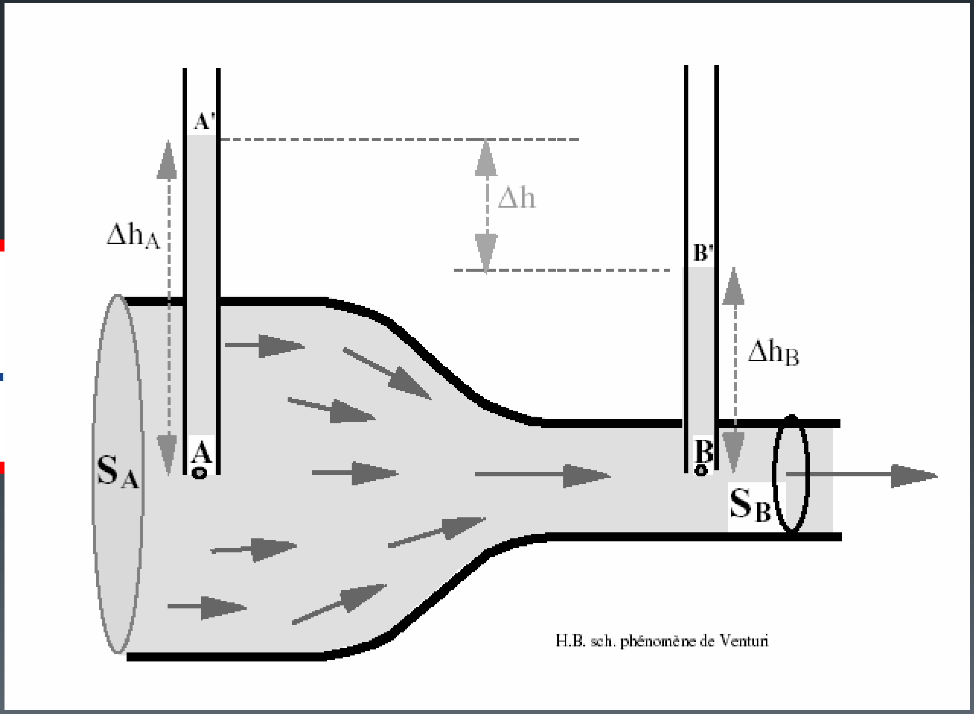
$$\boxed{\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + g(Z_2 - Z_1) = \frac{P_{net}}{q_m}}$$

Effet Venturi

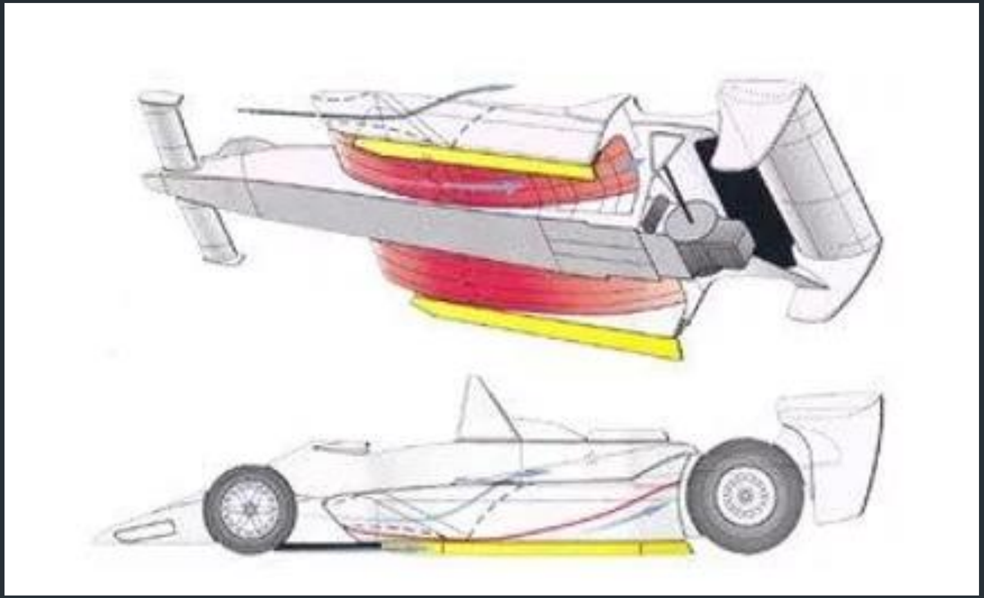
En partant du théorème de Bernoulli et en gardant les mêmes conditions (fluide parfait et incompressible, régime permanent), on explique l'effet Venturi.

