

# DYNAMIQUE DES FLUIDES

## EXERCICES

### DF1 Cinématique d'écoulements bidimensionnels

On considère l'écoulement bidimensionnel d'un fluide parfait tel qu'en un point M (x, y), la vitesse du fluide est  $\vec{V} (kx, ky)$ , ou  $\vec{V} (-kx, ky)$ , ou  $\vec{V} (ky, kx)$ , ou  $\vec{V} (-ky, kx)$ .

Déterminer l'équation des trajectoires des particules et des lignes de courant.

Calculer l'accélération particulaire.

Caractériser l'écoulement

Même question avec l'écoulement de champ de vitesses  $\vec{V} (v_0 \cos\omega t, v_0 \sin\omega t)$ .

### DF2 Ecoulement de Couette cylindrique

On considère l'écoulement d'un fluide entre deux cylindres concentriques, de rayons  $R_1$  et  $R_2$ , tournant autour de leur axe commun aux vitesses angulaires  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$ . On propose un champ des vitesses du fluide de la forme :

$$\vec{V} = \left( Ar + \frac{B}{r} \right) \vec{e}_\theta$$

- Déterminer les constantes A et B en supposant la continuité des vitesses du fluide et des cylindres en  $R_1$  et  $R_2$ . Commenter le cas  $\Omega_1 = \Omega_2$ .
- Déterminer l'accélération d'une particule de fluide.

### DF3 Superposition d'écoulements

Déterminer le champ des vitesses résultant de la superposition d'un écoulement radial permanent et d'un écoulement orthoradial non permanent de vitesse angulaire  $\omega = b(1 + at)$ . Comparer lignes de courant, trajectoires et lignes d'émission.

### DF4 Fonction de courant

1) Montrer qu'à tout écoulement plan incompressible défini en coordonnées cartésiennes par  $\vec{v} (v_x, v_y)$ , il est possible d'associer une fonction scalaire  $\psi$  telle que  $\vec{v} = \overrightarrow{\text{rot}}(\psi(x, y)\vec{e}_z)$ .

2) Montrer qu'alors  $\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}\psi = 0$  et en déduire que les courbes d'équation  $\psi = \text{cste}$  s'identifient aux lignes de courant.

3) Appliquer ce résultat aux écoulements définis dans l'exercice 1

## DF5 Effet Magnus sur un cylindre immergé

On considère un cylindre de rayon  $a$  placé dans un écoulement incompressible permanent uniforme de vitesse  $V_0$  orthogonale à l'axe du cylindre. Cet obstacle déforme en son voisinage les lignes de courant. On recherche un écoulement possible potentiel dont on propose un potentiel des vitesses en coordonnées cylindriques sous la forme :  $\phi_1(r, \theta) = A \left( r + \frac{a^2}{r} \right) \cos \theta$

Montrer que ce potentiel vérifie toutes les équations et conditions imposées par le problème et en déduire le champ des vitesses du fluide. Déterminer la pression  $P(a, \theta)$  exercée par le fluide sur le cylindre et la force résultante associée. Commenter.

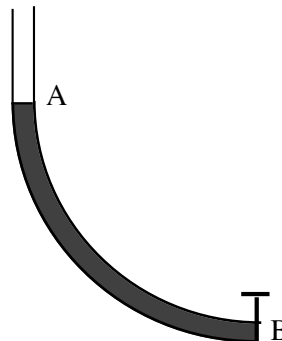
On suppose maintenant au contraire que le cylindre est en rotation autour de son axe à la vitesse angulaire  $\omega$  et le fluide, au repos loin du cylindre, entraîné par celui-ci en son voisinage par viscosité. On admettra alors que le fluide au contact du cylindre a même vitesse que celui-ci. On suppose encore un écoulement potentiel de potentiel  $\phi_2(r, \theta) = C\theta$ . Vérifier à nouveau la validité de ce potentiel et en déduire le champ des vitesses du fluide.

On superpose enfin les deux régimes. Calculer à nouveau le champ des vitesses, la pression  $P(a, \theta)$  exercée par le fluide sur le cylindre et la force résultante associée. Calculer la circulation  $\Gamma$  du champ des vitesses du fluide le long d'une courbe fermée quelconque entourant le cylindre et exprimer la force précédente en fonction de  $\Gamma$ .

## DF6 Un écoulement non permanent

Le tube AB a la forme d'un quart de cercle de rayon  $R$  et de section constante  $s$ . Il est rempli d'un fluide incompressible de masse volumique  $\rho$ .

