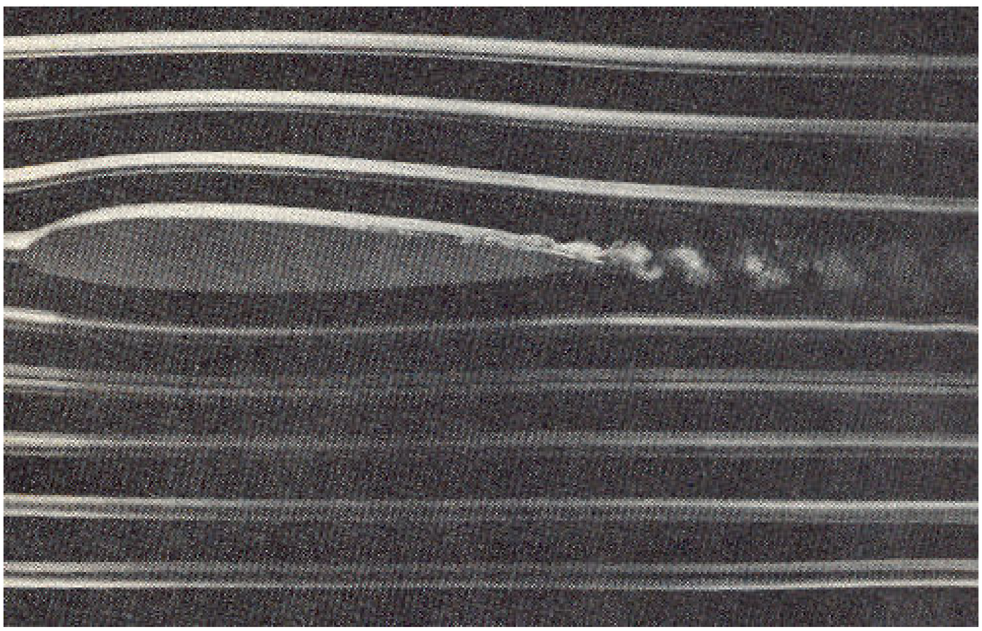
10 MÉCANIQUE DES FLUIDES

On sait qu'il y a une portance sur l'aile si l'aile pousse de l'air vers le bas. Par la 3e loi de Newton, si l'aile pousse l'air vers le bas, alors l'air pousse l'aile vers le haut. Pourtant, tout près de l'aile, l'air ne se déplace pas par rapport à l'aile. Alors, comment l'air génère-t-il une force sur l'aile ?



ffden-2.phys.uaf.edu/211.fall2000.web.projects/c.%20Schaefer/aero4.htm

Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.

10.1 LA FORCE DE PRESSION

La pression

Quand un fluide (liquide ou gaz) exerce une pression sur une paroi, la force exercée est

Force de pression (F_p)

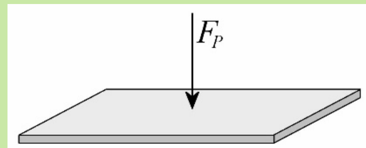
1) Grandeur de la force

$$F_p = PA$$

où P est la pression en pascal (qui sont des N/m²) et A est l'aire de la paroi.

2) Direction de la force

Force sur la paroi, perpendiculairement à la surface.

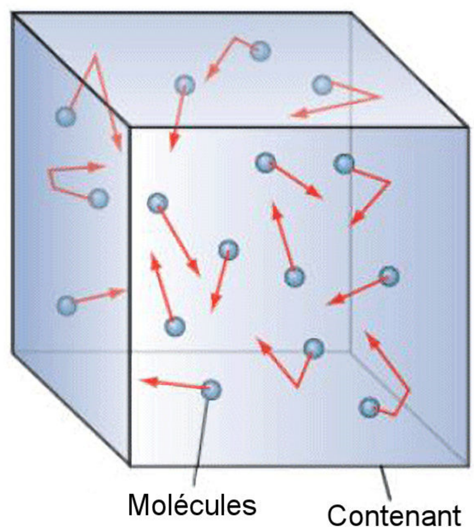


3) Point d'application de la force

Répartie également partout sur la surface de l'objet
(ce qui revient au même que de mettre le point d'application au centre de la surface).

Cette force de pression est produite par la multitude de collisions que les molécules du fluide font avec les parois du contenant dans lequel est le fluide.

Quand la pression est faite par l'air près du sol, il y a des milliards et des milliards de collisions chaque seconde (environ 10^{24}) par cm² et les molécules ont une vitesse de l'ordre de 380 m/s.



vacaero.com/information-resources/vac-aero-training/170466-the-fundamentals-of-vacuum-theory.html

La pression est mesurée en pascals, mais il y a d'autres unités pour mesurer la pression. On utilise aussi le bar (ou le millibar).

$$1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$$
$$1 \text{ mbar} = 0{,}1 \text{ kPa}$$

Cela signifie que la pression normale de l'air est de 1,013 bar ou de 1013 mbar.

Elle peut aussi être mesurée en atmosphères. Une atmosphère est égale à la pression atmosphérique normale, soit 101,3 kPa.

Unité 1	→ multiplier par ← diviser par	Unité 2
Atmosphère	101 300	Pascal

L'atmosphère standard

L'air est un fluide qui exerce une certaine pression. La pression normale de l'air est de 101,3 kPa au niveau du sol. Toutefois, elle varie selon les conditions météorologiques et l'altitude. Au niveau de la mer, la plus petite pression qui a été mesurée est de 87 kPa (au centre d'un ouragan) et la plus grande pression qui a été mesurée est de 108,5 kPa.

La pression de l'atmosphère diminue avec l'altitude. Plus on monte, plus la pression est basse. Elle varie aussi avec les conditions météorologiques, mais elle reste quand même assez près d'une valeur moyenne. Ce sont ces valeurs de température, de pression et de masse volumique qu'on donne les tables d'*atmosphère standard*.

Altitude pieds (m)	**Température °C**	**Pression kPa**	**Masse volumique kg/m³**
0	15,0	101,3	1,225
1000 (305)	13,0	97,7	1,190
2000 (610)	11,0	94,2	1,155
3000 (914)	9,1	90,8	1,121
4000 (1219)	7,1	87,5	1,088
5000 (1524)	5,1	84,3	1,056
6000 (1829)	3,1	81,2	1,024
7000 (2134)	1,1	78,2	0,993
8000 (2438)	-0,8	75,3	0,963
9000 (2743)	-2,8	72,4	0,934
10 000 (3048)	-4,8	69,7	0,905
11 000 (3353)	-6,8	67,0	0,877
12 000 (3658)	-8,8	64,5	0,849
13 000 (3962)	-10,7	62,0	0,823
14 000 (4267)	-12,7	59,5	0,797
15 000 (4572)	-14,7	57,2	0,771
16 000 (4877)	-16,7	54,9	0,746
17 000 (5182)	-18,7	52,7	0,722
18 000 (5486)	-20,6	50,6	0,698

Altitude pieds (m)	Température °C	Pression kPa	Masse volumique kg/m³
19 000 (5791)	-22,6	48,6	0,675
20 000 (6096)	-24,6	46,6	0,653
21 000 (6401)	-26,6	44,7	0,631
22 000 (6706)	-28,6	42,8	0,610
23 000 (7010)	-30,5	41,0	0,589
24 000 (7315)	-32,5	39,3	0,569
25 000 (7620)	-34,5	37,6	0,549
26 000 (7925)	-36,5	36,0	0,530
27 000 (8230)	-38,5	34,5	0,511
28 000 (8534)	-40,4	33,0	0,493
29 000 (8839)	-42,4	31,5	0,476
30 000 (9144)	-44,4	30,1	0,459
31 000 (9449)	-46,4	28,8	0,442
32 000 (9754)	-48,8	27,5	0,426
33 000 (10 058)	-50,3	26,2	0,410
34 000 (10 363)	-52,3	25,0	0,395
35 000 (10 668)	-54,3	23,9	0,380
36 000 (10 973)	-56,3	22,8	0,366
37 000 (11 278)	-56,5	21,7	0,348
38 000 (11 582)	-56,5	20,6	0,332
39 000 (11 887)	-56,5	19,7	0,316
40 000 (12 192)	-56,5	18,8	0,302

On peut calculer ces valeurs avec les formules suivantes.

La température est donnée par les formules suivantes.

La température de l'atmosphère standard (en °C)

Jusqu'à 11 000 m (36 089 pieds)

$$T = 15,0 - 0,0065 \cdot H \qquad \text{(Altitude en mètres)}$$

$$T = 15,0 - 0,00198 \cdot H \qquad \text{(Altitude en pieds)}$$

De 11 000 m (36 089 pieds) à 20 000 m (65 617 pieds)

$$T = -56,5$$

La pression est donnée par les formules suivantes.

La pression de l'atmosphère standard (en kPa)

Jusqu'à 11 000 m (36 089 pieds)

$$P = 101,325 \cdot \left(\frac{288,15}{T + 273,15} \right)^{-5,25577}$$

De 11 000 m (36 089 pieds) à 20 000 m (65 617 pieds)

$$P = 22,632 \cdot e^{-0,000\,157\,688 \cdot (H - 11000)} \qquad \text{(Altitude en mètres)}$$

$$P = 22,632 \cdot e^{-0,000\,048\,063\,3 \cdot (H - 36089)} \qquad \text{(Altitude en pieds)}$$

La masse volumique est donnée par la formule suivante (où la pression est en KPa).

La masse volumique de l'atmosphère standard (en kg/m³)

$$\rho = 3,483\,677 \cdot \left(\frac{P}{T + 273,15} \right)$$

Exemple 10.1.1

Quelles sont la température, la pression et la masse volumique de l'air à une altitude de 10 500 pieds ?

La température est

$$\begin{aligned} T &= 15,0 - 0,00198 \cdot H \\ &= 15,0 - 0,00198 \cdot 10\,500 \\ &= -5,79°C \end{aligned}$$

La pression est

$$\begin{aligned} P &= 101,325 \cdot \left(\frac{288,15}{T + 273,15} \right)^{-5,25577} \\ &= 101,325 \cdot \left(\frac{288,15}{-5,79 + 273,15} \right)^{-5,25577} \\ &= 101,325 \cdot \left(\frac{288,15}{267,36} \right)^{-5,25577} \\ &= 101,325 \cdot 0,674638 \\ &= 68,36 kPa \end{aligned}$$

La densité est

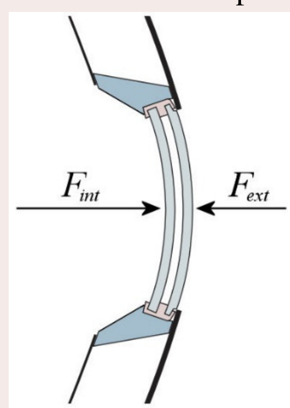
$$\begin{aligned}\rho &= 3,483\,677 \cdot \left(\frac{P}{T+273,15} \right) \\ &= 3,483\,677 \cdot \left(\frac{68,36}{-5,79+273,15} \right) \\ &= 3,483\,677 \cdot \left(\frac{68,36}{267,36} \right) \\ &= 0,891 \tfrac{kg}{m^3}\end{aligned}$$

Les effets du manque d'air commencent à se faire sentir quand la pression est inférieure à 70 kPa. Cela signifie qu'un avion qui n'a pas une cabine pressurisée ne pourra pas vraiment dépasser l'altitude de 10 000 pieds (où la pression est de 69,7 kPa).

On peut dépasser l'altitude de 10 000 pieds avec une cabine pressurisée. Habituellement, on maintient la cabine à une pression entre 75 kPa et 83 kPa, ce qui correspond environ à la pression de l'air à une altitude de 8000 pieds.

Exemple 10.1.2

Un avion vole à une altitude de 36 000 pieds. À cette altitude, la pression de l'atmosphère est de 22,7 kPa. La cabine de l'avion est pressurisée à 80 kPa. Quelle est la force de pression nette sur un hublot de l'avion si le hublot est de forme circulaire et qu'il a un diamètre de 30 cm ?



thepointsguy.com/news/what-are-airplane-windows-made-of/

L'air à l'intérieur fait une force vers l'extérieur et l'air externe fait une force vers l'intérieur. La force nette est la différence entre les deux.

Force de pression faite par l'air à l'extérieur de l'avion

La force faite par la pression est

$$F_{ext} = PA$$

Pour trouver cette force, il nous faut l'aire du hublot. Comme c'est un cercle, l'aire est

$$\begin{aligned}A &= \pi r^2 \\ &= \pi \cdot (0,15m)^2 \\ &= 0,070686m^2\end{aligned}$$

La force est donc

$$\begin{aligned}F_{ext} &= 22\,700Pa \cdot 0,070686m^2 \\ &= 1605N\end{aligned}$$

Force de pression faite par l'air à l'intérieur de l'avion

La force faite par la pression est

$$\begin{aligned} F_{int} &= PA \\ &= 80\,000 Pa \cdot 0{,}07686 m^2 \\ &= 5655 N \end{aligned}$$

Force nette sur le hublot

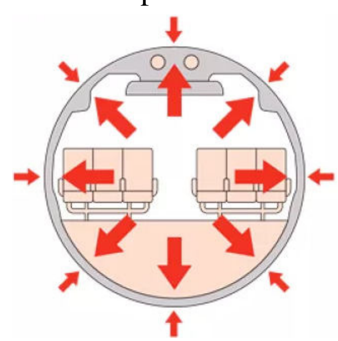
On a donc l'air externe qui pousse sur le hublot vers l'intérieur de l'avion avec une force de 1605 N et l'air interne qui pousse sur le hublot vers l'extérieur de l'avion avec une force de 5655 N. La force nette vers l'extérieur est donc

$$\begin{aligned} F_{nette} &= 5655 N - 1605 N \\ &= 4050 N \end{aligned}$$

C'est une force équivalente au poids d'un objet de 413 kg ! C'est beaucoup pour un petit hublot de 30 cm de diamètre.

Avec des forces aussi grandes en jeu, les constructeurs d'avions doivent arrondir les coins des hublots. Les coins des hublots rectangulaires sont des zones de faiblesse d'où peuvent commencer des fractures du fuselage. Quelques accidents ont été causés par ces hublots rectangulaires dans les années 50.

La force n'agit pas que sur les hublots. Elle agit en fait partout sur la surface de la cabine. Avec une pression externe de 22,7 kPa et une pression interne de 75 kPa, il y a une force nette vers l'extérieur de près de 5 N sur chaque centimètre carré de la cabine. L'avion a intérêt à être solidement construit.



www.newsweek.com/boeings-737-airplane-prone-problems-63629

Cette force fait aussi en sorte qu'il est impossible d'ouvrir la porte d'un avion pressurisé en plein vol à haute altitude. La force nette pousse sur la porte vers l'extérieur avec une force d'environ 100 000 N ! Comme cette force est vers l'extérieur, on fabrique les portes pour que la force les écrase contre le fuselage quand l'avion vole. Sur ce vidéo, on voit que la porte fermée est un peu plus grande que l'ouverture dans le fuselage, ce qui lui permet de s'appuyer sur le fuselage. Quand on veut ouvrir la porte, on doit faire en sorte que les extensions de la porte se replient pour que la porte puisse passer dans l'ouverture.
https://www.youtube.com/watch?v=WLIPXWVbEDw
En vol à haute altitude, la force de 100 000 N est une force qui écrase les extensions de la porte contre le fuselage. Cela signifie aussi que si vous voulez ouvrir la porte, vous allez devoir exercer une très grande force pour replier les extensions. La force nécessaire est si grande que c'est impossible.

Il arrive parfois que la cabine se dépressurise. Si la pression de la cabine diminue trop, les personnes dans l'avion vont manquer d'oxygène et, en manque d'oxygène, on prend de très mauvaises décisions. Le tableau suivant vous donne le temps nécessaire avant que les capacités cognitives diminuent (*time of usefull consciousness*) en fonction de la pression (et de l'altitude correspondante).

Pression kPa	Altitude Pieds (mètres)	Temps
50,5	18 000 (5500)	10 à 15 minutes
42,8	22 000 (6700)	5 minutes
37,7	25 000 (7600)	1,5 à 3,5 minutes
32,9	28 000 (8550)	1,25 à 1,5 minute
30,1	30 000 (9150)	30 à 60 secondes
23,9	35 000 (10 650)	15 à 30 secondes
18,9	40 000 (12 200)	7 à 10 secondes
16,3	43 000 (13 100)	5 secondes
11,6	50 000 (15 250)	5 secondes

Si le manque d'oxygène se poursuit, la personne va perdre connaissance. C'est pour ça que des masques à oxygène se déploient si la pression diminue trop dans la cabine. Une réaction chimique va fournir de l'oxygène aux passagers pendant environ 13 minutes. Évidemment, les pilotes ont des masques à oxygène qui peuvent fournir de l'oxygène pendant beaucoup plus de temps. Essentiellement, les pilotes doivent ramener l'avion à une altitude inférieur à 10 000 pieds quand la pressurisation de la cabine est compromise et ils doivent le faire en moins de 10 minutes.

Si une porte, une cloison ou une partie du fuselage cède d'un coup (ce qui peut arriver considérant les forces importantes générées par les différences de pression), la baisse de la pression sera brutale dans l'avion si ce dernier est à une altitude élevée. C'est ce qu'on appelle une *décompression explosive*. La baisse soudaine de pression va fort probablement provoquer une condensation de l'humidité de l'air, ce qui fera apparaitre un brouillard dans la cabine. Ces films montrent ce brouillard qui apparait quand il y a une dépressurisation rapide (mais pas explosive).
https://www.youtube.com/watch?v=IyBRGhXBuGw
https://www.youtube.com/watch?v=OR102rcg2Ak
Ce film montre une décompression explosive
https://www.youtube.com/watch?v=6Efvl6AwILo
Plusieurs passagers confondent souvent ce brouillard avec de la fumée et pensent qu'une bombe a explosé dans l'avion, d'autant plus que la décompression est un genre d'explosion qui fait pas mal le même bruit que l'explosion d'une bombe.

Même si elle peut être vraiment traumatisante pour les gens à bord de l'avion, la décompression explosive mène rarement à l'écrasement de l'avion. Les pilotes ramènent l'avion sous les 10 000 pieds pour que les gens puissent respirer puis se rendent à un aéroport sans problèmes majeurs. Toutefois, les choses ne se passent pas toujours aussi bien. D'ailleurs, les deux pires accidents de l'histoire impliquant un seul avion ont été provoqués par des dépressurisations explosives.

Le 12 aout 1985, la cloison arrière d'un Boeing 747 de Japan Airlines a soudainement cédé. L'air de la cabine a alors été soufflé dans la gouverne de direction. Ce puissant flux d'air qui cherchait à sortir de l'avion a alors arraché la gouverne de direction, ce qui a coupé les 4 systèmes hydrauliques du Boeing qui était tous relié à la gouverne. Sans systèmes hydrauliques, les pilotes ne pouvaient plus diriger l'avion. Au bout de 32 minutes, l'avion s'est écrasé sur le flanc du mont Takamagahara. 520 des 524 personnes à bord de l'avion ont péri (Mayday, saison 3, épisode 3 et saison 23, épisode 3).