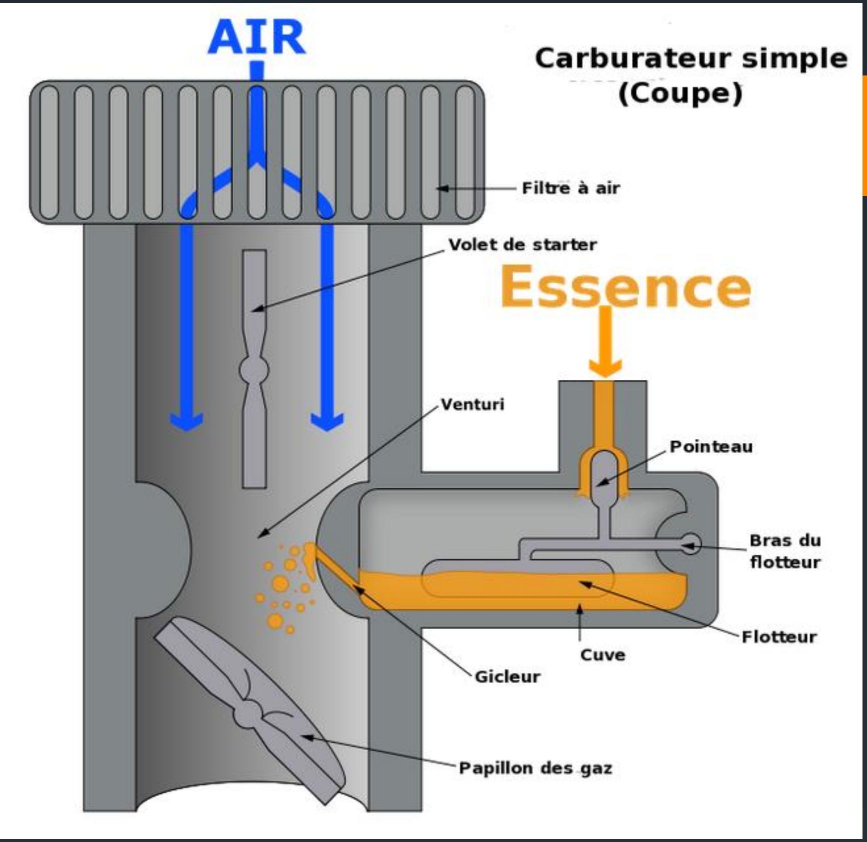
Effet Venturi :
Pour les conditions citées plus haut, et en gardant z constante (horizontale), si la vitesse d'écoulement d'un fluide augmente en un point, alors sa pression diminue en ce point.