A  $t = 0$ , on ouvre la vanne en B. Déterminer, juste après l'ouverture, la chute de pression en un point M quelconque du tube et l'angle  $\alpha(t)$  repérant le niveau supérieur du liquide qui s'écoule du tube.



## DF7 Temps de vidange d'un récipient

Un récipient à symétrie cylindrique, rempli d'un fluide incompressible sur une hauteur  $H$ , est percé à sa base d'un trou de section  $s$ .

- Quelle devrait être la loi d'évolution du diamètre  $D$  du récipient en fonction de l'altitude, pour que la hauteur de fluide restant dans le récipient à l'instant  $t$  soit une fonction affine de  $t$  ? Quelle serait une application possible d'un tel dispositif ?

## DF8 Equation de Bernoulli et thermodynamique

Un fluide considéré comme un gaz parfait est en écoulement stationnaire, irrotationnel et isentropique.

Montrer que l'équation de Bernoulli prend la forme :  $\frac{v^2}{2} + e_{pm} + h = \text{cste}$  où  $h$  est l'enthalpie massique du fluide.

Montrer que cette relation est en fait vérifiée pour tout fluide en écoulement isentropique et stationnaire.

## DF9 Etude d'une tuyère

Un gaz parfait est en écoulement unidimensionnel permanent dans une tuyère possédant un axe de révolution, de section variable  $S$ .

A une variation élémentaire  $dS$  de la section correspondent des variations  $dP$ ,  $d\rho$ ,  $dv$ ,  $dh$ ,  $dT$  de la pression  $P$ , de la masse volumique  $\rho$ , de la vitesse  $v$ , de l'enthalpie massique  $h$  et de la température  $T$  du gaz.

1) Exprimer la relation liant  $dS$ ,  $d\rho$ ,  $dv$ .

2) L'écoulement étant supposé isentropique, déterminer une relation liant  $dP$ ,  $d\rho$ , et la célérité  $c$  du son dans le gaz. Relier en outre  $dh$ ,  $dP$  et  $\rho$ .

3) Dans la tuyère, le gaz n'effectue aucun échange énergétique avec l'extérieur. En déduire une relation liant  $dh$  et  $dv$ .

4) Déduire des résultats précédents une relation directe entre  $dS$  et  $dV$  faisant intervenir la célérité  $c$  : cette relation constitue le théorème d'Hugoniot.

5) Le gaz est détendu dans une tuyère, la vitesse d'entrée du gaz dans la tuyère étant faible devant la célérité  $c$ . Montrer que la section de la tuyère doit d'abord diminuer (tuyère convergente). Cette section passe en fait par un minimum (tuyère convergente-divergente), encore appelé col. Discuter de la valeur de la vitesse après le col.

## DF10 Validité de la formule de Torricelli

Pour mieux comprendre la validité de l'approximation d'un régime stationnaire lors de l'étude de la vidange d'un récipient, le modèle non stationnaire suivant est proposé :

L'orifice du récipient est relié à une canalisation horizontale, de longueur  $L$ , de section constante  $s$  dans laquelle la vitesse du fluide est de la forme  $\mathbf{v} = v(x, t) \mathbf{e}_x$ .

A  $t=0$ , la vanne permettant au fluide de s'écouler est ouverte en B. La mise en vitesse du fluide est étudiée avec les hypothèses suivantes :

- la hauteur  $h$  dans le récipient varie très peu pendant cette phase transitoire.
- l'accélération locale du fluide n'est importante que dans la canalisation et une petite région du récipient proche de l'orifice.

1) Montrer qu'en fait  $v$  ne dépend que de  $t$  dans la canalisation.

2) Déterminer l'équation différentielle à laquelle obéit  $v(t)$

3) Intégrer cette équation en faisant apparaître une vitesse limite  $v_1$ .

4)  $h = 2 \text{ m}$   $L = 10 \text{ m}$  Évaluer le temps au bout duquel  $v$  ne diffère que de 5% de  $v_1$

5) A la lumière de ces résultats, commenter la validité de la formule de Torricelli

## DF11 Ecoulements de Couette et Poiseuille plans

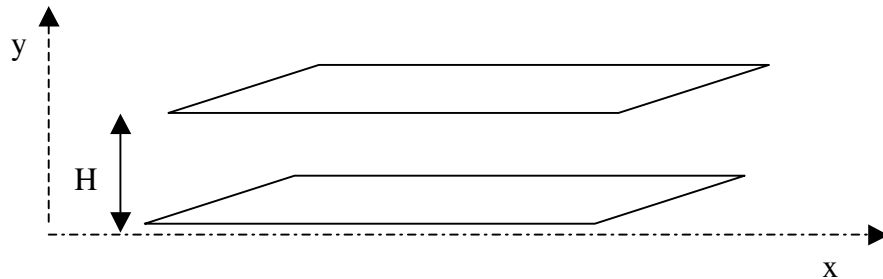
On considère l'écoulement unidimensionnel permanent d'un fluide de viscosité  $\eta$ , entre deux plans parallèles infinis distants de  $H$ . Le fluide sera supposé soumis aux seules forces de pression et viscosité.