Deux DC-10 ont subi une décompression explosive dans les années 70 puisqu'il y avait un défaut dans le design du mécanisme de verrouillage de la porte-cargo de ces avions. Cela a provoqué l'écrasement d'un de ces DC-10 le 3 mars 1974 (vol 981 de Turkish Airlines), entrainant la mort des 346 personnes à bord. Quand la porte s'est arrachée, le système principal et les 2 systèmes de secours de câbles servant à contrôler l'avion ont été sectionnés, ce qui a mené à une perte de contrôle (Mayday, saison 5, épisode 3).

L'air qui sort de la cabine peut même entrainer quelques passagers vers l'extérieur.
https://www.youtube.com/watch?v=EHGBQINW0B0
On a une telle aspiration dans cette scène de World War Z
https://www.youtube.com/watch?v=rDdqifhua8k (Avancer à 3:35)
Pour être aspiré à l'extérieur, l'avion doit être à une altitude assez élevée et le trou doit être très grand pour que l'air sorte très rapidement. Comme l'air sort rapidement, la pression de la cabine va s'équilibrer en quelques secondes avec la pression externe. Passé ce délai, l'air ne sort plus de l'avion. Vous pouvez donc être aspiré à l'extérieur de l'avion uniquement durant les quelques secondes qui suivent la formation du trou dans le fuselage. La scène de World War Z exagère un peu trop cette durée. Le volume de la cabine doit aussi être assez grand. Une petite cabine contient peu d'air et le flux d'air vers l'extérieur ne sera pas assez grand pour entrainer quelqu'un. Cette scène de James Bond (Goldfinger) n'est donc pas très réaliste.
https://www.youtube.com/watch?v=pHXevnoAciY
(Ici aussi, la durée de la sortie de l'air par le hublot est beaucoup trop grande.)

Le 24 février 1989, une partie du fuselage s'arrache d'un Boeing 747 de United Airlines. Les pilotes sont parvenus à poser l'avion à Honolulu, mais 9 personnes manquaient à l'appel (Mayday, Saison 1, épisode 1).

confessionsofatrolleydolly.com/2021/02/24/panic-over-the-pacific-the-crew-of-united-airlines-flight-811/

Le 28 avril 1988, une partie importante du fuselage d'un Boeing 737 de Aloha Airlines se détache lors d'un vol entre 2 iles hawaïennes. Une agente de bord a été aspirée vers l'extérieur de l'avion par la sortie rapide de l'air (Mayday, Saison 3, épisode 1).

planecrash.fandom.com/wiki/Aloha_Airlines_Flight_243

Le 10 juin 1990, un des hublots du cockpit d'un BAC 1-11 de British Airways est soufflé vers l'extérieur. La décompression rapide entraine le capitaine vers l'extérieur, mais l'équipage parvient à l'empêcher de sortir complètement de l'avion. Pendant que tout le haut du corps du pilote est ballotté par l'air et qu'un membre de l'équipage le tient par les jambes (pendant 21 minutes !), le copilote parvient à poser l'avion. Le pilote est sérieusement blessé, mais il a survécu. Le hublot a cédé parce qu'on avait remplacé les boulons fixant le hublot à l'avion par des boulons avec un diamètre à peine plus petit que les boulons d'origine lors d'une réparation (Mayday, saison 2, épisode 1).

14 mai 2018, une fenêtre du cockpit d'un Airbus A319-100 se fissure puis éclate en morceau quelques secondes plus tard alors que l'avion vole à 30 000 pieds. Le copilote est aspiré et reste coincé dans l'ouverture de la fenêtre pendant que l'air de l'avion sort par la fenêtre. Au bout de quelques secondes, il parvient à regagner son siège avec quelques blessures. Heureusement, l'équipage est parvenu à poser l'avion d'urgence seulement 35 minutes après l'incident. Un joint d'étanchéité défectueux est à l'origine de l'incident (Mayday, saison 23, épisode 6).

Parfois, la décompression peut se faire très lentement parce qu'il y a une fuite d'air. Un petit trou (qu'on pourrait faire en tirant une balle de fusil dans un hublot ou le fuselage) ne mènerait pas à une dépressurisation explosive. On aurait une dépressurisation, mais elle se ferait lentement. La quantité d'air qui sortirait de l'avion serait alors beaucoup trop petite pour aspirer de gros objets. Soyez rassuré, vous ne passerez pas à travers ce petit trou.

D'ailleurs, les hublots sont formés de deux vitres, mais seule la vitre externe supporte la force. Il y a un petit trou au bas de la vitre interne pour permettre à l'air d'aller entre les deux vitres pour que la pression entre les 2 vitres soit identique à celle de l'intérieur de l'avion. La vitre interne est un genre de vitre de secours au cas où la vitre externe se briserait. Dans ce cas, on perdrait évidemment de l'air par le petit trou, mais ce serait une toute petite fuite.

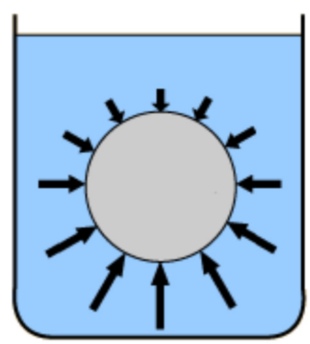
Quand il y a une baisse lente de pressurisation, une alarme avertit les pilotes que la pression de la cabine devient trop basse. Si la pression baisse trop, les passagers pourraient manquer d'oxygène et perdre connaissance. Normalement, les masques à oxygène se déploient et tous peuvent respirer pendant que les pilotes ramènent l'avion à une altitude de moins de 10 000 pieds.

Mais parfois, tout ne se passe pas comme ça devrait se passer. Le 14 aout 2005, les contrôleurs ne parviennent plus à communiquer avec les pilotes du vol 522 de Helios Air. Le Boeing 737-300 vole toujours à son altitude de croisière, mais les pilotes ne répondent plus aux messages. Deux F-16 de l'aviation grecque sont envoyés pour examiner la situation. Par les hublots, les pilotes des F-16 constatent que tous les passagers et les membres de l'équipage sont inconscients. Grâce au pilote automatique, l'avion se rend jusqu'à sa destination, Athènes, et se met en attente en tournant en rond bien au-dessus de l'aéroport. L'avion tourne ainsi en rond pendant 2 heures et demie jusqu'à ce que le carburant se soit épuisé et que l'avion s'écrase. Lors d'une réparation avant le départ, le mode du système de pressurisation avait été changé de « automatique » à « manuel » pour vérifier l'étanchéité d'une porte. Normalement, l'équipage vérifie ce mode 3 fois dans les procédures à suivre avant le décollage, mais ils n'ont jamais remarqué que le système n'était pas correctement configuré. L'avion a finalement décollé avec le système en mode manuel et une valve de pressurisation partiellement ouverte. Quand l'avion a atteint l'altitude de 12 000 pieds, l'alarme de pression de la cabine a sonné, ce qui aurait normalement indiqué à l'équipage d'arrêter la montée. Comme le son de cette alarme est identique à une autre alarme de mauvaise configuration au décollage, les pilotes ont pensé qu'il s'agissait d'une fausse alerte. Le manque d'air déclenche ensuite plusieurs autres alertes (par exemple, l'alarme de flux d'air bas dans les ventilateurs du système de refroidissement s'est déclenchée). Les pilotes tentent de comprendre ce qui se passe, mais comme ils n'ont pas mis leur masque à oxygène, ils commencent à prendre de mauvaises décisions et finissent par perdre connaissance (Mayday, saison 4 épisode 10). Tenter de régler un problème de pressurisation sans masque à oxygène est très dangereux. On prend de mauvaises décisions et on ne s'en rend pas compte.

Il s'est produit un évènement similaire le 25 octobre 1999. Peu après le décollage, l'équipage d'un Learjet 35 de Sunjet Aviation ne répond plus aux messages radio. L'avion poursuit son vol, ne fait pas un virage prévu, et continue son vol jusqu'à épuisement du carburant. Finalement, l'avion s'écrase au Dakota du Sud, bien au-delà de sa destination. Tous les membres d'équipage et les passagers (dont le golfeur Payne Steward) ont perdu connaissance suite à une décompression lente. La cause de la décompression est inconnue (Mayday, saison 16 épisode 1).

La poussée d'Archimède

Quand un objet est dans un fluide (liquide ou gaz), la force de pression s'exerce sur l'objet. Toutefois, la pression n'est pas partout la même puisqu'elle diminue avec l'altitude. Cela fait que la force de pression est plus grande sur le bas de l'objet que sur le haut de l'objet.



hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/pbuoy.html

Quand on somme toutes ces forces, on obtient une force nette vers le haut. Cette force est la poussée d'Archimède.

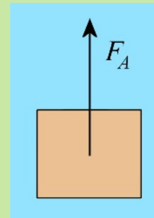
Poussée d'Archimède (F_A)

1) Grandeur de la force

$$F_A = \rho g V_f$$

où ρ est la masse volumique du fluide
g est l'accélération gravitationnelle
et V_f est le volume que l'objet occupe dans le fluide.

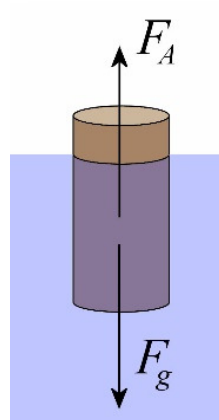
2) Direction de la force



Vers le haut.

3) Point d'application de la force

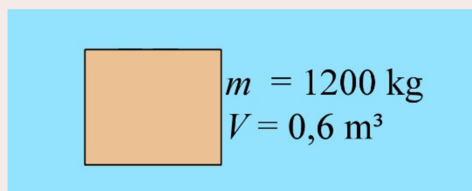
Répartie partout sur la surface de la partie de l'objet qui est dans le fluide. (Ici, on peut se contenter de mettre le point d'application au centre de la partie de l'objet qui est dans le fluide.)



Si la poussée d'Archimède est plus grande que le poids de l'objet, la force nette sur l'objet est vers le haut et l'objet monte jusqu'à atteindre la surface. On a alors un objet qui flotte. Une fois rendu à la surface (figure), une partie de l'objet va sortir de l'eau et la poussée d'Archimède va diminuer. La partie immergée diminuera donc jusqu'à ce que la poussée d'Archimède soit égale à la force de gravitation et l'objet est maintenant en équilibre à la surface.

Si la force de gravitation est plus grande que la poussée d'Archimède, la force nette est vers le bas et l'objet coule au fond.

Exemple 10.1.2



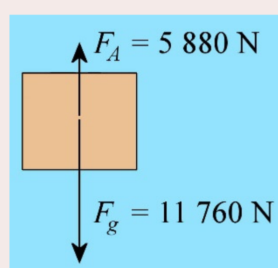
Un objet de 1200 kg ayant un volume de 0,6 m³ est dans l'eau, dont la masse volumique est de 1000 kg/m³.

a) Quelle est la poussée d'Archimède sur cet objet ?

La poussée est

$$\begin{aligned} F_A &= \rho g V_f \\ &= 1000\tfrac{kg}{m^3} \cdot 9,8\tfrac{N}{kg} \cdot 0,6m^3 \\ &= 5880N \end{aligned}$$

b) Cet objet va-t-il flotter ou couler ?



Le poids de cet objet est

$$\begin{aligned} F_g &= mg \\ &= 1200kg \cdot 9,8\tfrac{N}{kg} \\ &= 11760N \end{aligned}$$

Comme la force de gravitation est plus grande que la poussée d'Archimède, cet objet coule.

C'est cette force qui permet aux ballons ou aux Zeppelins de voler. On ajuste la poussée d'Archimède pour qu'elle soit égale au poids du ballon. Le ballon reste alors en équilibre dans l'air.

Pour y arriver, on doit utiliser un gaz plus léger que l'air. Ce gaz peut être simplement de l'air chaud, moins dense que l'air de l'atmosphère. On peut aussi prendre de l'hydrogène ou de l'hélium.

www.daysoftheyear.com/days/hot-air-balloon-day/

Exemple 10.1.3

Le Hindenburg, un zeppelin allemand utilisé en 1936 et 1937, avait une masse de m = 235 000 kg (sans hydrogène). Combien d'hydrogène devait-on utiliser pour le faire voler près du sol sachant que la masse volumique de l'air et de 1,3 kg/m³ et que la masse volumique de l'hydrogène est de 0,09 kg/m³ à cette altitude ?

fr.wikipedia.org/wiki/LZ_129_Hindenburg

Il y a 2 forces sur le Zeppelin.

1) Le poids ($(m + m_H)g$) vers le bas. (Avec l'hydrogène, on a la masse du Zeppelin et la masse de l'hydrogène)
2) La poussée d'Archimède (F_A) vers le haut.

Comme il y a équilibre, ces deux forces doivent être égales. On a donc

$$F_A = (m + m_H)g$$

Comme $F_A = \rho g V_f$, on a

$$\rho g V_f = (m + m_H)g$$
$$\rho V_f = m + m_H$$

Le volume du Zeppelin est égal à la masse de l'hydrogène divisé par sa masse volumique (on néglige le volume des parties du Zeppelin qui ne font pas partie du « Ballon »)

$$V_f = \frac{m_H}{\rho_H}$$

On a donc

$$\rho \frac{m_H}{\rho_H} = m + m_H$$

Ce qui donne

$$\rho \frac{m_H}{\rho_H} - m_H = m$$

$$\left(\frac{\rho}{\rho_H} - 1 \right) m_H = m$$

$$m_H = \frac{m}{\frac{\rho}{\rho_H} - 1}$$

Ce qui donne

$$m_H = \frac{235\,000 kg}{\frac{1,3}{0,09} - 1}$$

$$= 17\,479 kg$$

Ce qui représente un volume de

$$\rho = \frac{m}{Vol}$$

$$0,09 \tfrac{kg}{m^3} = \frac{17\,479 kg}{Vol}$$

$$Vol = 194\,211 m^3$$

Dans les années 30, les États-Unis, seul producteur d'hélium au monde, refusaient d'en vendre à plusieurs pays, dont l'Allemagne. Les Allemands, grands amateurs de Zeppelin, ont donc été forcés d'utiliser de l'hydrogène, un gaz 4 fois plus léger que l'hélium qu'on peut facilement obtenir à partir de l'eau.

Évidemment, l'utilisation d'hydrogène n'est pas sans danger puisque ce gaz est très inflammable. Les Allemands croyaient bien avoir réussi à utiliser l'hydrogène de façon sécuritaire puisqu'il n'y avait pas eu d'incident majeur en près de 3 décennies. Jusqu'au 6 mai 1937…
https://www.youtube.com/watch?v=5Mcg0mynVXE

Notez que la force d'Archimède sur un avion n'est pas très grande par rapport au poids de l'avion. Par exemple, le fuselage d'un Airbus A330-200 a une longueur de 58,82 m et un diamètre de 5,64 m. Si on calcule le volume comme si c'était un simple cylindre, le volume est

$$\pi r^2 h = \pi \cdot (2{,}82m)^2 \cdot 58{,}82m = 1470m^3$$

En ajoutant les ailes, on peut estimer que le volume est près de 2000 m³. Avec un tel volume, la poussée d'Archimède près du sol (quand la masse volumique de l'air est de 1,2 kg/m³) est

$$F_A = \rho g V_f = 1{,}2\tfrac{kg}{m^3} \cdot 9{,}8\tfrac{N}{kg} \cdot 2000m^3 = 23\,520N$$

C'est beaucoup, mais c'est très petit comparé au poids de l'avion qui se situe entre 1 200 000 N et 2 400 000 N selon le chargement. On néglige donc cette force pour les avions.

Par contre, la poussée d'Archimède annule complètement le poids si l'avion se pose sur l'eau comme le font les hydravions.

en.wikipedia.org/wiki/Water_landing

Dans ce cas, le volume des flotteurs doit être assez grand pour que la poussée d'Archimède puisse annuler le poids de l'avion. En fait, on se donne un peu plus de sécurité en demandant que le volume des flotteurs soit 1,8 fois plus grand que le volume qui permettrait à l'avion de flotter.

Exemple 10.1.4

On installe des flotteurs sur un Cessna 170. Quel doit être le volume de chaque flotteur pour qu'ensemble ils puissent générer une poussée d'Archimède 1,8 fois plus grande que le poids de l'avion ? (La masse maximale d'un Cessna 170 est de 998 kg et la masse volumique de l'eau est de 1000 kg/m³.)

www.wipaire.com/aircraft_page/cessna-170/

Le poids du Cessna est de

$$\begin{aligned} P &= 998kg \cdot 9{,}8\tfrac{N}{kg} \\ &= 9780{,}4N \end{aligned}$$

Les flotteurs doivent donc pouvoir générer une force de

$$1{,}8 \cdot 9780{,}4\,N = 17\,604{,}72\,N$$

Chaque flotteur doit donc pouvoir générer une force de 8802 N. Le volume des flotteurs doit donc être de

$$\begin{aligned} F_A &= \rho g V_f \\ 8802N &= 1000\tfrac{kg}{m^3} \cdot 9{,}8\tfrac{N}{kg} \cdot V_f \\ V_f &= 0{,}898m^3 \end{aligned}$$

10.2 LES FLUIDES EN MOUVEMENT

On va maintenant étudier le mouvement des fluides. Le mouvement d'un fluide est un mouvement très complexe. On va commencer en simplifiant un peu en utilisant les hypothèses suivantes.

1) Le fluide n'a pas de viscosité. Cela signifie qu'il n'y a pas de friction entre les différentes parties du fluide.

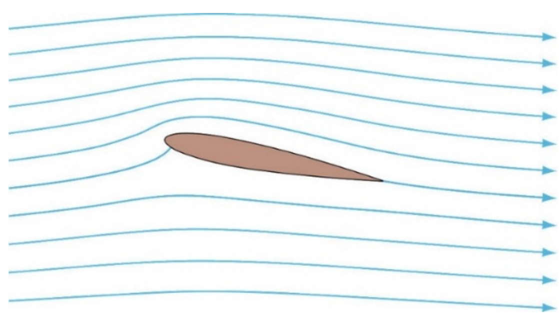
2) Le fluide est incompressible. Cela peut sembler étrange parce qu'un avion se déplace dans l'air et l'air est un fluide facilement compressible. Toutefois, il n'y a pas beaucoup de compression d'air quand l'air circule autour d'un avion. La compressibilité de l'air devient importante seulement pour des avions qui se déplacent à des vitesses près de la vitesse du son ou au-delà de la vitesse du son. (La vitesse du son est aux alentours de 1000 km/h. La valeur exacte dépend de la température de l'air.)

3) Il ne se forme pas de tourbillons (autrement dit, il n'y a pas de turbulence).

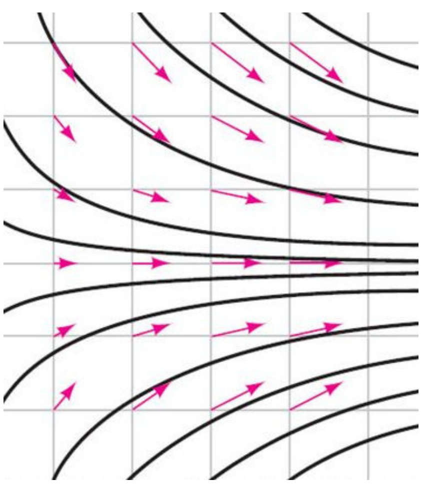
Les lignes de courant

Le fluide peut s'écouler dans un tuyau, mais ce n'est pas obligatoire. Le fluide peut simplement circuler près d'un objet. Dans ce cas, on suit le mouvement du fluide à l'aide des *lignes de courant*.