$$\frac{V_2^2}{2}+\frac{P_2}{\rho}+g.z_2=\frac{V_1^2}{2}+\frac{P_1}{\rho}+g.$$



Effet Venturi

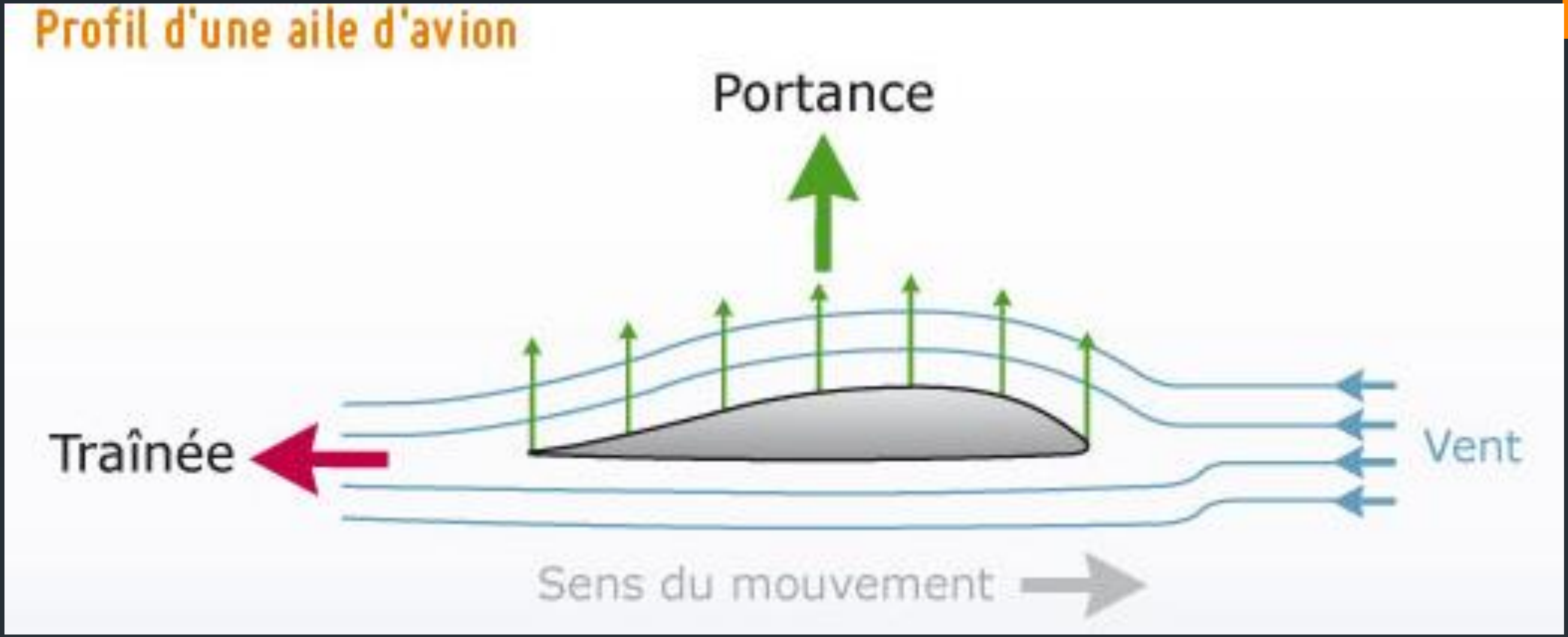




Effet Venturi exploité pour créer ce qu'on appelle l'effet de sol pour une formule 1

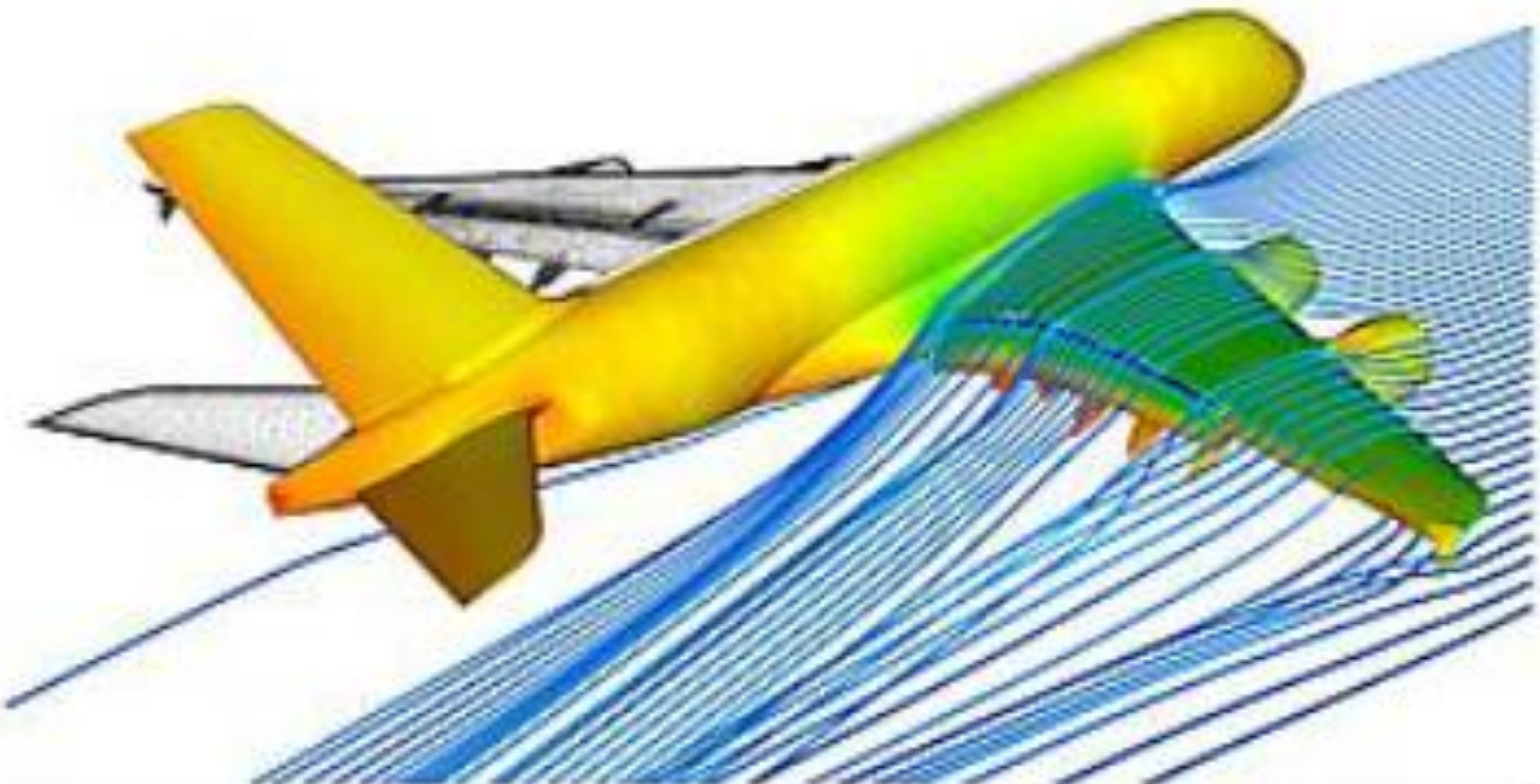
L'accélération du flux d'air crée une dépression qui aspire les gouttelettes d'essence, créant ainsi le mélange air/essence qui sera envoyé dans les chambres de combustion