L'écoulement est de la forme  $\vec{v} = v(y) \vec{e}_x$

Dans une première expérience, la pression au sein du fluide est constante et égale à  $P_0$ . L'écoulement est du au déplacement du plan supérieur à la vitesse  $V_0 \vec{e}_x$ , le plan inférieur restant fixe : il est alors appelé écoulement de Couette .

Déterminer le profil des vitesses  $v(y)$ , le débit volumique à travers une surface  $S$  orthogonale à l'écoulement, de hauteur  $H$  et de largeur  $L$  et la force surfacique exercée par le fluide sur chacun des plans.

Dans une deuxième expérience les deux plans sont fixes mais il existe un gradient de pression uniforme au sein du fluide, de la forme  $\vec{\text{grad}}P = -K \vec{e}_x$ . L'écoulement, du à ce gradient de pression est appelé écoulement de Poiseuille. Reprendre les questions précédentes.



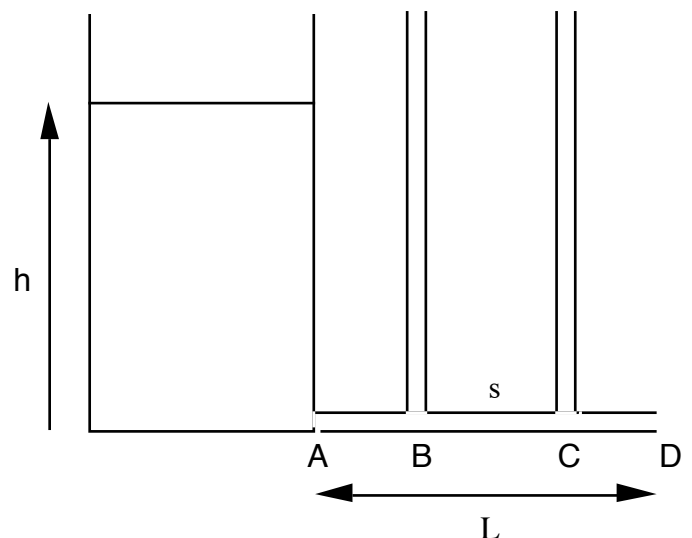
## DF12 Perte en charge

Un récipient de large section contient un fluide incompressible, de masse volumique  $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ , sur une hauteur  $h$ . Le récipient se vide lentement par un tube de section  $s = 5 \text{ mm}^2$  et de longueur  $L = 40 \text{ cm}$ .

On donne  $AB = CD = 10 \text{ cm}$ .

On suppose tout d'abord le fluide **parfait**.

Pour  $h = 85 \text{ cm}$ , déterminer la vitesse d'éjection en D, la répartition de vitesse et de pression dans le tube. A quel niveau monterait le fluide dans les tubes latéraux ? Comment évolue ce niveau au cours de l'écoulement du fluide ?



Le fluide est maintenant **réel**, de viscosité  $\eta$ . L'écoulement dans le tube est du type Poiseuille, c'est-à-dire que le fluide s'écoule sous la seule action d'un gradient de pression.

Le débit volumique de fluide est alors donné par la loi de Poiseuille :

$$D_v = \frac{\pi}{128\eta} \frac{\Delta P}{L} d^4$$

où  $\Delta P$  est la différence de pression entre les points A et D, et  $d$  le diamètre du tube.

On constate, pour  $h = 85$  cm, que le récipient perd un litre en 3 minutes. Déterminer la vitesse moyenne d'éjection  $U$ .

Quelle est la répartition de vitesse et de pression dans le tube ?