Les lignes de courant sont des lignes qui montrent la direction de l'écoulement du fluide. Par exemple, voici les lignes de courant montrant le mouvement de l'air autour d'une aile.



en.wikipedia.org/wiki/Streamlines,_streaklines,_and_pathlines



Le fluide situé exactement sur une ligne se déplace dans la direction tangente à la ligne. Il est assez facile d'extrapoler entre les lignes pour déterminer la direction du mouvement du fluide qui n'est pas exactement sur une ligne.

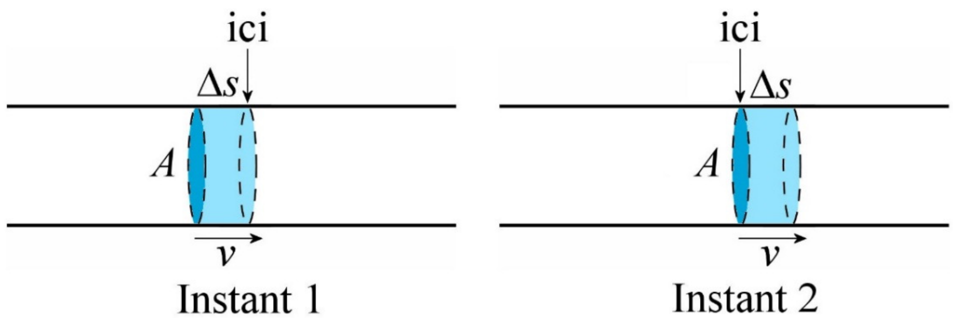
slideplayer.com/slide/8366172/

10.3 L'ÉQUATION DE CONTINUITÉ

Le débit

Trouvons la quantité de fluide qui passe à un endroit d'un tube pendant un certain temps. (Le tube peut être un véritable tube, comme un tuyau, mais il peut aussi être simplement un tube délimité par les lignes de courant.)

Calculons la quantité de fluide qui passe à l'endroit indiqué par *ici* sur la figure. On voit qu'entre les instants 1 et 2, le volume de fluide qui est passé à ce point est égal au volume du disque bleu.



Comme le volume est $A \cdot \Delta s$, le volume d'eau qui passe à un endroit du tube est

$$Vol = A\Delta s$$

On peut maintenant trouver le débit, c'est-à-dire le volume de fluide qui passe par seconde à un endroit du tube. On obtient donc ce débit (Q) en divisant le volume passé par le temps qu'il a fallu pour que cette masse passe.

$$Q = \frac{Vol}{\Delta t}$$

Le temps entre les instants 1 et 2 est égal au temps qu'il faut pour que le disque se déplace d'une distance Δs. Comme le volume doit avancer d'une distance Δs à la vitesse v, le temps est

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v}$$

Le débit est donc

$$\begin{aligned} Q &= \frac{Vol}{\Delta t} \\ &= \frac{A\Delta s}{\Delta s / v} \end{aligned}$$

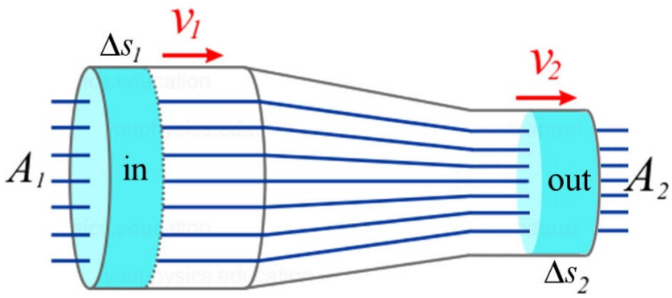
En simplifiant, on arrive à la formule suivante.

Débit du fluide

$$Q = Av$$

L'équation de continuité

Examinons ce qui se passe si les lignes de courant se rapprochent les unes des autres. Cela pourrait se produire, par exemple, avec un fluide circulant dans un tuyau dont le diamètre diminue. Cela peut également se produire simplement parce que les lignes de courant s'approchent les unes des autres pour de l'air en mouvement autour d'un objet.



www.youphysics.education/fr/equation-de-continuite/

Évidemment, le volume de fluide qui entre chaque seconde dans le tube doit être égal au volume de fluide qui sort du tube chaque seconde (si le fluide est incompressible). Cela signifie que le débit à l'entrée du tube doit être égal au débit à la sortie du tube. On a donc

Équation de continuité pour un fluide incompressible

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

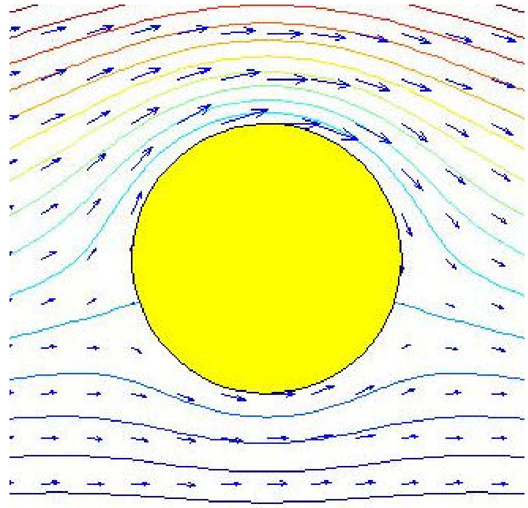
Cette équation signifie que si le tuyau dans lequel se propage le fluide devient plus petit, alors la vitesse du fluide doit augmenter.

On peut très bien voir cet effet avec un robinet de cuisine. Quand l'eau tombe vers l'évier, la vitesse de l'eau augmente. Si la vitesse augmente, alors l'aire de la section (A sur la figure) du filet d'eau doit diminuer, ce qui signifie que le diamètre du filet d'eau doit diminuer.

On voit très bien sur l'image de gauche que le rayon du filet d'eau diminue à mesure que le filet descend.

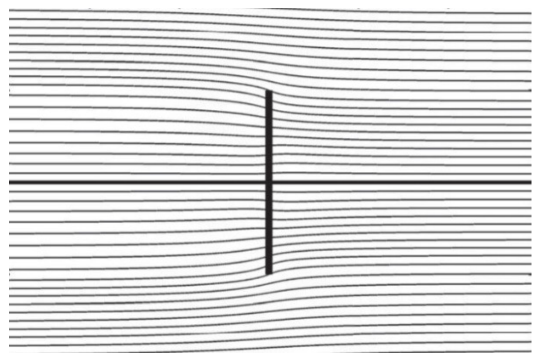
iopscience.iop.org/book/978-0-7503-2076-4/chapter/bk978-0-7503-2076-4ch13 et www.pinterest.cl/pin/485051822336731636/

Sur une image montrant les lignes de courant, l'équation de continuité signifie que la vitesse du fluide est plus grande quand les lignes de courants sont plus près les unes des autres et que la vitesse du fluide est plus petite quand les lignes de courant sont plus loin les unes des autres.



www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4674-streamlines-magnus-and-cp-aroud-a-cylinder-section

Cela signifie aussi que si la vitesse du fluide augmente, alors les lignes de courants doivent se rapprocher les unes des autres. Par exemple, quand de l'air est poussé par une hélice pour augmenter sa vitesse, alors les lignes de courants doivent se rapprocher les unes des autres comme montré sur cette figure.



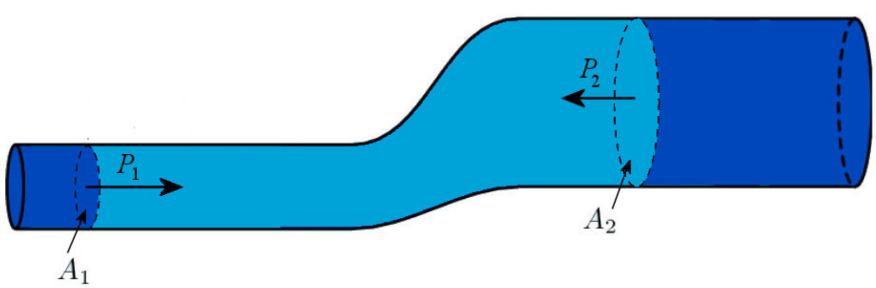
www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/19942060.2016.1234978

Le même phénomène se produit avec tous les types de moteurs. Le jet d'air à la sortie du moteur est beaucoup plus petit qu'à l'entrée du moteur puisque la vitesse de l'air augmente.

10.4 L'ÉQUATION DE BERNOULLI

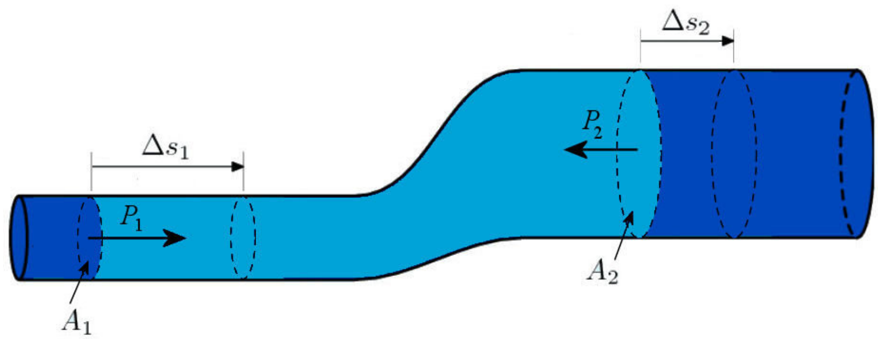
La formule

Trouvons maintenant comment change la pression. Pour y arriver, prenons une partie du fluide dans un tube. Sur ce morceau, il y a la pression P_1 à gauche et la pression P_2 à droite.



prezi.com/apz0ohzc-n7h/principio-de-bernoulli/

Imaginons maintenant que cette partie du fluide se déplace vers la droite pendant un certain temps. Pendant ce temps, le fluide se déplace de Δs_1 à gauche et de Δs_2 à droite.



On va trouver comment change la pression en utilisant $W_{autres} = \Delta E_{mec}$.

Calcul de W_{autres}

Ici, il n'y a qu'une seule autre force qui fait un travail sur le fluide. Cette force c'est la pression. Le travail fait par la pression qui s'exerce à gauche est

$$\begin{aligned} W_1 &= F_1 \Delta s_1 \cos\theta_1 \\ &= F_1 \frac{V}{A_1} \cos 0° \\ &= P_1 V \end{aligned}$$

(où V est le volume du cylindre fait par le déplacement Δs_1). Le travail fait par la pression qui s'exerce à droite est

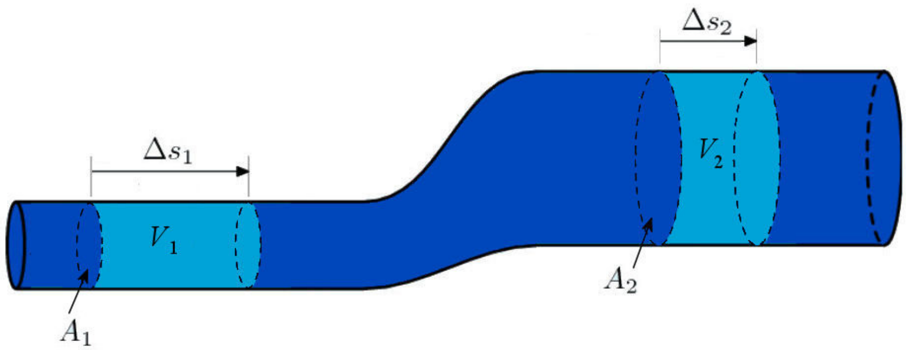
$$\begin{aligned} W_2 &= F_2 \Delta s_2 \cos\theta_2 \\ &= F_2 \frac{V}{A_2} \cos 180° \\ &= -P_2 V \end{aligned}$$

(où V est le volume du cylindre fait par le déplacement Δs_2, ce volume est identique à l'autre cylindre fait par le déplacement Δs_1 puisque le fluide est incompressible.) Le travail fait par les autres forces est donc

$$\begin{aligned} W_{autres} &= W_1 + W_2 \\ &= P_1 V + -P_2 V \\ &= P_1 V - P_2 V \end{aligned}$$

Calcul de ΔE_{mec}

Il faut maintenant trouver la variation d'énergie mécanique du morceau de fluide. Ça peut sembler compliqué puisque la vitesse n'est pas la même partout dans le fluide. Toutefois, il y a une façon simple de trouver cette variation. Quand le fluide se déplace, c'est comme si, dans cette figure, on avait remplacé le fluide dans le cylindre de gauche (V_1) par le fluide dans le cylindre de droite (V_2).



Le changement d'énergie mécanique correspond à la différence d'énergie mécanique entre ces deux volumes de fluide.

Dans le volume de gauche (V_1), l'énergie mécanique est

$$E_{mec1} = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + m_1gy_1$$

(y_1 est la hauteur du centre de masse de ce morceau de fluide. C'est donc la hauteur du milieu du tuyau.)

Dans le volume de droite (V_2), l'énergie mécanique est

$$E_{mec2} = \frac{1}{2}m_2v_2^2 + m_2gy_2$$

(y_2 est la hauteur du centre de masse de ce morceau de fluide. C'est donc la hauteur du milieu du tuyau.)

La variation d'énergie mécanique est donc

$$\begin{aligned}\Delta E_{mec} &= \left(\frac{1}{2}m_2v_2^2 + m_2gy_2\right) - \left(\frac{1}{2}m_1v_1^2 + m_1gy_1\right)\\ &= \frac{1}{2}m_2v_2^2 + m_2gy_2 - \frac{1}{2}m_1v_1^2 - m_1gy_1\end{aligned}$$

Utilisation de $W_{autres} = \Delta E_{mec}$

On a

$$W_{autres} = \Delta E_{mec}$$

$$P_1V - P_2V = \frac{1}{2}m_2v_2^2 + m_2gy_2 - \frac{1}{2}m_1v_1^2 - m_1gy_1$$

En divisant par le volume, on arrive à

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\frac{m_2}{V}v_2^2 + \frac{m_2}{V}gy_2 - \frac{1}{2}\frac{m_1}{V}v_1^2 - \frac{m_1}{V}gy_1$$

Puisque *m/V* est la masse volumique, on arrive à

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho_2v_2^2 + \rho_2gy_2 - \frac{1}{2}\rho_1v_1^2 - \rho_1gy_1$$

Mais ici, le fluide est incompressible. On a donc

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gy_2 - \frac{1}{2}\rho v_1^2 - \rho gy_1$$

On peut finalement écrire cette équation sous la forme suivante.

Équation de Bernoulli pour un fluide incompressible

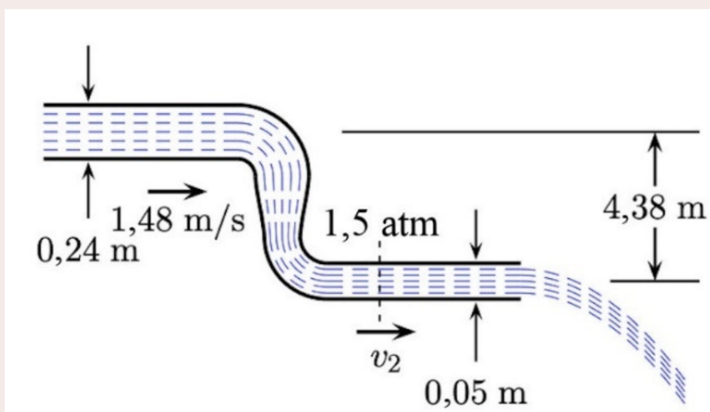
$$P_1 + \rho gy_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho gy_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Autrement dit, on a

$$P + \rho gy + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante}$$

Exemple 10.4.1

De l'eau (masse volumique de 1000 kg/m³) se déplace dans un tuyau ayant la forme montrée sur la figure. À l'endroit où il y a un pointillé, la pression est de 1,5 atmosphère.



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/applying-bernoulli-s-principle-pressure-p1-entrance-end-pipe-answer-units-pa-v2-340992-m-s-q41847334

a) Quel est le débit dans le tuyau ?

On trouve le débit à partir des valeurs à l'entrée du tuyau.

$$\begin{aligned} Q &= Av \\ &= \pi \cdot (0{,}12m)^2 \cdot 1{,}48 \tfrac{m}{s} \\ &= 0{,}06695 \tfrac{m^3}{s} \end{aligned}$$

b) Quelle est la vitesse à l'endroit où il y a un pointillé ?

Selon l'équation de continuité, on a

$$\begin{gathered} A_1 v_1 = A_2 v_2 \\ \pi \cdot (0{,}12m)^2 \cdot 1{,}48 \tfrac{m}{s} = \pi \cdot (0{,}025m)^2 \cdot v_2 \\ (0{,}12m)^2 \cdot 1{,}48 \tfrac{m}{s} = (0{,}025m)^2 \cdot v_2 \\ v_2 = 34{,}0992 \tfrac{m}{s} \end{gathered}$$

c) Quelle est la pression dans la partie haute du tuyau ?

Selon l'équation de Bernoulli, on a

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

On va calculer la valeur de la partie de droite.

$$\begin{aligned} P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 &= 1{,}5 \cdot 101\,300 Pa + 1000 \tfrac{kg}{m} \cdot 9{,}8 \tfrac{N}{kg} \cdot 0m + \frac{1}{2} \cdot 1000 \tfrac{kg}{m^3} \cdot \left(34{,}0992 \tfrac{m}{s}\right)^2 \\ &= 151\,950 Pa + 0 + 581\,778 Pa \\ &= 733\,728 Pa \end{aligned}$$

On a donc

$$\begin{gathered} P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = 733\,728 Pa \\ P_1 + 1000 \tfrac{kg}{m^3} \cdot 9{,}8 \tfrac{N}{kg} \cdot 4{,}38m + \frac{1}{2} \cdot 1000 \tfrac{kg}{m^3} \cdot \left(1{,}48 \tfrac{m}{s}\right)^2 = 733\,728 Pa \\ P_1 + 42\,924 Pa + 1095 Pa = 733\,728 Pa \\ P_1 = 689\,709 Pa \\ P_1 = 6{,}81 atm \end{gathered}$$

d) Quelle est la vitesse à la sortie du tuyau ?

À la sortie du tuyau (position 3), la pression tombe à 1 atmosphère. On a donc

$$P_3 + \rho g y_3 + \frac{1}{2}\rho v_3^2 = 733\,728 Pa$$

$$101\,300 Pa + 1000 \tfrac{kg}{m^3} \cdot 9{,}8 \tfrac{N}{kg} \cdot 0m + \frac{1}{2} \cdot 1000 \tfrac{kg}{m^3} \cdot v_3^2 = 733\,728 Pa$$

$$101\,300 Pa + 0 Pa + \frac{1}{2} \cdot 1000 \tfrac{kg}{m^3} \cdot v_3^2 = 733\,728 Pa$$

$$\frac{1}{2} \cdot 1000 \tfrac{kg}{m^3} \cdot v_3^2 = 632\,428 Pa$$

$$v_3 = 35{,}56 \tfrac{m}{s}$$

Comme la vitesse augmente un peu à la sortie, le jet d'eau devient un peu plus petit que le tuyau.