Effet Venturi



L’effet de sol peut aussi participer à augmenter la portance d’une aile d’avion

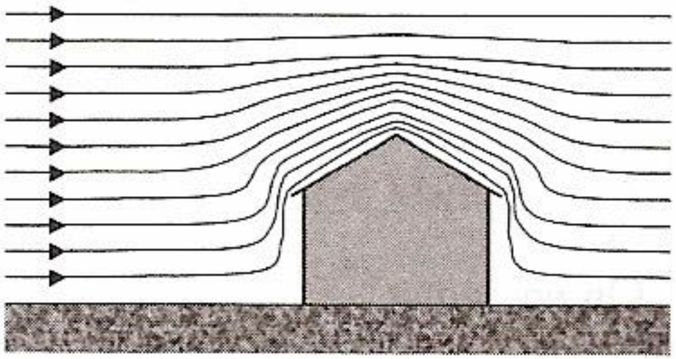
Effet Venturi



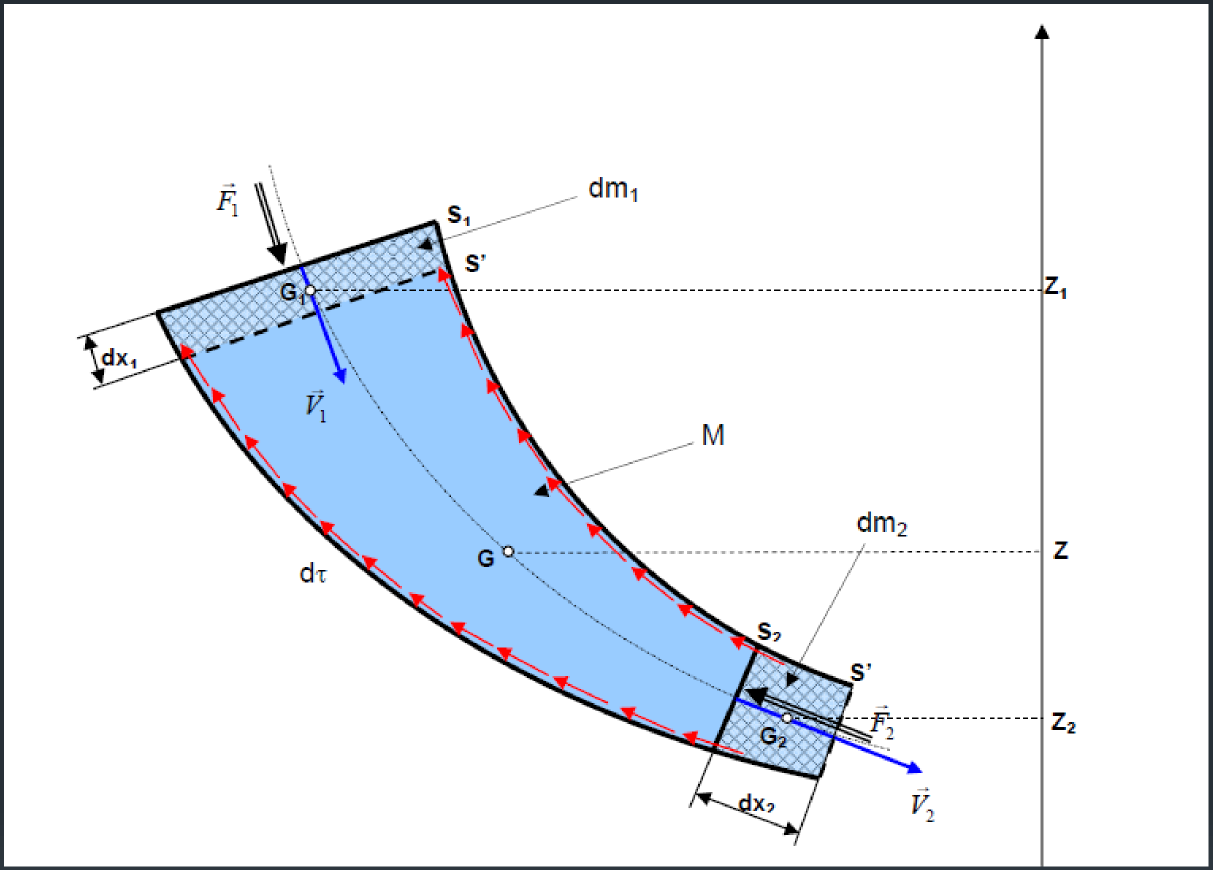
Numerical flow simulation on an Airbus A380. The pressure distribution during flight can be seen on the fuselage and the flow distribution on the right wing. The left wing shows what is known as a 'calculation mesh', which serves as basis for the simulation.