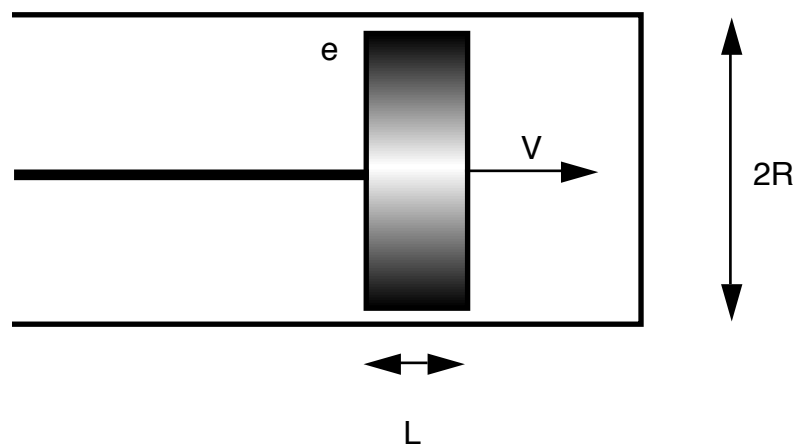
Les hauteurs de fluide dans les tubes latéraux sont respectivement égales à 60 et 20 cm. En déduire le gradient de pression dans le tube, et la valeur numérique du coefficient  $\eta$ .

Evaluer le nombre de Reynolds de l'écoulement.

Calculer enfin littéralement en fonction de  $L, U, \eta$  la force exercée par le fluide sur le tube d'éjection.

## DF13 Amortisseur hydraulique

On considère le dispositif représenté ci-dessous :



Le cylindre fixe contient un fluide visqueux incompressible. Le piston se déplace à une vitesse  $V$ , supposée variant lentement. Les forces de pesanteur sont négligées.

On néglige les effets courbure ( $e \ll R$ ) : on peut alors considérer que l'écoulement de fluide à travers la couronne périphérique (jeu du piston) s'effectue entre deux plans parallèles distants de  $e$ .

Montrer que l'incompressibilité du fluide implique effectivement un écoulement dans la couronne périphérique. Quel est le sens de cet écoulement ? Montrer alors qu'il existe nécessairement une différence de pression  $\Delta P$  entre les deux côtés du piston.

Déterminer le profil de l'écoulement dans la couronne, le débit volumique associé et en déduire une relation entre  $V$  et  $\Delta P$ .

Déterminer la force de viscosité et la résultante des forces de pression s'exerçant sur le piston. Comparer ces deux forces et conclure quant à l'emploi du dispositif.

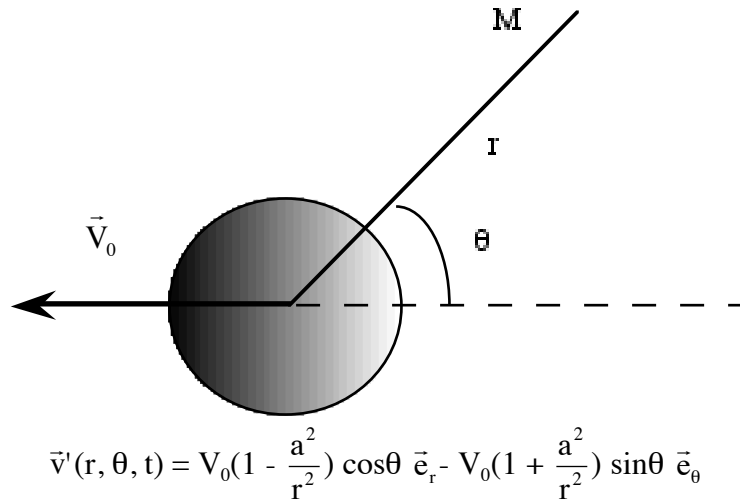
## DF14 Mouvement d'un fluide visqueux au contact d'un plan oscillant

On considère l'écoulement bidimensionnel d'un fluide visqueux occupant tout l'espace  $z > 0$ , et provoqué par le plan oscillant d'équation  $z = 0$ , tel qu'en un point  $M(x, z)$ , la vitesse du fluide est  $\vec{v}(x, z, t) = a \omega e^{-kz} \cos(\omega t - kx) \vec{e}_z$

- Déterminer l'équation des trajectoires des particules et des lignes de courant.
- Commenter la valeur de la vitesse en  $y = 0$  et quand  $y \rightarrow \infty$ .
- Calculer l'accélération particulaire.
- Caractériser l'écoulement.