La pression en fonction de la profondeur dans l'eau

On peut utiliser l'équation de Bernoulli pour trouver comment la pression augmente avec la profondeur dans l'eau. Dans ce cas, toutes les vitesses sont nulles et l'équation

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

devient

$$P_1 + \rho g y_1 = P_2 + \rho g y_2$$

Si la position 1 correspond à la surface du lac (qui sera notre $y = 0$) et la position 2 à une certaine profondeur h (ce qui donne $y_2 = -h$). On a

$$P_{surf} + 0 = P_h + \rho g \left(-h\right)$$

Ce qui donne

Pression en fonction de la profondeur dans un fluide incompressible

$$P_h = P_{surf} + \rho g h$$

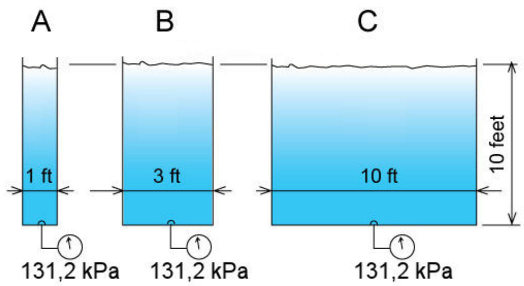
Exemple 10.4.2

Quelle est la pression à une profondeur de 100 m dans l'eau ?

La pression est

$$\begin{aligned} P_{100m} &= P_{surf} + \rho g h \\ &= 101\,300 Pa + 1000 \tfrac{kg}{m^3} \cdot 9{,}8 \tfrac{kg}{m^3} \cdot 100m \\ &= 101\,300 Pa + 980\,000 Pa \end{aligned}$$

$$= 1\,081\,300 Pa$$
$$= 10,67 atm$$



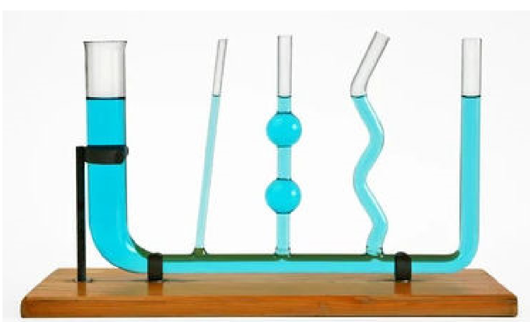
www.pumpfundamentals.com/tutorial3.htm

L'équation nous dit que la pression dépend uniquement de la profondeur et pas du tout de la forme du contenant. Dans les 3 situations montrées sur la figure, la pression est la même au fond du contenant même si les contenants ont des largeurs différentes.

On a fait une démonstration assez spectaculaire de ce principe au 17e siècle. On ajoutait un mince tuyau au-dessus d'un tonneau. Quand on mettait de l'eau dans le tuyau (il n'en fallait pas beaucoup pour le remplir), le baril se brisait.

En ajoutant de l'eau, la surface de l'eau s'élève, ce qui fait augmenter la pression dans le baril (puisque la profondeur augmente). Cela n'a aucune importance que le tuyau soit très petit et qu'on doit ajouter seulement une petite quantité d'eau pour le remplir. La seule chose qui compte, c'est la hauteur atteinte par l'eau. Si la surface de l'eau au bout du tuyau est très haute par rapport au baril, la pression dans le baril augmente beaucoup, au point de le faire éclater.

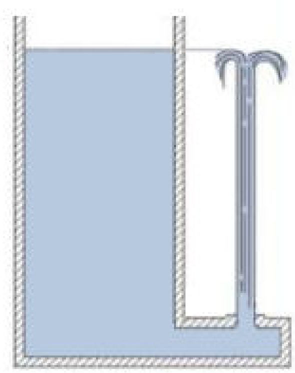
www.wikiwand.com/fr/Principe_de_Pascal



Cela signifie aussi que la pression de surface de 101,3 kPa sera atteinte partout à la même hauteur dans un fluide. Ainsi, si on met un liquide dans un contenant de n'importe quelle forme, la surface sera à la même hauteur partout (c'est le principe des vases communicants).

www.shutterstock.com/fr/image-photo/colored-water-communicating-vessel-61860373

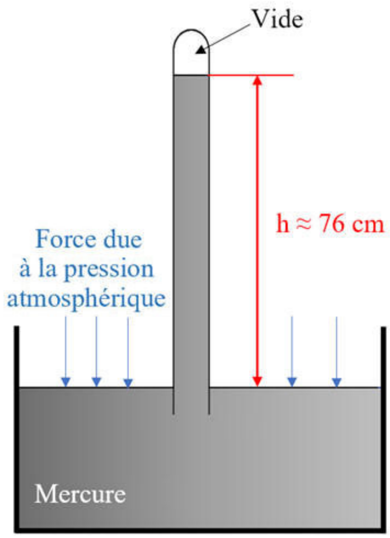
Cela signifie aussi qu'un jet d'eau va également monter jusqu'à la même hauteur que la surface de l'eau (s'il n'y a pas de friction.)



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/height-water-jet-reach-air-pressure-tank-27-psi-water-height-within-tank-32-ft-jet-height--q73360646

Le baromètre

Le baromètre est un instrument qui mesure la pression atmosphérique. Par exemple, on peut mesurer la pression atmosphérique avec le montage suivant.



guy-chaumeton.pagesperso-orange.fr/2d08phc.htm

Utilisons l'équation de Bernoulli ici.

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

On va mettre la position 1 à la surface du liquide où il a de l'air et la position 2 à la surface du liquide où il y a un vide. On va mettre le $y = 0$ à la position 1. La hauteur de la position sera appelée h. La pression à la position 1 est égale à la pression atmosphérique et la pression à la position 2 est nulle puisqu'il y a du vide. Comme les vitesses sont nulles, l'équation devient

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$
$$P_{atm} + 0 + 0 = 0 + \rho_{liq} g h + 0$$

(On a mis un indice *liq* pour indiquer qu'il s'agit de la masse volumique du liquide dans le tube et non pas la masse volumique de l'air.)

On obtient finalement le résultat suivant si on isole la pression de l'atmosphère.

Lien entre la pression atmosphérique et la hauteur de la colonne d'un liquide (si la pression est nulle à la surface du liquide dans le tube)

$$P_{atm} = \rho_{liq} g h$$

On peut donc obtenir la pression atmosphérique en mesurant la hauteur de la colonne de liquide. Avec de l'eau, la colonne d'eau est un peu grande. Avec la pression atmosphérique normale, on obtient

$$P_{atm} = \rho_{iq} g h$$
$$101\,300 Pa = 1000 \tfrac{kg}{m^3} \cdot 9{,}8 \tfrac{N}{kg} \cdot h$$
$$h = 10{,}33 m$$

Il faudrait donc un type de plus de 10 m de long pour mesurer la pression de l'air. C'est un peu long. Pour faciliter la mesure, on peut prendre un liquide plus dense. Ce liquide plus dense est le mercure (dont la masse volumique est de 13 600 kg/m³). Avec ce liquide, la hauteur de liquide nécessaire est

$$P_{atm} = \rho_{liq} gh$$
$$101\,300Pa = 13\,600 \tfrac{kg}{m^3} \cdot 9{,}8 \tfrac{N}{kg} \cdot h$$
$$h = 0{,}76m$$

La hauteur est nettement plus petite. Elle va être aux environs de 76 cm.

Exemple 10.4.2

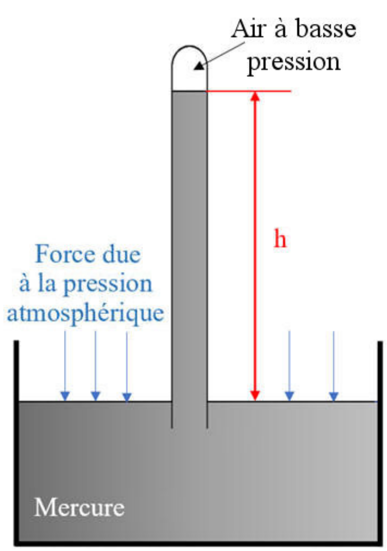
Quelle est la pression atmosphérique si la colonne de mercure a une hauteur de 75,1 cm ?

La pression est

$$\begin{aligned} P_{atm} &= \rho_{liq} gh \\ &= 13\,600 \tfrac{kg}{m^3} \cdot 9{,}8 \tfrac{N}{kg} \cdot 0{,}751m \\ &= 100{,}1kPa \end{aligned}$$

C'est pour cela qu'on donne parfois la pression en mm de mercure (mm hg). C'est la pression qui correspond à cette hauteur de colonne de mercure. On passe facilement de l'une à l'autre de ces unités avec le facteur de conversion suivant.

Unité 1	→ multiplier par ← diviser par	Unité 2
mm hg	133,32	Pascal



S'il y avait un peu d'air dans le bout du tube à la pression P plutôt que du vide, on aurait

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$
$$P_{atm} + 0 + 0 = P + \rho_{liq} gh + 0$$

Ce qui nous donne

Pression à la surface d'un liquide dans un tube à partir de la hauteur de la colonne de liquide

$$P = P_{atm} - \rho_{liq} gh$$

Avec une pression atmosphérique de 101,3 kPa et P = 0, on a 760 mm de mercure. C'est la hauteur qu'on a quand il a du vide au bout du tube.

Avec une pression atmosphérique de 101,3 kPa et P = 40 kPa, on a 460 mm de mercure.

Avec une pression atmosphérique de 101,3 kPa et P = 80 kPa, on a 160 mm de mercure.

Avec une pression atmosphérique de 101,3 kPa et P = 100 kPa, on a 0,01 mm de mercure.

On voit que plus la pression est grande à la surface du liquide dans le tube, plus la hauteur du liquide est petite.

C'est exactement ce principe qu'on utilise pour boire avec une paille. Avec notre bouche, on diminue la pression au bout de la paille. Si la pression dans notre bouche est P, alors le liquide monte dans la paille pour que la hauteur du liquide soit donnée par cette équation.

$$h = \frac{P_{atm} - P}{\rho_{liq} g}$$

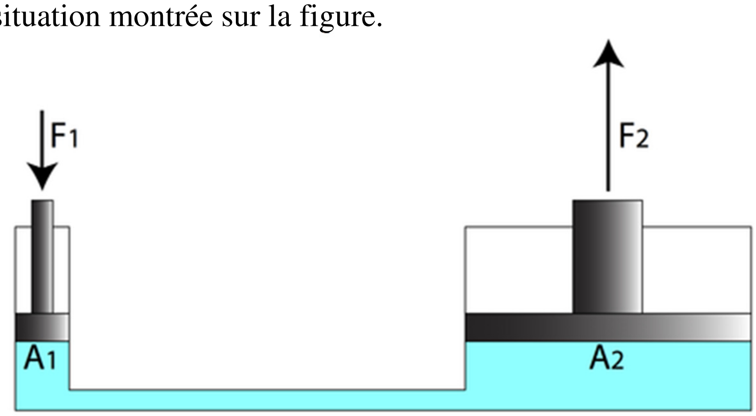
Si la hauteur h est plus grande que la longueur de la paille, le liquide monte jusqu'à notre bouche et on peut se désaltérer.

C'est donc la force de pression de l'atmosphère qui fait monter le liquide dans la paille. Si on essayait d'utiliser une paille dans le vide, le liquide ne monterait pas du tout dans la paille !

On ne pourrait pas non plus boire de l'eau avec une paille si la paille était plus longue que 10,33 m. Si P = 0, alors la hauteur de la colonne d'est est de 10,33 m. Comme on ne peut pas faire de pression plus faible que 0, l'eau ne peut pas monter plus haut que 10,33 m dans un tube. Cela signifie aussi qu'on ne pourrait pas puiser de l'eau dans un puits plus profond que 10,33 m si la pompe est au sol. Même si la pompe parvenait à faire un vide parfait dans le tuyau, l'eau ne pourrait pas monter plus haut que 10,33 m. Par contre, on peut avoir de l'eau si la pompe est au fond du puits et qu'elle pousse l'eau vers le haut. La pompe n'a qu'à pousser l'eau avec une pression plus grande que la pression atmosphérique pour que l'eau monte plus haut que 10,33 m.

Augmentation de la force

Examinons la situation montrée sur la figure.



www.aplusphysics.com/courses/honors/fluids/Pascal.html

Si on applique une force F_1 à gauche, alors la pression du fluide doit être de

$$P_1 = \frac{F_1}{A_1}$$

L'équation de Bernoulli donne alors

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$
$$P_1 + \cancel{\rho g y_1} + 0 = P_2 + \cancel{\rho g y_2} + 0$$
$$P_1 = P_2$$

(Les vitesses sont nulles et la hauteur du fluide est la même aux positions 1 et 2.)

Or, le lien entre la pression et la force à la position 2 est

$$P_2 = \frac{F_2}{A_2}$$

Mais puisque $P_1 = P_2$, on a

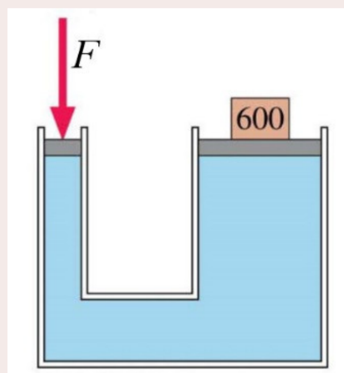
Force générée par un fluide

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

On voit que si l'aire augmente, alors la force augmente aussi. C'est une façon très simple d'augmenter la force exercée.

Exemple 10.4.3

Quelle force F doit-on exercer dans la situation montée sur la figure pour soutenir cette masse de 600 kg ? Le diamètre du piston de gauche est de 1 m et le diamètre du piston de droite est de 3 m. (Négligez le poids des couvercles des pistons.)



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/62-63-pascal-s-principle-hydraulic-system-filled-fresh-water-diameter-left-piston-10-cm-di-q77232828

À droite, le fluide doit faire une force égale au poids de l'objet de 600 kg (qui est de 5880 N). On a donc

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$
$$\frac{F_1}{\pi \cdot (0,5m)^2} = \frac{5880N}{\pi \cdot (1,5m)^2}$$

$$F_1 = \frac{5880N}{(1,5m)^2}(0,5m)^2$$
$$F_1 = 653N$$

En poussant sur le piston avec une force de 653 N, on maintient en place un poids de 5880 N !

On pourrait penser que cette solution n'est pas exacte puisque la pression atmosphérique pousse également sur le piston. Si on ajoute la force de pression de l'atmosphère, la force à gauche est donc

$$F_1 = F + P_{atm}A_1$$

et la force à gauche est

$$F_2 = 5880N + P_{atm}A_2$$

On a alors

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$
$$\frac{F + P_{atm}A_1}{A_1} = \frac{5880N + P_{atm}A_2}{A_2}$$
$$\frac{F}{A_1} + P_{atm} = \frac{5880N}{A_2} + P_{atm}$$

Les pressions atmosphériques s'annulent et on revient à la même équation que celle qu'on avait quand on ne tenait pas compte de cette pression. Il n'est donc pas nécessaire d'inclure la force de pression atmosphérique qui s'applique sur les pistons.

Approximations

On peut aussi utiliser l'équation de l'augmentation de la force si on déplace les couvercles de piston. De façon correcte, il faudrait maintenant prendre en compte la vitesse de déplacement des fluides avec l'équation de Bernoulli, mais les vitesses sont généralement assez faibles de sorte qu'elles ne changent pas vraiment la solution du problème. On peut donc négliger la vitesse du fluide quand il y a des déplacements.

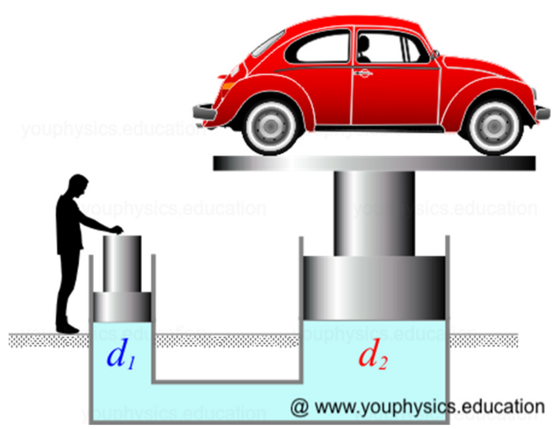
La formule peut aussi être utilisée si les couvercles de piston ne sont pas à la même hauteur. Dans ce cas, les ρgy ne s'annuleraient pas et la solution serait un peu différente. Toutefois, la différence de hauteur est rarement assez grande pour que la solution soit très différente. On peut donc souvent négliger le changement de hauteur entre les couvercles de piston.

Avec ces approximations, on arrive toujours à $P_1 = P_2$. C'est le principe de Pascal qui dit que la pression dans le fluide est la même partout dans le fluide.

Les systèmes hydrauliques

Ce principe est la base des systèmes hydrauliques. Dans ces systèmes, on utilise le fait qu'une aire plus grande génère une force plus grande. Très souvent, le liquide utilisé est de l'huile.

Dans la situation suivante, la personne peut faire monter la voiture en exerçant une force beaucoup plus petite que le poids de la voiture. Si l'aire du piston 1 est 100 fois plus petite que l'aire du piston 2, alors la personne peut exercer une force 100 fois plus petite que le poids de la voiture pour la faire monter ! Si le poids de la voiture est de 10 000 N, alors la personne doit exercer une simple force de 100 N pour faire monter la voiture.



www.youphysics.education/fr/pont-elevateur-hydraulique/

Évidemment, il y a un prix à payer. Si l'aire est 100 fois plus petite, alors la voiture va monter d'une distance 100 fois plus petite que la distance parcourue par le piston 1. Si la personne pousse le piston 1 d'une distance de 10 cm, alors la voiture ne va monter que de 0,1 cm. Cela est aussi une conséquence de la conservation de l'énergie. Dans notre exemple, le travail fait par la personne sur le fluide (qui est de 100 N·0,1 m = 10 J) est identique au travail fait par le fluide sur la voiture (qui est de 10 000 N · 0,001 m = 10 J).

On utilise donc les systèmes hydrauliques pour augmenter la force exercée en utilisant la pression d'un fluide. Ils sont très utilisés en aviation pour le contrôle des ailerons et des gouvernes des gros avions. Comme les forces qu'on doit exercer sur les ailerons et gouvernes des gros avions sont très importantes, on multiplie la force exercée par le pilote sur les contrôles grâce à des systèmes hydrauliques.

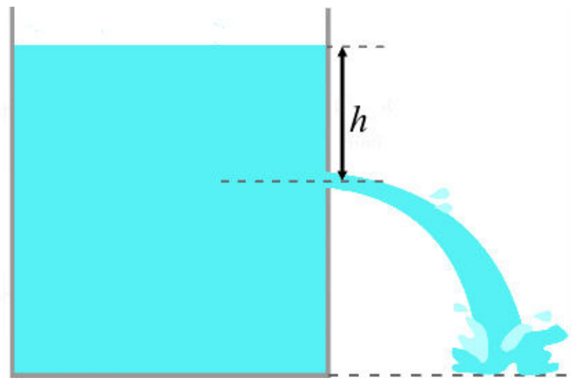
Évidemment, une fuite d'huile du système aurait des conséquences catastrophiques puisque le pilote ne pourrait plus contrôler l'avion. C'est pour cela qu'il y a souvent 3 (et même parfois 4) systèmes hydrauliques en parallèle. S'il y a une fuite d'huile dans un système, il y en a encore 2 autres. On estimait qu'il n'y avait pratiquement pas de chance qu'il y ait défaillance des trois systèmes en même temps. C'est quand même arrivé quelques fois (on a mentionné ces accidents au chapitre précédent).