Effet Venturi

L'effet Venturi permet également de comprendre l'arrachement d'une toiture lors d'un fort coup de vent. Elle est aspirée par la dépression née de l'accélération de l'air à sa surface (et non parce que la pression atmosphérique est plus basse quand il y a du vent comme on le croit souvent !). Le même effet peut faire décoller tout obstacle insuffisamment arrimé au sol.



Effet Venturi

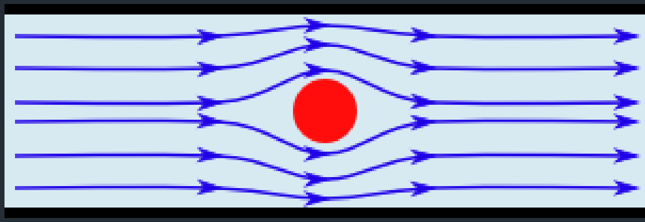


La vitesse réelle à l'intérieur de la canalisation est complexe à exprimer car elle dépend du type d'écoulement et de la position dans la canalisation. Pour un écoulement de fluide parfait elle est constante, mais dans les autres cas (fluides non parfaits) elle est plus importante au centre de la canalisation qu'aux bords.
De plus il faut aussi prendre en compte le type d'écoulement et les pertes de charge.

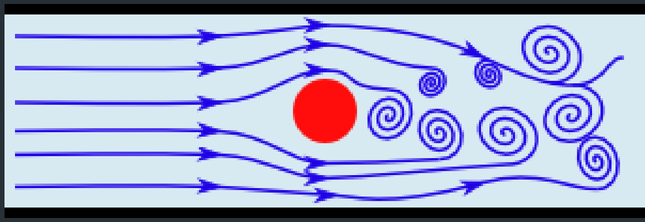
Ecoulement laminaire – Ecoulement turbulent

Parmi les outils importants en dynamique des fluides, on trouve la caractérisation de l'écoulement, en d'autres termes, on cherche à savoir si cet écoulement est dit :

- Laminaire : C'est le cas où l'ensemble du fluide s'écoule quasiment dans la même direction de façon assez régulière (les lignes de flux tendent à être parallèles)



- Turbulent : C'est le cas où l'écoulement comprend des tourbillons de tailles et forces variées.



Un écoulement laminaire est plus pratique dans le calcul des équations, notamment dans l'aéronautique car il est plus prévisible.
Il est aussi pratique dans le cas d'un fluide qui circule dans un tuyau car il y a moins de pertes de charge (qu'on expliquera plus tard)

Ecoulement laminaire – Ecoulement turbulent

Pour savoir si un écoulement est laminaire ou turbulent, on regarde la valeur du nombre de Reynolds. Il s'agit d'un nombre sans dimension qui dépend de la viscosité dynamique du fluide.