## DF15 Cylindre en translation dans un fluide parfait

Un cylindre de rayon  $a$  est en translation rectiligne uniforme de vitesse  $\vec{V}_0$ , orthogonale à son axe, dans un fluide parfait initialement au repos. Dans un référentiel  $R'$  lié au cylindre, le champ des vitesses du fluide est de la forme :



- Donner l'allure des lignes de courant dans  $R'$
- Déterminer le champ des vitesses dans un référentiel fixe  $R$ . En déduire l'équation des lignes de courant dans ce référentiel.
- Montrer que les vitesses satisfont aux conditions aux limites dans les deux référentiels.
- Déterminer l'accélération particulaire dans  $R'$
- Caractériser l'écoulement dans  $R'$

On donne en coordonnées cylindriques :

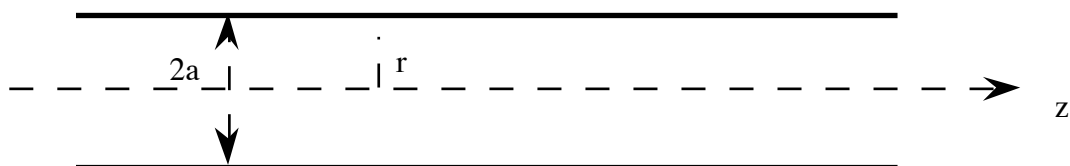
$$\text{div } \vec{g} = \frac{1}{r} \frac{\partial(r g_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial g_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial g_z}{\partial z}$$

$$\text{rot } \vec{g} = \left( \frac{1}{r} \frac{\partial g_z}{\partial \theta} - \frac{\partial g_\theta}{\partial z} \right) \vec{e}_r + \left( \frac{\partial g_r}{\partial z} - \frac{\partial g_z}{\partial r} \right) \vec{e}_\theta + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial(r g_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial g_r}{\partial \theta} \right) \vec{e}_z$$

## DF16 Fluide visqueux dans un capillaire

Dans une conduite cylindrique de rayon  $a$ , on considère l'écoulement d'un fluide visqueux dont le champ des vitesses est de la forme :

$$\vec{v} = V_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) \vec{e}_z$$



Déterminer le profil des vitesses dans le tube.

Caractériser cet écoulement et calculer le débit volumique du fluide dans la conduite. En déduire la vitesse moyenne du fluide dans le capillaire (vitesse débitante).

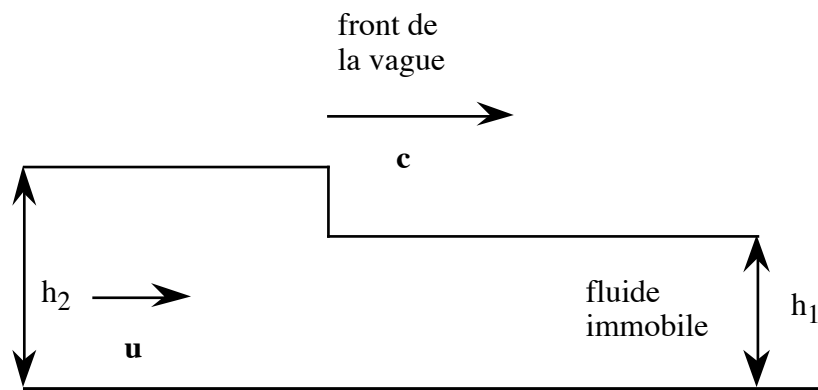
## DF17 Sphère pulsante dans un fluide incompressible infini

Un fluide incompressible occupe tout l'espace. En un point O on place une sphère pulsante de rayon  $a(t)$ .

Déterminer le champ des vitesses du fluide en tout point de l'espace et l'accélération particulaire correspondante. Caractériser l'écoulement.

## DF18 Propagation d'une vague

Une vague est modélisée par un front qui se propage à la vitesse  $c$ . Avant le passage de la vague, le fluide, incompressible, est immobile. Après son passage, il a la vitesse  $u$ . De même, la hauteur du fluide avant le passage de la vague est  $h_1$ , et  $h_2$  après son passage. En raisonnant dans un référentiel fixe ou dans un référentiel lié à la vague, déterminer une relation liant  $c$ ,  $u$ ,  $h_1$  et  $h_2$ .



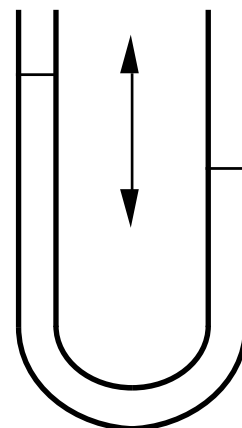
## DF19 Modèle simplifié de la houle

On considère l'écoulement bidimensionnel d'un fluide parfait tel qu'en un point M ( $x, y$ ), la vitesse du fluide est  $\vec{V} (v_0 \cos \omega t, v_0 \sin \omega t)$ . Caractériser l'écoulement et déterminer l'équation des trajectoires des particules et des lignes de courant.