La formule de Torricelli

Cette formule permet de déterminer la vitesse d'écoulement d'un fluide quand il y a un trou dans un contenant.

Pour trouver cette vitesse, on utilise l'équation de Bernoulli.

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$



www.youphysics.education/fr/principe-de-torricelli-ouverture-dans-un-recipient/

La position 1 est la surface du liquide dans le contenant et la position 2 est au trou. La pression aux deux endroits est égale à la pression atmosphérique puisque l'eau est en contact avec l'air aux deux positions. Si on place le $y = 0$ à la hauteur du trou, on a

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$P_{atm} + \rho g h + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_{atm} + 0 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$gh + \frac{1}{2}v_1^2 = \frac{1}{2}v_2^2$$

On va négliger la vitesse du fluide à la surface du liquide qui est très petite si le contenant est grand pour arriver à

Formule de Torricelli

$$v^2 = 2gh$$

Cette formule donne la vitesse d'un fluide qui sort d'un trou à une hauteur h sous la surface du liquide.

Exemple 10.4.4

Dans un réservoir, il y a un trou à 3 m de la surface du liquide. À quelle vitesse le liquide sort-il ?

La vitesse est

$$v^2 = 2gh$$
$$v^2 = 2 \cdot 9,8 \tfrac{N}{kg} \cdot 3m$$
$$v = 7,668 \tfrac{m}{s}$$

La formule nous indique que la vitesse est plus grande quand le trou est plus bas par rapport à la surface.

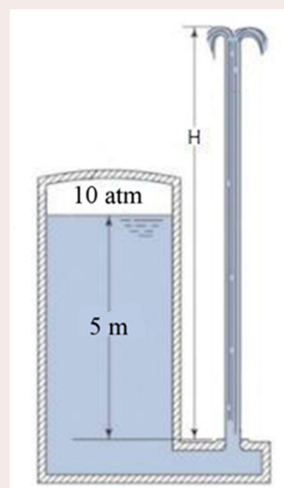
C'est ce qu'on peut voir sur l'image de droite.

villemin.gerard.free.fr/aScience/Physique/PRESSION/Bouteill.htm

On peut résoudre des problèmes de vitesse de fluide un peu plus sophistiqué en partant de l'équation de Bernoulli.

Exemple 10.4.5

Dans la situation montrée sur la figure, jusqu'à quelle hauteur va monter le jet d'eau ? (Dans le réservoir, il y a de l'air comprimé à 10 atmosphères au-dessus de l'eau.)



On peut trouver la vitesse avec l'équation de Bernoulli. La position 1 est la surface du liquide dans le contenant et la position 2 est au trou. La pression 1 est égale à 10 atmosphères et la pression 2 est égale à la pression atmosphérique puisque l'eau est en contact avec l'air à cet endroit. Si on place le $y = 0$ à la hauteur du trou, on a

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$1\,013\,000 Pa + 1000 \tfrac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \tfrac{N}{kg} \cdot 5m + 0 = 101\,300 Pa + 0 + \frac{1}{2} \cdot 1000 \tfrac{kg}{m^3} \cdot v_2^2$$

(On a négligé la vitesse du fluide à la surface du liquide qui est très petite si le contenant est grand.) Si on isole la vitesse, on a

$$1\,013\,000 Pa + 40\,000 Pa = 101\,300 Pa + \frac{1}{2} \cdot 1000 \tfrac{kg}{m^3} \cdot v_2^2$$

$$951\,700Pa = \frac{1}{2}\cdot 1000\tfrac{kg}{m^3}\cdot v_2^2$$
$$v_2 = 43,63\tfrac{m}{s}$$

Si l'eau a une vitesse verticale initiale de 43,63 m/s, alors la hauteur atteinte est

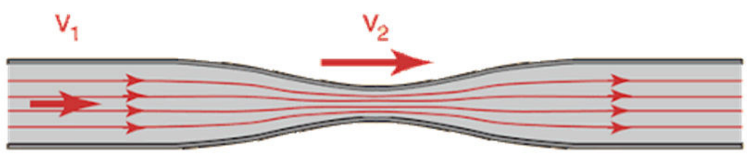
$$-2g\left(y-y_0\right) = v_y^2 - v_{0y}^2$$
$$-2\cdot 9,8\tfrac{m}{s^2}\cdot\left(y-0\right) = 0-\left(43.63\tfrac{m}{s}\right)^2$$
$$y = 97,11m$$

10.5 LA BAISSE DE PRESSION QUAND LA VITESSE AUGMENTE

Explication avec la loi de Bernoulli

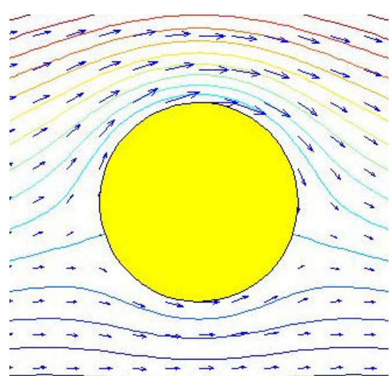
Examinons comment change la pression quand la vitesse d'un fluide change.

Selon l'équation de continuité, la vitesse du fluide augmente quand les lignes de courants s'approchent les unes des autres. Cela peut se produire quand le tuyau dans lequel se propage le fluide devient plus petit. (Un tube avec un rétrécissement comme celui montré sur la figure s'appelle *un tube de Venturi*.)



hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Fluids/venturi.html

Cela peut aussi se produire quand il n'y a pas de tuyau. Quand le fluide contourne un objet, la vitesse du fluide augmente si les lignes de courant s'approchent les unes des autres (image de droite).



Si on néglige les changements de hauteurs du fluide, alors l'équation de Bernoulli devient

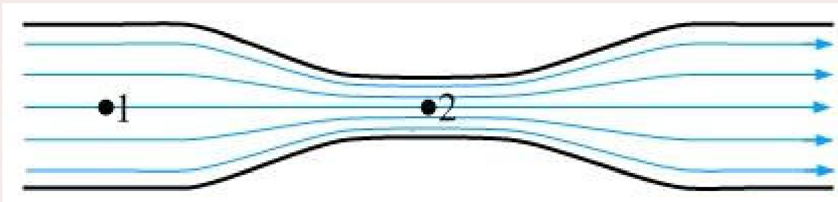
$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Cette équation indique clairement que la pression à la position 2 doit être plus petite qu'à la position 1 si la vitesse à la position 2 est plus grande qu'à la position 1. On a donc la conclusion suivante.

Plus la vitesse du fluide est grande, plus la pression est petite.

Exemple 10.5.1

Un fluide se déplace dans le tuyau montré sur la figure. À la position 1, le diamètre du tuyau est de 12 cm et la pression est de 200 kPa. À la position 2, le diamètre du tuyau est de 6 cm. Au point 1, le fluide a une vitesse de 4 m/s.



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/venturi-tube-tube-constriction--pressure-venturi-tube-measured-attaching-u-shaped-fluid-fi-q1799759

a) Quelle est la vitesse du fluide au point 2 ?

On trouve la vitesse avec l'équation de continuité

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$
$$\pi r_1^2 v_1 = \pi r_2^2 v_2$$
$$r_1^2 v_1 = r_2^2 v_2$$
$$(0{,}06m)^2 \cdot 4\tfrac{m}{s} = (0{,}03m)^2 v_2$$
$$v_2 = 16\tfrac{m}{s}$$

On remarque que la vitesse augmente bel et bien quand les lignes de courant se rapprochent les unes des autres.

b) Quelle est la pression au point 2 ?

On peut trouver la pression avec l'équation de Bernoulli (dans laquelle on néglige les variations de hauteur, mais qui, de toute façon, ne changent pas ici)

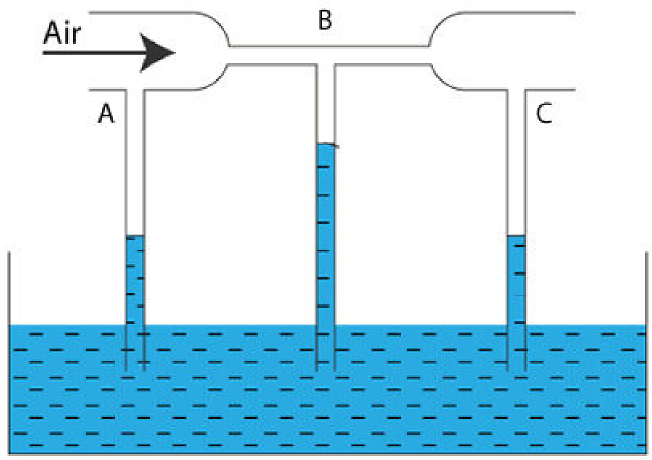
$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

On a alors

$$200\,000Pa + \frac{1}{2}\cdot 1000\tfrac{kg}{m^3}\cdot\left(4\tfrac{m}{s}\right)^2 = P_2 + \frac{1}{2}\cdot 1000\tfrac{kg}{m^3}\cdot\left(16\tfrac{m}{s}\right)^2$$
$$200\,000Pa + 8\,000Pa = P_2 + 128\,000Pa$$
$$P_2 = 80\,000Pa$$

On remarque que la pression est belle et bien plus petite à l'endroit où la vitesse est la plus grande.

On peut mettre en évidence cette baisse de pression avec des ouvertures dans le tube.



www.one-school.net/Malaysia/UniversityandCollege/SPM/revisioncard/physics/forceandpressure/bernoulliprinciple.html

On a vu que la hauteur du liquide mesure la pression au bout de la colonne de liquide. Plus la colonne est haute, plus la pression est faible à la surface de la colonne. Une telle différence de hauteur de colonne d'eau montre clairement que la pression est plus faible à l'endroit où le tuyau rétrécit. (En réalité, la colonne au point C sera un peu plus haute qu'au point A puisqu'on perd un peu de pression avec la friction.)

On peut relier la différence de hauteur avec la différence de pression. Au point A, le lien entre la pression et la hauteur de fluide est

$$P_A = P_{atm} - \rho_{liq} g h_A$$

Au point B, le lien entre la pression et la hauteur de fluide est

$$P_B = P_{atm} - \rho_{liq} g h_B$$

La soustraction des deux équations donne

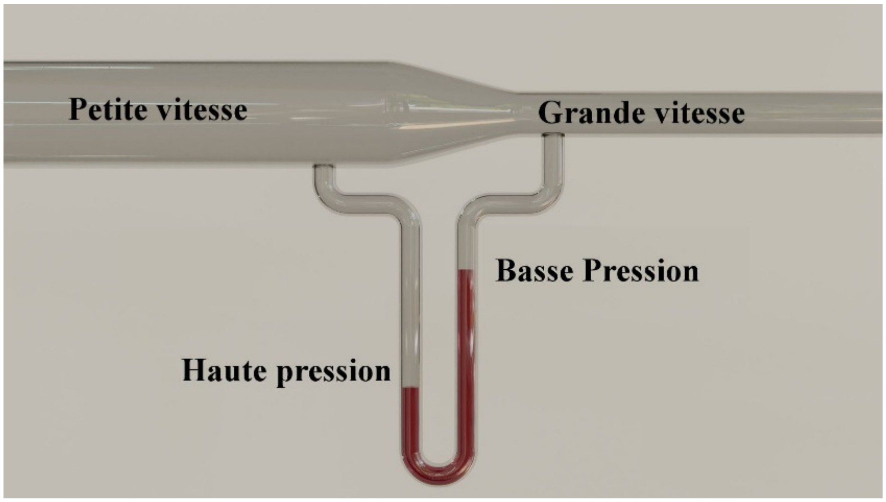
$$\begin{aligned} P_B - P_A &= \left(P_{atm} - \rho_{liq} g h_B\right) - \left(P_{atm} - \rho_{liq} g h_A\right) \\ &= \rho_{liq} g h_B - \rho_{liq} g h_A \\ &= \rho_{liq} g \left(h_B - h_A\right) \end{aligned}$$

Ce qui donne

Différence de pression à partir de la différence de hauteur des colonnes de liquide

$$\Delta P = \rho_{liq} g \Delta h$$

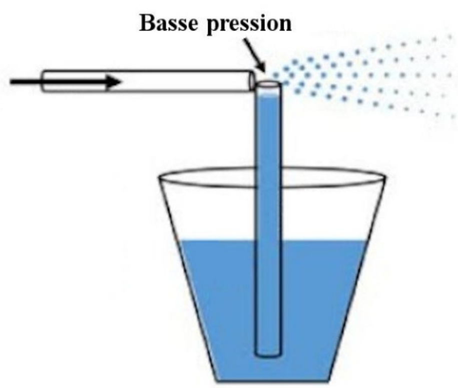
Voici ce qu'on obtient quand on fait cette expérience.



www.tec-science.com/mechanics/gases-and-liquids/venturi-effect/

Un vaporisateur

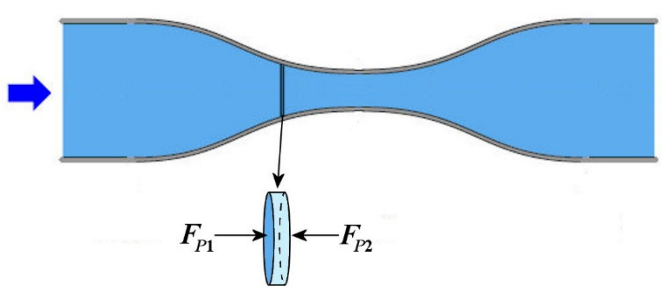
On peut alors utiliser ce principe pour vaporiser un liquide. En faisant passer de l'air à grande vitesse au bout d'une paille dans l'eau, on fait baisser la pression au bout de la paille, ce qui va faire monter le liquide dans la paille. Si la vitesse est assez grande, la baisse de pression peut être assez importante pour que le liquide atteigne le bout de la paille. Le liquide sera alors entrainé par l'air en mouvement pour générer un jet d'air avec des gouttes d'eau.



www.youtube.com/watch?v=l17-f8DbZ1E

Explication avec la 2e loi de Newton

Le changement de pression est aussi une conséquence directe de la 2e loi de Newton. L'équation de continuité, qui vient de la conservation de la masse, indique que la vitesse du fluide doit augmenter en passant à l'endroit où le tuyau est plus petit. Si on veut que le liquide augmente sa vitesse en entrant dans la partie plus petite du tuyau, alors il doit y avoir une force qui accélère le liquide. La figure de droite montre les forces de pression qui s'exercent sur un petit morceau de fluide qui entre dans la partie mince.



Ce morceau accélère vers la droite puisque sa vitesse augmente à mesure qu'il s'approche de la partie mince du tuyau. S'il accélère vers la droite, alors il doit y avoir une force nette vers la droite. Comme les seules forces horizontales qui agissent sur ce petit morceau de fluide sont les forces de pression, on arrive à la conclusion que F_{P1} doit être plus grande que F_{P2}. On en conclut donc que la pression est plus grande à gauche, ce qui signifie que la pression est plus faible dans la partie mince du tuyau.

Quand le tuyau redevient plus grand, alors le petit morceau de fluide doit ralentir. Dans ce cas, F_{P1} doit être plus petite que F_{P2}, ce qui signifie que la pression est plus grande à droite. Cela montre que la pression augmente à nouveau quand le tuyau s'élargit.

Quelques résultats qui semblent contraires à l'intuition

La baisse de pression est un peu contre-intuitive. Plusieurs personnes vont se rappeler la loi des gaz (qui est valide pour les gaz seulement, pas les liquides)

$$PV = nRT$$

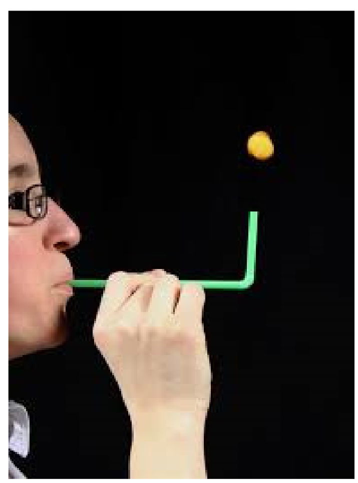
et conclure que la pression doit monter si le tuyau rapetisse. C'est que si le tuyau rapetisse, le volume du gaz diminue. Si on diminue le volume, alors la pression doit augmenter pour compenser cette baisse du volume. Toutefois, ce raisonnement n'est pas correct puisqu'on considère que le fluide est incompressible, ce qui signifie que le volume du fluide ne change pas. C'est d'ailleurs pour cela que la vitesse du fluide doit augmenter quand le diamètre du tuyau diminue. Même si le gaz est compressible, la variation de volume ne fait pas augmenter la pression suffisamment pour compenser la baisse de pression qui vient de l'augmentation de vitesse, sauf peut-être pour de très grandes vitesses (du genre supérieures à la vitesse de son).

Voici un résultat vraiment contre-intuitif. Si on place une boule de ping-pong dans un jet d'air, la balle reste prisonnière du jet d'air.

Voici un petit clip montrant ce phénomène.
https://www.youtube.com/watch?v=fU0YOS_b_yo

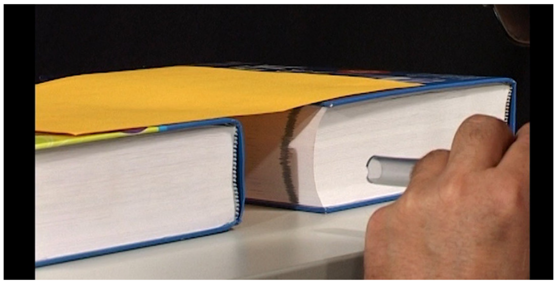
On pourrait penser que le jet d'air va pousser la balle hors du trajet du jet, mais ce n'est pas le cas. Puisque l'air du jet a une vitesse, alors la pression dans le jet est plus basse que dans l'air environnant. La pression de l'air pousse donc constamment la balle vers le jet.

On a le même phénomène avec un jet d'eau.
https://www.youtube.com/watch?v=WDGNcmEOjs4

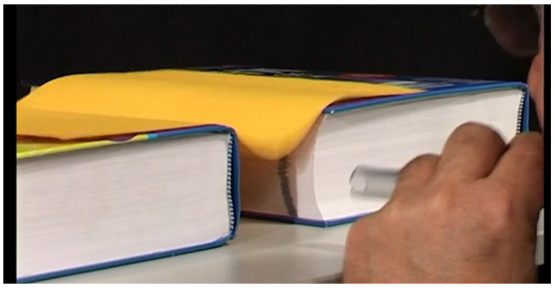


www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/bernoullisprinciple_5-8-02-09-17-508.pdf

On a également un résultat un peu contre-intuitif quand un jet d'air passe près d'une feuille de papier. Dans cette première image, il n'y a pas de jet d'air.



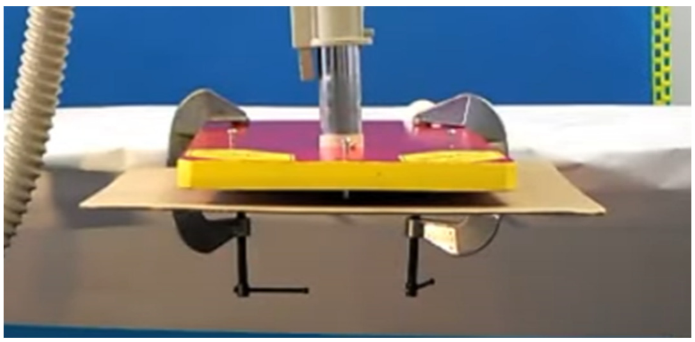
Beaucoup de personnes diraient que la feuille, qui est simplement déposée sur les livres, va se soulever quand on va envoyer de l'air entre les livres. Pourtant, la feuille descend.