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

μ : Viscosité dynamique du fluide (kg/m.s),

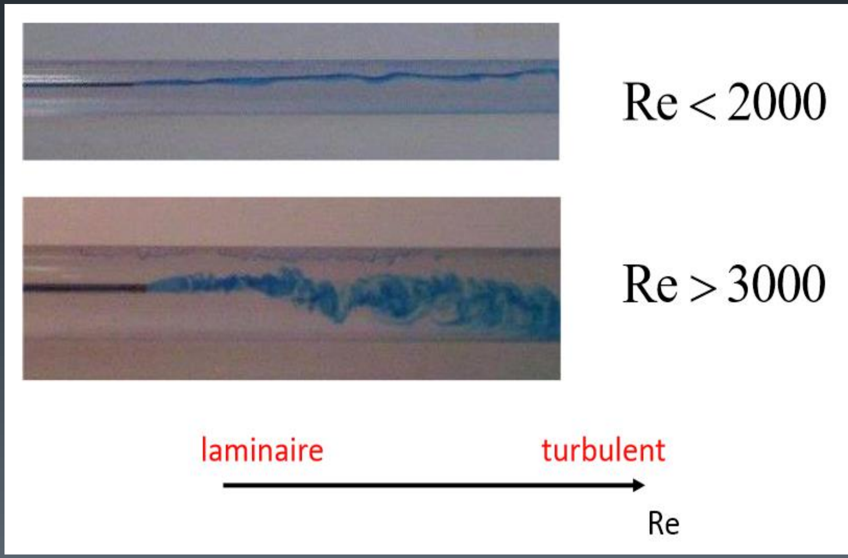
ρ : masse volumique du fluide (kg/m^3)

v : vitesse de l'écoulement (m/s)

D : dimension caractéristique de l'écoulement (m)

Si Re < 2000, écoulement laminaire

Si Re > 3000 à 4000, écoulement turbulent



Pertes de charges

Jusqu'à présent, nous avons parlé des conditions idéales (fluide parfait incompressible, écoulement stationnaire, régime laminaire …).

Il manque cependant un point essentiel. En effet, tout comme on parle de frottements dans la mécanique du solide, en utilisant notamment le modèle de Coulomb, en mécanique des fluides on parle de pertes de charges.

Qu'est ce que les pertes de charges ?

Les pertes de charge correspondant à la dissipation d'une partie de l'énergie mécanique d'un fluide en mouvement, à cause des frottements et des variations brusques de section ou de direction.

Pertes de charges

On distingue deux types de pertes de charges :

- Les pertes de charges **régulières** (aussi appelées linéaires ou systématiques) : Elles proviennent des frottements contre les parois

La valeur de ces pertes dépend des paramètres de conduite : longueur L, diamètre d, et vitesse de fluide.

La formule usuelle de calcul des pertes de charges régulières est la suivante :

$$\boxed{\Delta P_L = \lambda * \frac{L}{D} * \rho * \frac{v^2}{2}}$$

Avec :

- J_L : pertes régulières en pascal
- λ : coefficient de pertes avec $\lambda = \frac{64}{Re}$
- V : vitesse moyenne dans le conduit (m/s²)
- L : Longueur étudiée du conduit (m)
- d : diamètre du conduit (m)
- ρ : masse volumique (kg/m³)

Pertes de charges

D'autres façons d'exprimer les pertes de charges régulières existent, par exemple :

- Les pertes de charges peuvent aussi être exprimées comme une hauteur en mètres :

$$\Delta H = \lambda * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g}$$

Avec g l'accélération de pesanteur.

- Ou encore exprimées comme une énergie par unité de masse (Joule/kg) :

$$J_L = - \lambda * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2}$$

Le signe moins signifiant que l'énergie a été dissipée

Pertes de charges

On distingue deux types de pertes de charges :

- Les pertes de charges **singulières :** qui proviennent des changement brusques de section ou de direction (organe de liaison, coudes …)

La formule usuelle de calcul des pertes de charges singulières est la suivante :

$$\boxed{\Delta P_S = \xi * \rho * \frac{v^2}{2}}$$

Le coefficient de perte de charge ***ξ*** *(ksi)* ***dépend uniquement de la singularité****.*
Il est indépendant du fluide, de sa température et de son débit.

Une autre formule donnant les pertes singulières comme une énergie par unité de masse est la suivante :

$$\boxed{J_S = - \xi * \frac{v^2}{2}}$$

Pertes de charges

La somme des pertes de charges régulières et singulières nous donne les pertes totales qu'il faut rajouter dans l'équation de Bernoulli vue précédemment, c'est-à-dire que l'énergie du fluide au point 2 est égale à l'énergie du fluide au point 1 moins l'énergie qui a été perdue entre 2 et 1