## DF20 Oscillations d'un fluide dans un tube en U

Un tube en U, de section constante  $S$ , contient un fluide parfait incompressible, la longueur totale du fluide occupant le tube étant notée  $L$ .

Déterminer la période des oscillations du fluide dans le tube.



## DF21 Surface libre d'un fluide dans un récipient en rotation

Un récipient cylindrique est mis en rotation à vitesse angulaire constante  $\omega$  autour de son axe  $z$ . Il contient un fluide parfait incompressible dont l'écoulement est identique à celui d'une tornade de rayon  $a$  et de vecteur tourbillon  $\omega \vec{e}_z$ .

Etablir le champ de pression dans le fluide et en déduire la forme de la surface libre. Déterminer la dénivellation  $H$  entre les points d'altitudes extrêmes.

## DF22 Oscillations d'une bulle de gaz dans un fluide

Dans un fluide parfait incompressible remplissant tout l'espace existe une bulle de gaz de rayon variable  $a(t)$ . Ce gaz sera assimilé à un gaz parfait subissant des évolutions isentropiques.

En outre, du fait des forces de tension superficielle, il existe toujours entre la pression interne du gaz et la pression du fluide environnant une différence positive égale à  $\frac{2K}{a(t)}$  où  $K$  est une constante positive.

On supposera que loin de la bulle, le fluide est au repos, à la pression  $P_0$ , et que le gaz subit des petites évolutions autour de valeurs d'équilibre  $P_0$  pour la pression et  $\mu_0$  pour la masse volumique.

Établir le système d'équations différentielles permettant de déterminer l'évolution du rayon  $a(t)$  de la bulle.

## DF23 Régimes d'écoulement dans un canal

Un fluide parfait incompressible s'écoule dans un canal de section rectangulaire. On suppose que la largeur  $L$  du canal et la hauteur  $h$  de fluide dans le canal varient lentement tout au long de l'écoulement supposé en outre stationnaire et unidimensionnel.

Établir des relations de conservation entre  $L$ ,  $h$  et la vitesse  $v$  d'écoulement. On note  $D_v$  le débit volumique du fluide dans le canal, et  $H$  la hauteur de fluide pour une vitesse quasi-nulle.

Déterminer la relation donnant reliant  $D_v$  à la hauteur de fluide dans le canal. Étudier et tracer la fonction  $D_v(h)$  en un point du canal de largeur donnée. En déduire l'existence d'une valeur maximale du débit pour une hauteur critique  $h_c$ .

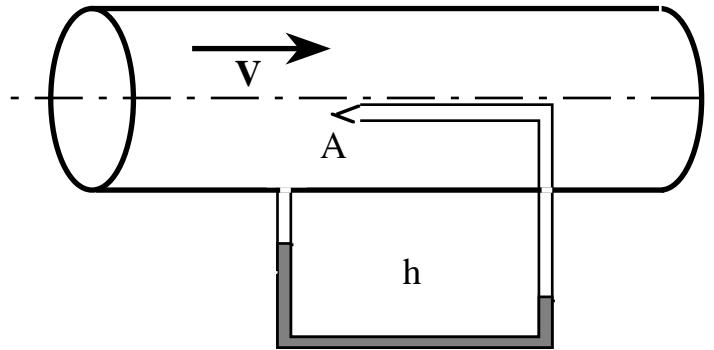
Montrer que pour un débit donné il existe deux valeurs possibles de la hauteur  $h$  correspondant à un régime dit torrentiel et à un régime dit fluvial. Calculer la vitesse du fluide pour  $h = h_c$ . Dans quel type de régime un mascaret peut-il remonter le canal ? Comment enfin la hauteur  $h$  est-elle modifiée quand  $L$  varie ?

## DF24 Tube de Pitot

On considère le tube de Pitot représenté ci-dessous :

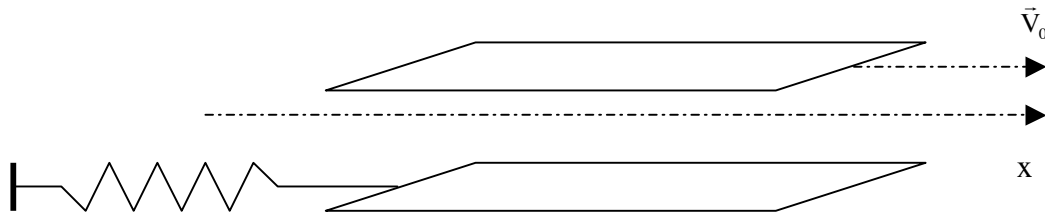
Le point A est dit point d'arrêt : la vitesse du fluide y est nulle et un petit orifice permet une prise de pression en A. Le tube contient un liquide de masse volumique  $\rho_0 > \rho$ .