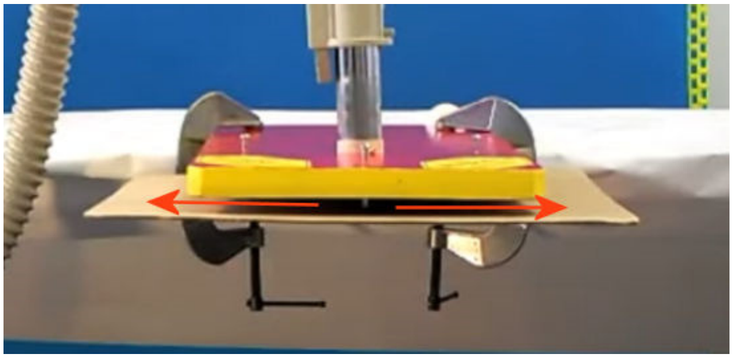
Vous pouvez voir le film de cette expérience sur ce site.
http://phymain.unisciel.fr/la-feuille-qui-ne-veut-pas-decoller/

C'est que la pression entre les livres diminue quand l'air se déplace entre les livres. La pression sur le dessus de la feuille, qui est égale à la pression atmosphérique, est alors plus grande que la pression sous la feuille, et il y a donc une force de pression nette vers le bas sur la feuille.

Ce résultat est encore plus surprenant (expérience à partir de 1:12 dans ce clip).
https://www.youtube.com/watch?v=1JuoSJz3SRU
À un certain moment, la plaque de carton n'est plus repoussée par le jet d'air et se fixe près du jet d'air dans cette position.



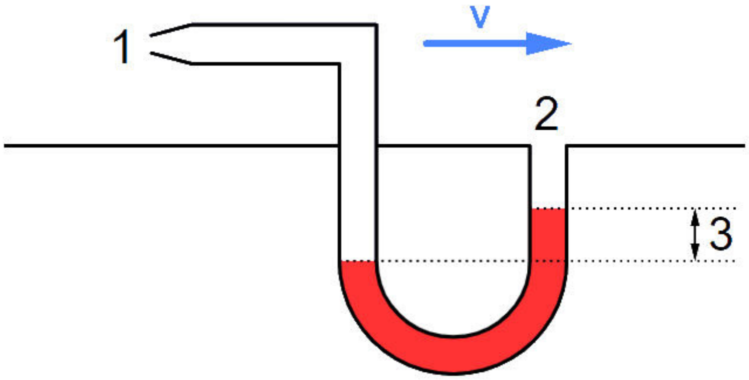
On s'attendrait à ce que la gravitation et la poussée du jet d'air propulsent le morceau de carton vers le bas. Pourtant, le morceau de carton reste en place. L'air qui circule vers l'extérieur de la plaque au-dessus de la plaque (flèches rouges) fait baisser la pression.



La pression sur le dessous du morceau de carton, qui est égale à la pression atmosphérique, est alors plus grande que la pression au-dessus du morceau de carton, et il y a donc une force de pression nette vers le haut sur la plaque de carton. C'est cette force qui empêche la plaque de tomber.

10.6 LE TUBE DE PITOT

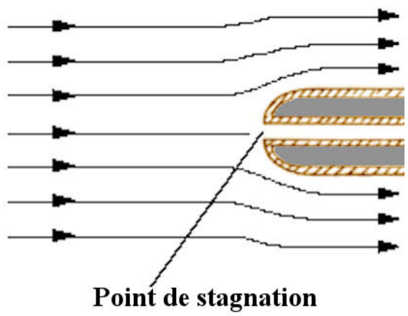
Le tube de Pitot permet de mesurer la vitesse relative entre un avion et l'air. Cette mesure s'obtient avec la différence de pression. Le tube a cette forme



commons.wikimedia.org/wiki/File:Pitot-tube.svg

À la position 1, la vitesse de l'air est nulle. Ce n'est pas super évident puisque le bout du tube est dans l'air qui se déplace, mais on peut comprendre pourquoi quand on examine les lignes de courant à cet endroit.

L'air va passer de chaque côté de l'entrée du tube de sorte que juste à l'entrée du tube, la vitesse de l'air est nulle. C'est ce qu'on appelle un point de stagnation.



www.efunda.com/designstandards/sensors/pitot_tubes/pitot_tubes_theory.cfm

Au point 2, il y a un déplacement d'air, ce qui signifie que la pression est plus petite. On peut voir que la pression est plus faible en observant que la colonne de liquide est plus petite.

Avec la différence de hauteur du liquide, on peut alors trouver la différence de pression

$$\Delta P = \rho_{liq} g \Delta h$$

En comparant les pressions et vitesses de l'air aux positions 1 et 2 avec l'équation de Bernoulli, on a

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho_{air} v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho_{air} v_2^2$$

$$P_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho_{air} v^2$$

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho_{air} v^2$$

En égalant les deux différences de pressions, on a

$$\frac{1}{2}\rho_{air} v^2 = \rho_{liq} g \Delta h$$

Ce qui donne

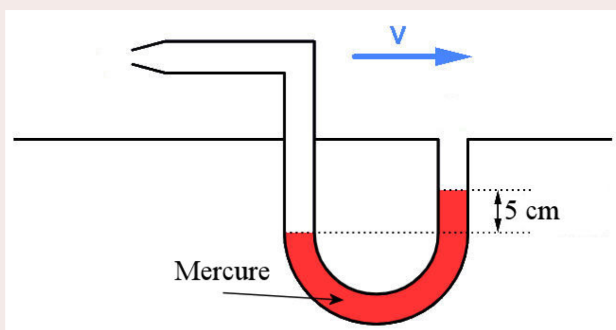
Vitesse selon le tube de Pitot

$$v = \sqrt{\frac{2\rho_{liq} g}{\rho_{air}} \Delta h}$$

(Évidemment, il existe des corrections à cette formule pour prendre en compte la compression de l'air qu'il y a en réalité.)

Exemple 10.5.1

Dans la situation montrée sur cette figure, quelle est la vitesse de l'air ? (La masse volumique du mercure est 13 600 kg/m² et la masse volumique de l'air est de 1,2 kg/m².)



La vitesse est

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{2\rho_{liq} g}{\rho_{air}} \Delta h} \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot 13\,600 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \frac{N}{kg}}{1,2 \frac{kg}{m^3}} \cdot 0,05 m} \\ &= 105,4 \tfrac{m}{s} \end{aligned}$$

Les tubes de Pitot sont facilement reconnaissables sur un avion. Voici les tubes d'un Falcon 50.

www.lavionnaire.fr/InstVolCirAnemo.php

Il y a aussi la prise d'air statique qui n'est pas dans le tube (position 2 sur la figure au début de cette section.) Voici à quoi ressemblent ces prises d'air.

www.lavionnaire.fr/InstVolCirAnemo.php

C'est une composante très importante. Parfois, les entrées du tube se remplissent de glace et la mesure de la vitesse devient alors impossible. Cela peut être catastrophique quand l'avion est contrôlé par un ordinateur de bord qui utilise les données des tubes de Pitot. En perdant ces données, l'ordinateur ne peut plus contrôler l'avion et les pilotes doivent reprendre alors le contrôle de l'avion. Dans certains cas, cette reprise de contrôle ne se passe pas bien, comme l'air de l'écrasement du vol 447 Rio-Paris d'Air France. Heureusement, les tubes de Pitot restent rarement gelés très longtemps puisqu'ils sont souvent chauffés. L'image de droite montre d'ailleurs des marques bleues créées par le chauffage.

www.lavionnaire.fr/InstVolCirAnemo.php

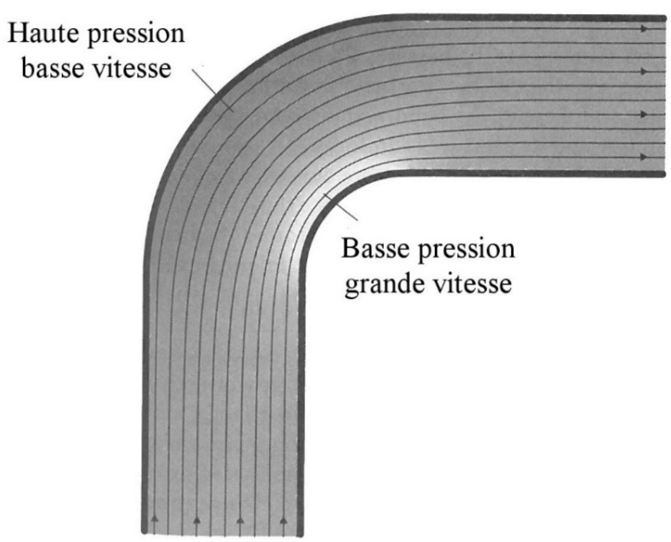
Il est aussi très important de ne pas oublier d'enlever les protecteurs de tubes avant le décollage…

www.aircraftspruce.ca/catalog/pspages/aeroexec13-18393.php

10.7 CHANGEMENT DE DIRECTION D'UN FLUIDE

Quand un fluide change de direction, une force centripète doit agir sur chaque morceau de fluide. On peut comprendre qu'un petit morceau de fluide en contact avec les parois du tuyau peut subir une force normale, mais un morceau de fluide qui ne touche pas aux parois ne peut pas subir cette normale. En fait, un petit morceau de fluide subit généralement uniquement une force de gravitation et des forces de pression. Il se peut que la force de gravitation puisse être dans la bonne direction pour faire la force centripète, mais généralement, c'est la force de pression qui va générer la force centripète.

Cela veut dire que quand un fluide change de direction, il doit y avoir une variation de pression dans le fluide pour générer la force centripète.



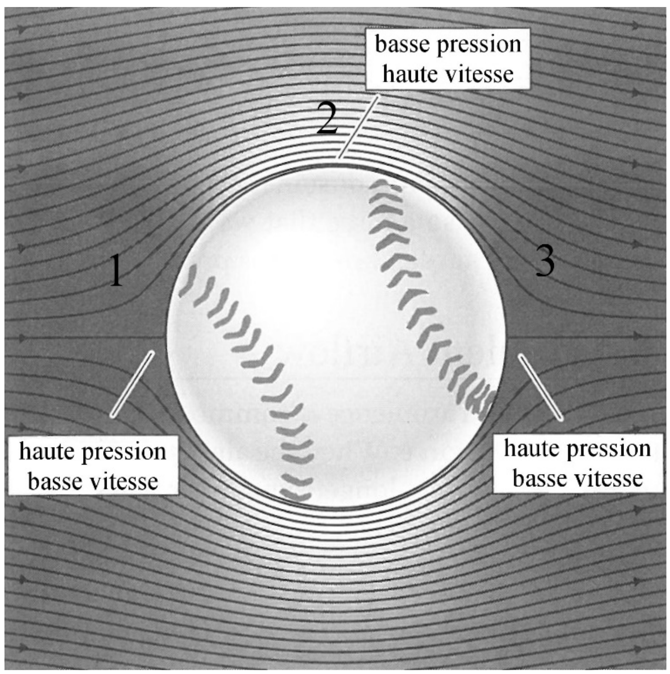
Louis Bloomfeld, How everything Works, Wiley, 2008

La pression plus grande à l'extérieur du virage fait une force vers le centre qui génère la force centripète.

Quand un fluide change de direction, la pression à l'extérieur du virage doit être plus grande que celle à l'intérieur du virage.

Évidemment, si la pression est plus petite à l'intérieur du virage, la vitesse doit être plus grande. Cette vitesse plus grande signifie également que les lignes de courant doivent être un peu plus près les unes des autres à l'intérieur du virage qu'à l'extérieur. La figure montre cette différence de distance entre les lignes de courant.

Sachant cela, examinons le mouvement de l'air autour d'une balle de baseball selon ce qu'on sait jusqu'ici.



Louis Bloomfeld, How everything Works, Wiley, 2008

Suivons le mouvement de l'air qui passe au-dessus de la balle.

Environ à la position indiquée par 1, l'air doit contourner la balle. La trajectoire de l'air doit donc changer pour être déviée en s'éloignant de la balle. Pour qu'il y ait cette déviation, la pression doit être plus grande près de la balle. Cela signifie que la pression devant la balle doit être plus grande. Si la pression est grande, la vitesse est petite. Il y a même un point de stagnation directement devant la balle (à l'endroit où une ligne de courant arrive sur la balle).

À la position 2, l'air doit suivre la courbure de la balle. Pour que l'air soit dévié vers la balle, la pression près de la balle doit être petite. Cela veut également dire que la vitesse de l'air à cet endroit est très grande.

À la position 3, l'air est à nouveau dévié en s'éloignant de la balle. Cette déviation est faite par une grande pression d'air à l'arrière de la balle. L'air à une vitesse très faible à l'arrière de la balle et il y a même un point de stagnation directement à l'arrière de la balle.

Il y a toutefois un sérieux problème avec tout cela. Selon ce qu'on a ici, la trainée sur la balle serait nulle puisque le fluide ne vient jamais pousser sur la balle. Toutes les parties du fluide suivent les lignes de courant. En suivant ces lignes, la vitesse du fluide tout près de la balle est toujours parallèle à la surface. De l'air qui se déplace parallèlement à la surface ne pousse pas sur la surface. D'accord, il y a deux lignes qui touchent à la balle (à l'avant et à l'arrière de la balle), mais ces deux positions correspondent à des points de stagnation, ce qui veut dire que la vitesse du fluide par rapport à la balle est nulle à cet endroit. Si la vitesse est nulle, il n'y a pas de poussée.

L'air ne pousse pas directement sur la balle, mais les forces de pression de l'air exercent des forces sur la balle. Ces forces pourraient générer une force qui s'oppose au mouvement. Or, les forces de pression sur la balle sont parfaitement symétriques à l'avant et à l'arrière de la balle. En clair, la pression élevée à l'arrière de la balle fait une force vers la gauche qui est exactement compensée par la force de pression vers la droite générée par la zone de pression élevée à l'avant de la balle.

Les forces de friction faites par le fluide peuvent aussi générer une trainée. Cependant, nous considérons ici un fluide qui ne génère pas de force de friction. La trainée totale serait donc nulle dans ce cas.

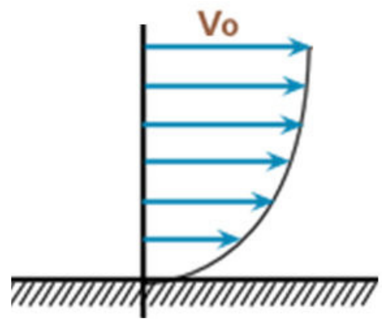
10.8 VISCOSITÉ ET COUCHE LIMITE

On va maintenant prendre en compte les forces de friction.

À la surface, le fluide ne se déplace pas par rapport à un objet

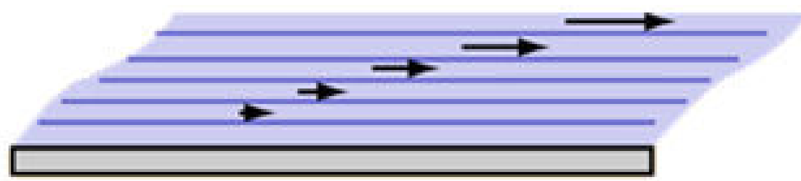
Il y a premièrement la force de friction entre le fluide et la surface d'un objet. Ce pourrait, par exemple, être la friction entre les parois d'un tuyau et le fluide ou la friction entre la surface de l'aile d'un avion et l'air en mouvement autour de l'aile. En fait, on découvre qu'il n'y a pas de mouvement de fluide par rapport à la surface. Autrement dit, le fluide ne se déplace pas par rapport à la surface de l'objet. Dans un tuyau d'arrosage, la vitesse de l'eau est nulle tout près des parois. Pour un avion, cela signifie que l'air ne glisse pas sur les ailes. L'air en contact avec l'aile reste en place sur l'aile.

La figure de droite montre une surface au repos en contact avec de l'air qui se déplace à la vitesse v_0. À la surface de la plaque, la vitesse est nulle (la même que la plaque). La vitesse augmente ensuite à mesure qu'on s'éloigne de la surface pour atteindre v_0. L'épaisseur de la couche (appelé la *couche limite*) est définie comme étant l'épaisseur nécessaire pour atteindre 99 % de v_0.



La viscosité

Il y a aussi de la friction quand du fluide se déplace par rapport au fluide environnant. Si un fluide n'a pas de vitesse à la surface d'un objet et une certaine vitesse un peu au-dessus de la surface, alors on peut imaginer que le fluide est formé de plusieurs couches superposées et que la vitesse de ces couches augmente graduellement à partir de la surface.



hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/pfric.html

La force de friction qu'il y a quand une couche de fluide glisse sur une autre couche de fluide est liée à la *viscosité* du fluide. Plus la viscosité est élevée, plus il est difficile pour une couche de se déplacer par rapport aux couches environnantes. Ainsi, la vitesse va augmenter beaucoup plus lentement à partir de la surface si la viscosité est élevée.

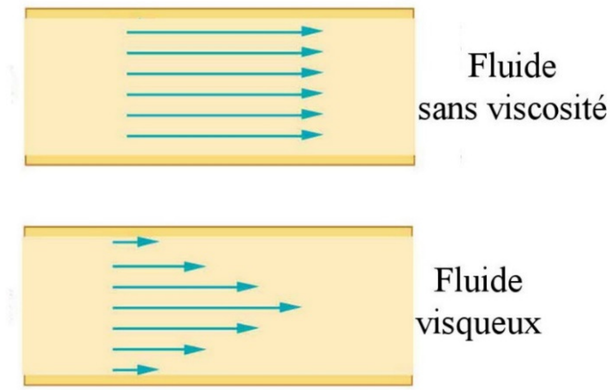
On peut voir ces forces à l'œuvre quand on essaie de verser du miel. Le miel près de parois reste en place. À partir de la surface du pot, la vitesse augmente, mais comme la viscosité du miel est très élevée, la vitesse ne peut pas augmenter très rapidement. Même au milieu du pot, la vitesse est encore très petite.

Il y a des fluides très visqueux, comme le miel, et il y a des fluides moins visqueux, comme l'air. Voici une table donnant quelques valeurs de viscosité (qui se mesure en Pa·s) pour quelques fluides.

Fluide	**Viscosité**
Hélium liquide à -271 °C	0
Air à 20 °C	0,000 018 3 Pa·s
Eau à 20 °C	0,001 Pa·s
Huile d'olive à 20 °C	0,084 Pa·s
Shampoing à 20 °C	100 Pa·s
Miel à 20 °C	1000 Pa·s
Verre à 540 °C	1 000 000 000 000 Pa·s

Fluide dans un tuyau

Voyons, en combinant ces informations, ce qui se passe quand un liquide circule dans un tuyau.



opentextbc.ca/openstaxcollegephysics/chapter/viscosity-and-laminar-flow-poiseuilles-law/

Le liquide ne se déplace pas à la surface du tuyau et la vitesse augmente graduellement pour atteindre une valeur maximale au centre du tuyau. Le rythme d'augmentation de la vitesse dépend de la viscosité du fluide. Le rythme de changement de vitesse à partir des parois dépend de la viscosité du liquide.