Montrer que la mesure de  $h$  permet d'atteindre la vitesse du fluide en écoulement incompressible permanent.



## DF25 Ecoulement de Couette

On considère l'écoulement d'un fluide visqueux, de viscosité cinématique  $\nu$ , entre deux plans parallèles distants de  $D$ . Les forces de pesanteurs sont considérées comme négligeables dans l'écoulement et la pression est uniforme et vaut  $P_0$ .



L'écoulement est de la forme  $\vec{v} = v(y) \vec{e}_x$  : il est dû au déplacement du plan supérieur à la vitesse  $V_0 \vec{e}_x$ , le plan inférieur restant fixe. Déterminer le profil des vitesses  $v(y)$  et la force surfacique exercée par le fluide sur chacun des plans.

Le plan inférieur, de surface  $S$  est en fait maintenu fixe grâce à un ressort. Lorsque le fluide est au repos, le ressort possède sa longueur naturelle. Montrer que la mesure de son allongement quand le fluide est en mouvement permet la mesure de la viscosité.

## DF26 Ecoulement de Poiseuille

On considère l'écoulement d'un fluide visqueux dans un tube cylindrique de rayon  $R$ , parallèlement à l'axe  $z$  du tube, de sorte que la vitesse est de la forme  $\vec{v} = v(r) \vec{e}_z$ . L'écoulement est dû à un gradient de pression entre les deux extrémités du tube distants de  $L$ , de sorte que la pression est de la forme  $P(z) = P_0 - Kz$ . On néglige les forces de pesanteur.

$$\text{Pour ce type de géométrie : } \Delta \vec{v} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv}{dr} \right) \vec{e}_z$$

Déterminer le profil  $v(r)$ . Dans ce type de géométrie, la force surfacique de viscosité s'écrit  $\vec{f}_s = -\eta \frac{dv}{dr} \vec{e}_z$ . En déduire la force totale exercée par le fluide sur le tube qui le contient.

## DF27 Écoulement visqueux sur un plan incliné

On considère l'écoulement d'un fluide, de viscosité dynamique  $\eta$ , sur un plan incliné d'un angle  $\alpha$  sur l'horizontale, sous l'effet des forces de pesanteur. On supposera l'écoulement stationnaire, l'épaisseur de la couche de fluide restant constamment égale à  $H$ .

Déterminer le champ de pression au sein de fluide et le profil de vitesses.

## DF28 Viscosimètre à bille

Un tube cylindrique vertical contient un fluide de masse volumique  $\rho_0$  et de viscosité  $\eta$ . A sa partie supérieure, on y lâche sans vitesse initiale une bille sphérique, de rayon  $a$ , de masse volumique  $\mu$ . On suppose que la sphère subit de la part du fluide une force de traînée de type purement visqueux.

Déterminer l'équation différentielle à laquelle obéit la vitesse de chute de la bille. Quelle la vitesse limite atteinte ?

En supposant cette vitesse atteinte par la bille, on mesure le temps  $\tau$  entre les passages de la bille à deux altitudes différant de  $H$ . En déduire l'expression de  $\eta$ .

A.N.  $a = 1 \text{ mm}$ ,  $\mu = 7,9 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $\rho_0 = 1,26 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$  (glycérine),  $\tau = 28 \text{ s}$ ,  $H = 50 \text{ cm}$ .

## DF29 Écoulement visqueux sur un plan oscillant

On considère l'écoulement bidimensionnel d'un fluide visqueux, de viscosité cinématique  $\nu$ , occupant tout l'espace  $y > 0$ . Ce mouvement est provoqué par un plan oscillant d'équation  $y = 0$ , animé d'une vitesse  $\vec{V}_0 = a \cos \omega t \vec{e}_x$ .

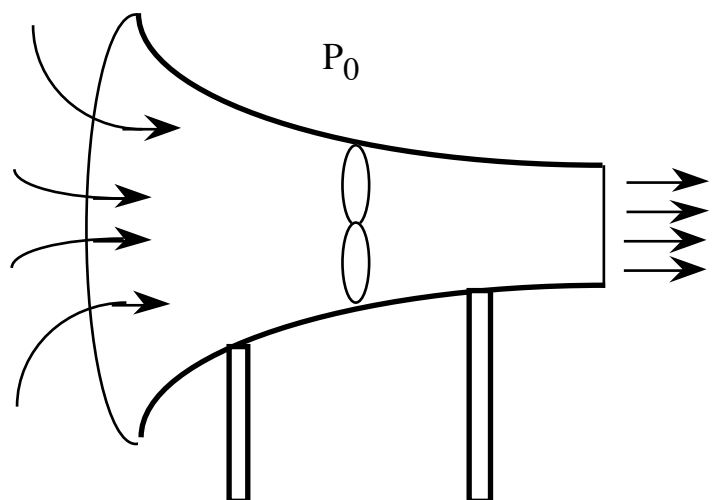
Déterminer l'équation différentielle à laquelle obéit le champ des vitesses dans le fluide. En déduire le profil des vitesses du fluide (on fera apparaître une distance caractéristique  $\delta$ ).

## DF30 Soufflerie

On schématise une soufflerie selon la figure ci-dessous :

L'air sera supposé un fluide parfait en écoulement incompressible, de masse volumique  $\rho = 1,3 \text{ g.l}^{-1}$ . On connaît les diamètres de la soufflerie à la sortie  $d_1 = 15 \text{ cm}$  et au niveau de l'hélice  $d_2 = 40 \text{ cm}$ . La vitesse de l'air rentrant sera supposée nulle et la vitesse de sortie est  $v_1 = 20 \text{ m.s}^{-1}$

Déterminer la différence de pression existant de part et d'autre de l'hélice, la puissance utile fournie par la soufflerie, la force exercée par le fluide sur l'hélice et la force que doit exercer un opérateur pour maintenir la soufflerie immobile.



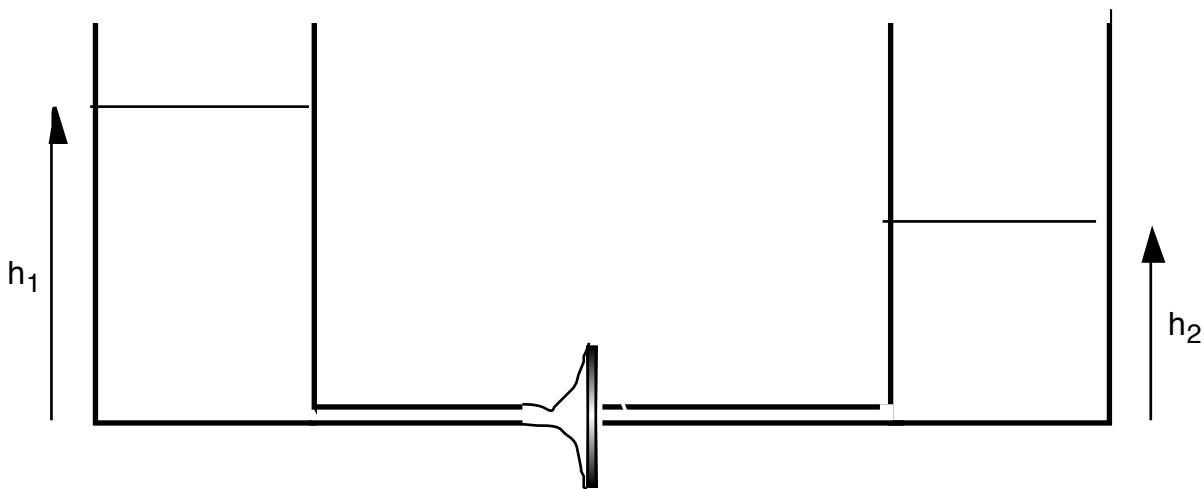
## DF31 Vanne hydraulique

Dans le dispositif ci-dessous, les deux réservoirs, de même section  $S$ , contiennent un même fluide parfait incompressible. Ils peuvent se vider par l'intermédiaire de 2 tuyaux de même section  $s \ll S$ , connectés à leur base.

Entre les orifices des 2 tuyaux se trouve une vanne mobile qui peut obturer l'un des orifices sous l'action du jet provenant de l'autre.

On appelle  $h_1$  et  $h_2$  les hauteurs de fluide dans les deux récipients. A quelle condition la vanne obture-t-elle le récipient de droite ? le récipient de gauche ?

Etudier l'évolution du système à partir d'une situation initiale où  $h_{10} > h_{20}$ , la vanne obturant le récipient de droite.



## DF32 Roue à aubes

Une roue à aubes est mise en mouvement par choc d'un jet d'eau sur l'extrémité des pales.

Le jet, de débit massique  $D$ , de vitesse  $V$  avant le choc, ruisselle après choc sur l'extrémité de la pale, à la même vitesse  $u$  que celle-ci.

Déterminer la puissance  $P$  transmise par le jet à la roue. Définir et calculer le rendement du système.