Si ça vous intéresse, des calculs assez ardus mènent à l'équation suivante (la loi de Poiseuille) qui permet de calculer le débit d'eau Q (en m³/s) qui sort d'un tuyau si on tient compte de la viscosité.

$$Q = \frac{\pi \Delta P r^4}{8 L \eta}$$

où ΔP est la différence de pression entre les deux bouts du tuyau, r est le rayon du tuyau, L est la longueur du tuyau et η est la viscosité du fluide. La variation du débit avec la 4^e puissance du rayon du tuyau signifie qu'une petite variation de diamètre peut grandement faire augmenter le débit. Un tuyau ayant un diamètre 2 fois plus grand donne un débit 16 fois plus grand ! Par exemple, les boyaux d'arrosage vendus en Amérique ont des diamètres de 5/8 de pouce et de 3/4 de pouce. La différence n'est pas bien grande (un diamètre 1,2 fois plus grand), mais le débit du tuyau ayant le plus grand diamètre est plus de 2 fois plus grand.

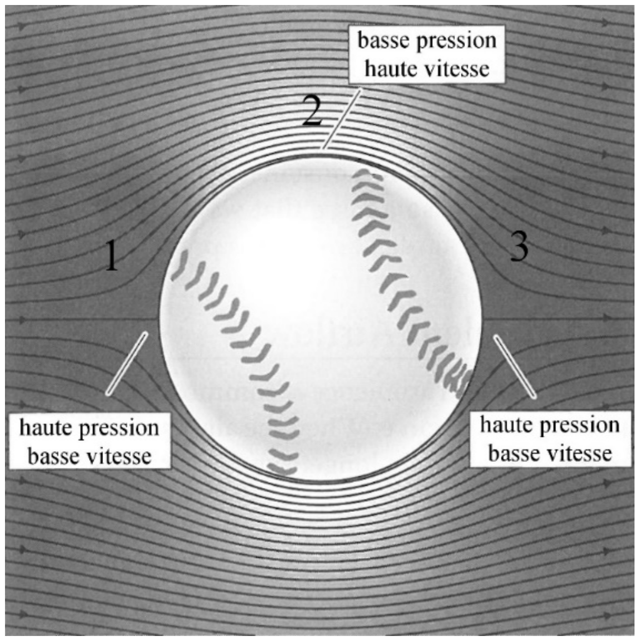
Notez qu'en ajoutant la viscosité, l'équation de Bernoulli

$$P + \rho g y + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante}$$

n'est plus vraie. En circulant dans le boyau, une partie de l'énergie mécanique du fluide est convertie en chaleur. Comme l'équation de Bernoulli avait été faite en supposant que l'énergie mécanique était conservée, l'équation n'est plus valide. Avec la viscosité, la valeur de la constante diminue à mesure que le fluide se déplace. Ces pertes seront plus faibles si vous utilisez des tuyaux plus gros pour transporter le fluide.

10.9 LA TURBULENCE

Revenons à notre exemple de balle de baseball qui se déplace dans l'air. À très basse vitesse, le mouvement de l'air autour de la balle sera assez bien décrit par ces lignes de courant.

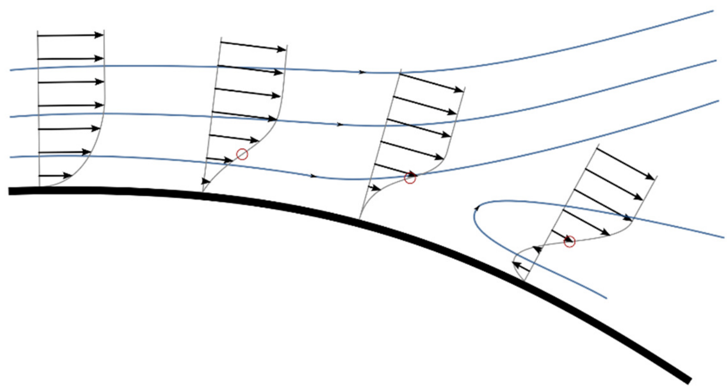


(Ce peut être une balle qui se déplace dans un fluide immobile ou un fluide en mouvement qui rencontre une balle au repos. Pour la mécanique des fluides, ces deux situations sont équivalentes. On va prendre le point de vue d'une balle immobile pour les explications qui suivent.)

C'est ce qu'on appelle un écoulement laminaire. Dans ce cas, les pressions à l'avant et à l'arrière de la balle sont identiques et les forces de pression sur la balle s'annulent toutes pour donner une force nette nulle. Il y a quand même une force de friction sur la balle qui vient de la viscosité du fluide. Le fluide en contact avec la surface de la balle ne se déplace pas alors que le fluide se déplace un peu plus loin de la surface. Cette différence de vitesse entre les couches de fluide génère la force de friction qui s'oppose au mouvement de la balle. Ce n'est donc pas le mouvement de l'air sur la balle qui génère la friction (puisque l'air est toujours immobile par rapport à la balle à sa surface). Ce sont plutôt les forces de friction entre les couches d'air en mouvement qui génèrent une force de friction qui se transmettent ultimement à la balle.

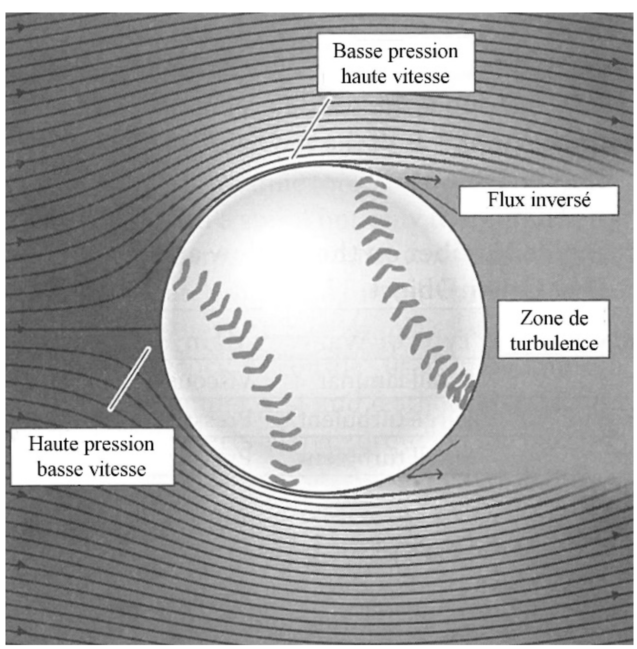
À l'avant de la balle, la pression diminue à mesure qu'on passe du point 1 au point 2. Cette différence de pression fait une force vers le point 2 qui accélère l'air vers le point 2. La vitesse de l'air augmente donc. Tout va bien puisque la vitesse de l'air est plus grande au point 2. Ensuite, la pression augmente quand on passe du point 2 au point 3. Cette différence de pression fait une force vers le point 2 qui s'oppose au mouvement de l'air. Cette force qui s'oppose au mouvement de l'air fait ralentir l'air. Tout va bien puisque la vitesse de l'air est plus grande au point 2 et plus petite au point 3.

Cependant, on a vu que l'air juste à la surface de la balle ne se déplace pas et que l'air tout juste au-dessus de la surface de la balle a une vitesse très faible. La différence de pression entre les points 2 et 3 pousse cet air très lent vers le point 2 et le fluide s'écoule dans la bonne direction en avant de la balle. Pas de problème quand la pression diminue dans le sens du déplacement de l'air. C'est par contre une autre histoire entre les points 2 et 3. Dans cette région, la différence de pression fait une force sur l'air vers le point 2. Pour l'air assez loin de la balle, cette force qui s'oppose au mouvement fait diminuer la vitesse, mais la vitesse de départ au point 2 est assez grande pour que l'air continue toujours à se déplacer vers le point 3. Toutefois, l'air près de la balle a très peu de vitesse ce qui fait en sorte que la différence de pression, si elle est assez grande, va finir par inverser la vitesse de l'air. L'air près de la balle commence alors à se déplacer dans la mauvaise direction (vers le point 2) !



en.wikipedia.org/wiki/Flow_separation

Ce mouvement d'air dans la mauvaise direction à l'arrière de la balle a d'importantes conséquences. L'air près de la surface de la balle qui se déplace vers le point 2, s'insère comme un couteau entre la balle et l'air en mouvement plus loin de la balle et provoque une séparation entre le flux d'air et la balle. Les lignes de courant quittent alors la balle. Cela provoque la création d'une zone de turbulence à l'arrière de la balle.



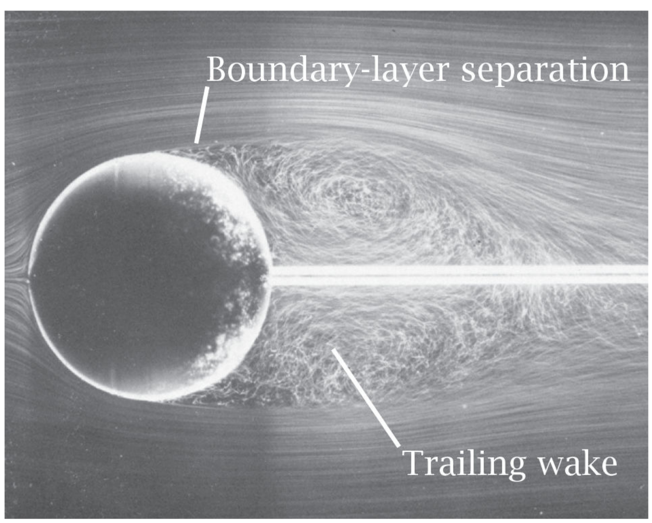
Puisque l'air n'a plus besoin de se rendre à l'arrière de la balle, les lignes de courant ne sont plus aussi courbées qu'avec le flux laminaire. Cela signifie que la pression à l'arrière de la balle n'a pas à être aussi grande que la pression à l'avant de la balle (elle est pratiquement égale à la pression atmosphérique). On a maintenant une différence de pression entre l'avant de la balle et l'arrière de la balle. Comme la pression est plus grande à l'avant de la balle, il y a maintenant une force nette vers l'arrière de la balle qui s'oppose au mouvement de la balle. La trainée est maintenant une superposition de force de friction due à la viscosité et force de pression opposée au mouvement.

La séparation du flux d'air à l'arrière de la balle commence en fait à une vitesse relativement basse. Le type d'écoulement autour d'un objet est déterminé par un nombre appelé le *nombre de Reynolds*. Sa valeur est donnée par

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho L v}{\eta}$$

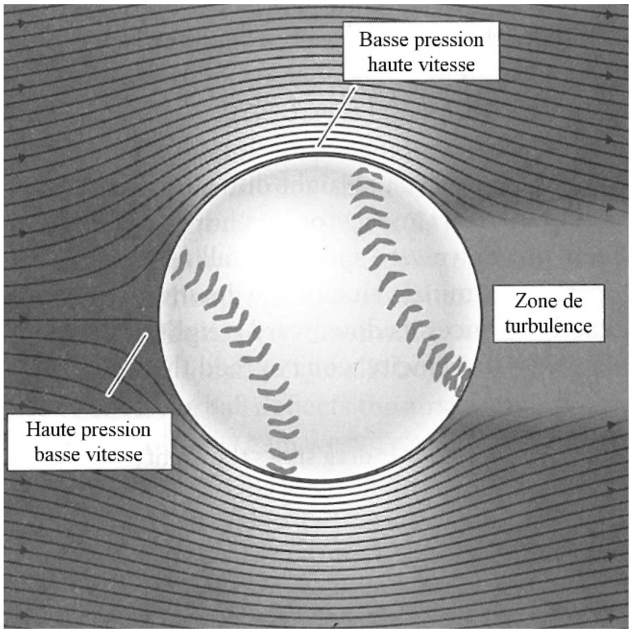
où ρ est la masse volumique du fluide, L est une dimension caractéristique de l'objet (le diamètre de la balle pour une balle de baseball), v est la vitesse du fluide par rapport à l'objet et h est la viscosité de fluide. Quand le nombre de Reynolds est inférieur à 2300 environ, le flux est laminaire. Pour notre balle de baseball qui se déplace dans l'air, cela correspond à une vitesse de 0,5 m/s. Au-delà de cette vitesse, il y a une zone de turbulence à l'arrière de la balle.

Les figures ne montrent pas les lignes de courant dans la zone de turbulence. C'est parce que les lignes de courant changent constamment de forme dans cette zone en formant une multitude de petits tourbillons.



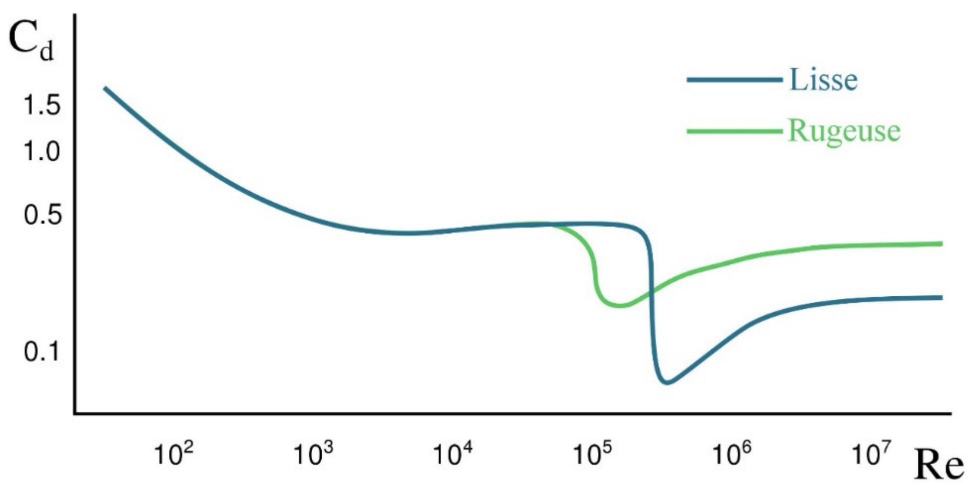
assets.press.princeton.edu/chapters/s6-6_10592.pdf

Si le nombre de Reynolds est très grand (plus de 100 000), alors la turbulence s'installe à l'intérieur de la couche limite. Les tourbillons dans la couche limite permettent à l'énergie cinétique des couches d'air à l'extérieur de la couche limite de se transférer à la couche limite pour accroitre la vitesse de l'air dans la couche limite. Cette plus grande vitesse permet de retarder le décollement de la couche limite. Ce décollement va donc se produire plus loin vers l'arrière de la balle. Cela réduit la taille de la zone de turbulence.



On voit que sur les bords de la zone de turbulence, la pression avait commencé à réaugmenter avant que la couche limite ne se sépare de la surface. Il y a donc un peu plus de pression sur l'arrière de la balle. La différence entre la force de pression qui s'exerce sur le devant de la balle est maintenant, en partie, compensée par cette pression sur l'arrière de la balle. Comme la trainée était en grande partie générée par cette différence de force de pression entre l'avant et l'arrière, il y a une diminution importante de la trainée quand la couche limite devient turbulente.

On peut voir cette baisse importante de trainée d'une balle sur ce graphique. C'est le graphique du coefficient de trainée C_d d'une balle.



commons.wikimedia.org/wiki/File:Drag_coefficient_on_a_sphere_vs._Reynolds_number_-_main_trends.svg

À la gauche du graphique, le nombre de Reynolds est très bas et l'écoulement est laminaire (pas de zone de turbulence à l'arrière de la balle) et la trainée vient uniquement de la viscosité. Dans ce cas, la trainée est proportionnelle à la vitesse v. Mais comme le C_d est définie par

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \pi A v^2$$

le C_d doit diminuer avec la vitesse pour éliminer le carré de v dans la formule. On voit bien cette baisse du C_d sur le graphique.

Quand le nombre de Reynolds atteint 2300, alors C_d se stabilise à environ 0,5. Il y a maintenant une zone de turbulence derrière la balle et la force de trainée vient essentiellement de la différence de pression entre le devant de la balle et le derrière de la balle.

Quand le nombre de Reynolds atteint environ 200 000, il y a une baisse soudaine du coefficient de trainée pour une balle lisse. Cela correspond au moment où la turbulence s'installe dans la couche limite, ce qui fait diminuer la taille de la zone de turbulence à l'arrière de la balle. Comme cette diminution de taille de la zone de turbulence entraine une baisse de la force de trainée, le coefficient diminue.

On remarque que la baisse soudaine de la valeur de C_d ne se produit pas à la même vitesse pour une balle rugueuse que pour une balle lisse. Les imperfections sur la balle rugueuse aident à générer de la turbulence dans la couche limite. La turbulence s'installe donc à une vitesse plus faible quand il y a imperfections à la surface de la balle. Sur une certaine plage de vitesse, la trainée sur une balle rugueuse est donc plus faible que pour une balle lisse ! (Un résultat vraiment contre-intuitif.)

Ça semble un peu marginal, mais cette plage de vitesse correspond à des vitesses de balle tout à fait communes. Si les balles de baseball étaient lisses, la turbulence s'installerait dans la couche limite quand la vitesse de la balle atteindrait environ 250 km/h. En ajoutant de grosses coutures sur la balle, on fait apparaitre de la turbulence dans la couche limite à une vitesse d'environ 80 km/h. Ainsi, la friction sur la balle de baseball avec des coutures se déplaçant à 160 km/h est pratiquement 2 fois plus petite que pour une balle lisse. Avec une balle lisse, personne ne parviendrait à faire des coups de circuit.

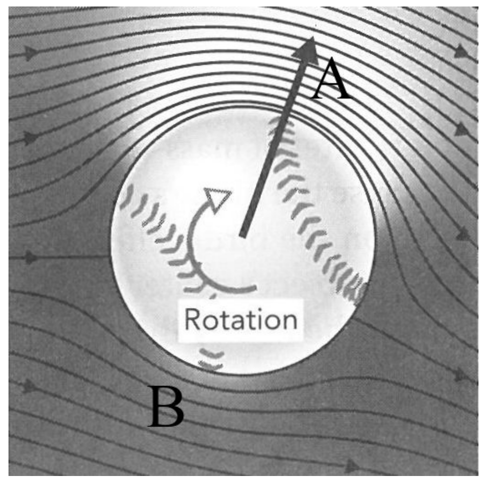
Les petites alvéoles à la surface d'une balle de golf permettent également de diminuer la force de friction sur la balle. Avec une balle lisse, la baisse soudaine de trainée se produirait à environ 500 km/h, une vitesse que n'atteint jamais une balle de golf. Avec les alvéoles, la baisse de coefficient se produit environ à 50 km/h. À des vitesses typiques de 250 à 300 km/h sur les coups de départ, la friction sur une balle avec alvéoles est pratiquement 2 fois plus petite que sur une balle lisse. Avec une balle lisse, les coups de départ iraient beaucoup moins loin.

10.9 LA DÉVIATION DE LA TRAJECTOIRE D'UNE BALLE

La force faite par l'air s'oppose au mouvement. C'est la trainée. Toutefois, elle peut aussi générer d'autres forces perpendiculaires au mouvement de l'objet. Pour qu'il y ait de telles forces sur une balle, la balle doit dévier le flux d'air. Si la balle fait une force sur l'air pour dévier le flux d'air, alors l'air fait une force sur la balle.

Pour y arriver, on doit faire tourner la balle sur elle-même. L'air en contact avec la balle ne se déplace pas par rapport à la balle. Si on fait tourner la balle, l'air en contact avec la balle suit le mouvement de la balle.

Commençons avec une balle qui se déplace assez lentement pour que le flux soit laminaire.



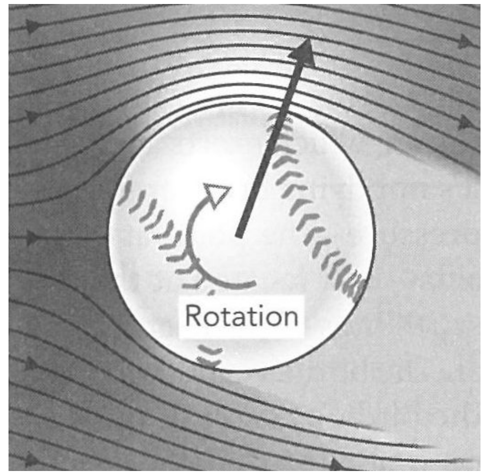
Du côté de la balle qui tourne dans le sens du mouvement de l'air (côté A sur la figure), l'air est entrainé vers la droite par la couche limite près de la balle. Cela augmente la vitesse de l'air dans cette région par rapport à ce qu'on aurait si la balle ne tournait pas.

Du côté de la balle qui tourne dans le sens contraire du mouvement de l'air (côté B sur la figure), l'air est entrainé vers la gauche par la couche limite près de la balle. Cela diminue la vitesse de l'air dans cette région par rapport à ce qu'on aurait si la balle ne tournait pas.

La vitesse plus grande en A signifie que la pression est plus faible à cet endroit. La vitesse plus petite en B signifie que la pression est plus grande à cet endroit qu'à la position A. La pression n'est donc plus égale entre les deux côtés de la balle. Il y a donc une force nette dans la direction de la flèche montrée sur la figure. Il y a une composante de cette force qui est perpendiculaire au mouvement. Cette force est la force de Magnus.

Notez que la basse pression en A fait fortement dévier l'air qui passe de ce côté de la balle. La pression en B est aussi plus petite que la pression atmosphérique, mais pas autant qu'en A. L'air dévie aussi, mais pas autant qu'en A. Ces déviations différentes font en sorte que le flux d'air est, sur la figure, dirigé vers le bas après avoir contourné la balle. La balle a donc fait une force qui a fait dévier l'air vers le bas. Par la 3^e loi de Newton, l'air fait alors une force qui pousse la balle dans la direction de la flèche.

Examinons maintenant la situation si la balle va plus vite. La situation est assez similaire, mais il y a une différence. Le flux d'air est encore dévié par la balle et la zone de turbulence n'est plus exactement à l'arrière de la balle. La zone de turbulence n'est plus exactement derrière la balle parce que la couche limite va se séparer de la balle plus loin sur le dessus de la balle sur la figure. À cet endroit, le mouvement de la balle entraine l'air dans son mouvement, ce qui retarde le moment où le flux inversé va apparaitre. Au-dessous de la



balle sur la figure, l'air de la couche limite entrainé par la rotation ralentit le flux d'air. Cela facilite la création du flux inversé et la séparation se fait très rapidement.

Notez que la grandeur de cette force augmente avec la vitesse de rotation et la vitesse de la balle. Il faut donc lancer la balle avec une vitesse très grande pour que la force perpendiculaire soit assez grande pour qu'on puisse voir l'effet de cette force.

Cette force qui s'exerce perpendiculairement au mouvement va faire dévier la balle de sa trajectoire. C'est ainsi qu'on peut faire une balle courbe au baseball. L'effet est encore plus spectaculaire avec un ballon de soccer/foot.
https://www.youtube.com/watch?v=ArI94Pmpudw
Ce petit clip montre aussi l'effet sur un ballon de basket
https://www.youtube.com/watch?v=2OSrvzNW9FE
Cette force est très importante sur une balle de golf. La rotation de la balle peut facilement faire dévier la balle d'un côté ou de l'autre pendant son vol.

La force perpendiculaire au mouvement horizontal peut faire dévier la trajectoire vers la gauche ou vers la droite, mais elle peut aussi être vers le haut ou vers le bas. Les coups de golf donnent beaucoup de rotation à la balle et cette rotation créée une force vers le haut. Quand la balle a beaucoup de vitesse au début de son mouvement, cette force peut même être plus grande que la gravitation de sorte que la balle accélère vers le haut. On voit alors la trajectoire de la balle s'incurver vers le haut. Cette force vers le haut permet à la balle d'aller beaucoup plus loin.

10.10 LES AILES D'AVION

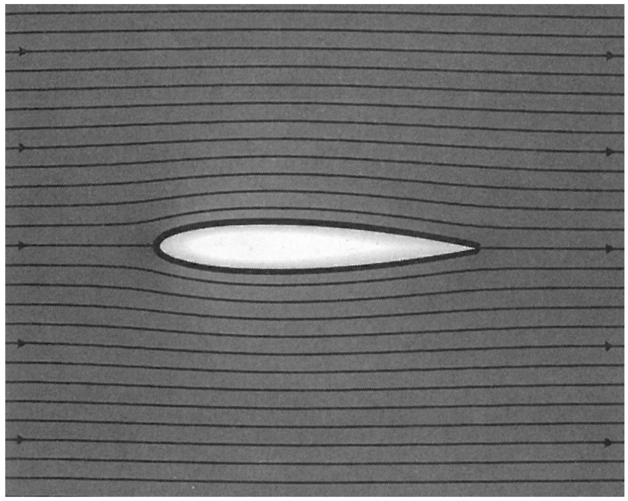
Différence de pression entre le dessus et le dessous de l'aile

Examinons maintenant comment les ailes d'avion en arrivent à faire une force de portance. On sait qu'il y a une portance parce que l'aile pousse de l'air vers le bas. Si l'aile pousse de l'air vers le bas, alors l'air pousse sur l'aile vers le haut selon la 3^{e} loi de Newton. Ce qu'on veut savoir ici, c'est comment cette force est faite sur l'aile.

On aurait pu penser que la force est simplement faite par l'air qui vient frapper l'aile. Cette collision ferait à la fois une force sur l'aile et l'air. Toutefois, on a vu que l'air qui est contact avec l'aile ne se déplace pas par rapport à l'aile. L'air ne peut donc pas frapper l'aile. Comment cet air qui n'est pas en mouvement par rapport à l'aile peut-il exercer une poussée sur l'aile ?

La force de portance vient d'une différence de pression entre le dessus et le dessous de l'aile. Voyons pourquoi il y a une telle différence de pression.

Au départ, l'avion est sur la piste et commence son mouvement. À ce moment, l'aile est pratiquement horizontale et le flux d'air autour de l'aile ressemble à ceci.

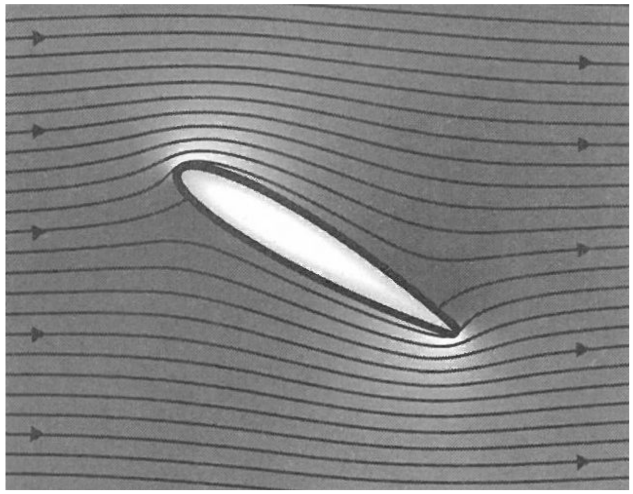


Dans ces conditions, la pression au bord d'attaque est un peu plus grande que la pression atmosphérique pour que l'air dévie et se sépare en 2 au bord d'attaque. La pression au-dessus de l'aile est plus petite que la pression atmosphérique pour que l'air soit dévié pour suivre la courbure de l'aile. La pression au-dessous de l'aile est également plus petite que la pression atmosphérique pour que l'air soit dévié pour suivre la courbure de l'aile. Il y a exactement la même pression au-dessus et en dessous de l'aile et il n'y a pas de portance. Finalement, la courbure des lignes de courant au bord de fuite montre que la pression au bord de fuite est un peu plus grande que la pression atmosphérique au bord de fuite.

Comme la pression est plus petite sur le dessus et le dessous des ailes, l'air circule plus rapidement à ces endroits.

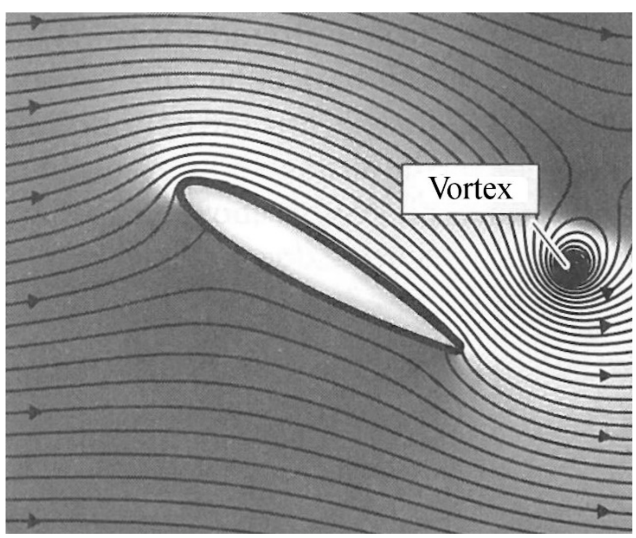
Le flux reste laminaire. La couche limite ne peut pas se détacher au bord d'attaque puisque la pression diminue en partant du bord d'attaque pour se rendre sur le dessus ou le dessous de l'aile. Il ne peut pas y avoir de flux inversé quand la pression baisse puisque la différence de pression pousse l'air vers l'arrière. La pression remonte ensuite à mesure que l'ail s'approche du bord de fuite. Toutefois, l'aile est très allongée dans cette direction pour que l'augmentation de pression se fasse plus lentement. Poussé vers l'arrière par la viscosité de l'air, l'air de la couche limite poursuit toujours sa route vers l'arrière puisque le gradient de pression n'est pas assez important pour inverser le flux d'air. Il n'y a donc pas de flux inversé et la couche limite ne se détache pas. Notez que quand le flux est laminaire, la trainée vient uniquement de la viscosité de l'air. Comme la viscosité de l'air est faible, la trainée sur l'aile est très faible.

L'avion atteint ensuite sa vitesse de décollage et les pilotes augmentent l'angle d'attaque. Il se produit alors une séquence d'évènements assez formidable. Au départ, le flux d'air contourne l'aile en suivant ces lignes de courant. (Inutile de dire que l'angle d'attaque est exagéré sur la figure.)

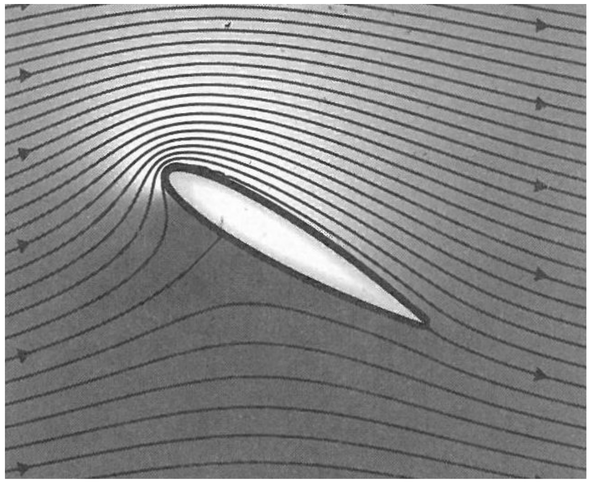


Sur la figure, on peut voir les variations de pression qui permettent aux lignes de courant de changer de trajectoire (c'est plus pâle quand la pression est plus petite). On doit avoir une pression plus faible sur l'aile quand l'air dévie vers l'aile et une pression plus forte sur l'aile quand l'aile dévie en s'éloignant de l'aile. Dans cette configuration, l'air n'est pas dévié après sa rencontre avec l'aile (il continue directement vers la droite après avoir contourné l'aile) et il n'y a pas de portance. Cela se remarque aussi par le fait qu'il ne semble pas y avoir de différence de force de pression entre le dessus et le dessous de l'aile (il semble y avoir autant de zones de haute et basse pression au-dessus et au-dessous de l'aile).

Toutefois, l'air qui passe sous l'aile fait un virage assez prononcé en arrivant au bord de fuite. L'inertie de l'air rend cette situation instable et rapidement il se forme un tourbillon à cet endroit. Ce tourbillon s'éloigne ensuite de l'aile.

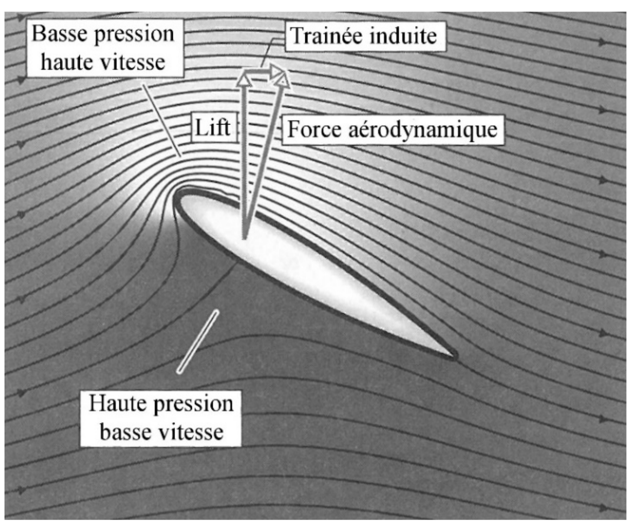


Après la formation de ce tourbillon, le flux d'air autour de l'aile change complètement.



Dans cette nouvelle configuration, il y a maintenant de la portance. On remarque maintenant que l'air se dirige un peu vers le bas après avoir contourné l'aile. L'air est donc poussé vers le bas par l'aile, comme prévu. Au-dessus de l'aile, les lignes de courant dévient presque toujours vers l'aile, ce qui signifie que la pression près de l'aile est plus petite que la pression atmosphérique. Sous l'aile, les lignes de courant dévient presque toutes en s'éloignant de l'aile, ce qui signifie que la pression sous l'aile est plus grande que la pression atmosphérique. Il y a alors une différence de pression entre le dessous et le dessus de l'aile. La pression sous l'aile qui fait une force vers le haut est alors plus grande que la force de pressions vers le bas qui s'exerce sur le dessus de l'aile. Il y a donc une force nette vers le haut.

Cette force (appelée la force aérodynamique), qui provient de la différence de pression entre les 2 côtés de l'aile n'est pas directement vers le haut. Elle est un peu aussi dirigée vers l'arrière. En séparant cette force en composante, on retrouve la portance (composante vers haut) et la trainée (composante vers l'arrière).



Remarquez que la pression la plus basse est au-dessus de l'aile, près du bord d'attaque. La courbure prononcée des lignes de courant à cet endroit demande une baisse de pression importante près de l'aile.

La pression plus basse sur le dessus de l'aile signifie aussi que l'air circule beaucoup plus rapidement sur le dessus de l'aile que sur le dessous de l'aile. Cela se remarque sur la figure par des lignes de courant plus près les unes des autres sur le dessus de l'aile.

C'est cette différence de pression entre le dessus et le dessous de l'aile qui génère la force vers le haut qui permet à l'avion de voler. Comme la pression est faite par les collisions des atomes de l'air sur les ailes, cela signifie que l'avion reste dans les airs tout simplement parce qu'il y a plus de molécules d'air qui frappent le dessous des ailes que le dessus des ailes. C'est quand même assez étonnant de constater que la multitude de collisions de tous ces petits atomes peut générer une force assez grande pour garder un Boeing 747 de 440 tonnes dans les airs !

On peut même estimer la différence de pression nécessaire entre le dessus et le dessous de l'aile pour par la portance.

Exemple 10.10.1

Un Airbus A350-900 de 260 000 kg est en vol. Quelle doit être la différence de pression entre le dessous et le dessus des ailes si la surface des ailes est de 442 m² ? Pour simplifier, on va supposer que la pression est la même partout sur le dessus de l'aile et que la pression est la même partout sur le dessous de l'aile.

Les forces sur l'avion sont

1) Le poids de l'avion (2 548 000 N) vers le bas.
2) La force de pression vers le haut faite par l'air sous l'aile (F_{P1}).
3) La force de pression vers le bas faite par l'air au-dessus de l'aile (F_{P2}).

Comme l'accélération verticale de l'avion est nulle, la 2e loi de Newton nous donne

$$\sum F_y = ma_y$$
$$-2\,548\,000N + F_{P1} - F_{P2} = 0$$

Comme la force de pression est égale à PA, on a

$$-2\,548\,000N + P_1 A - P_2 A = 0$$
$$-2\,548\,000N + (P_1 - P_2)A = 0$$
$$-2\,548\,000N + \Delta P \cdot A = 0$$

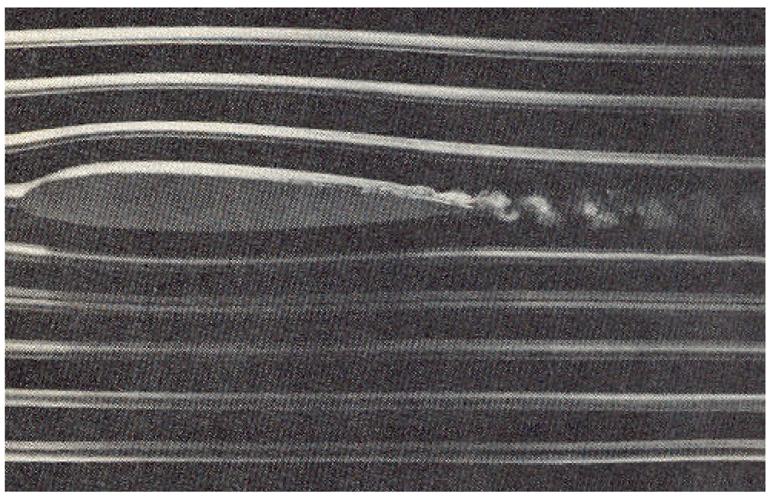
On a alors

$$-2\,548\,000N + \Delta P \cdot 442m^2 = 0$$
$$\Delta P \cdot 442m^2 = 2\,548\,000N$$
$$\Delta P = 5765Pa$$

Une simple différence de 5,8 kPa permet donc de générer assez de force vers le haut pour que l’avion vole.

Séparation de la couche limite

Sur le dessus de l’aile, la pression est plus faible près du bord d’attaque que près du bord de fuite. Cette différence de pression fait une force sur l’air vers le devant de l’aile. Cette force ralentit le mouvement de l’air à mesure que l’air se dirige vers le bord de fuite et c’est ce qui doit se passer selon la loi de Bernoulli (l’air va moins vite au bord de fuite puisque la pression est plus grande). Cependant, ce gradient de pression exerce aussi une force sur l’air tout près de l’aile dans la couche limite. Inévitablement, cette force vers l’avant mène à la formation d’un flux inversé et la couche limite se détache du dessus de l’aile. On peut voir la séparation près du bord de fuite sur cette image.

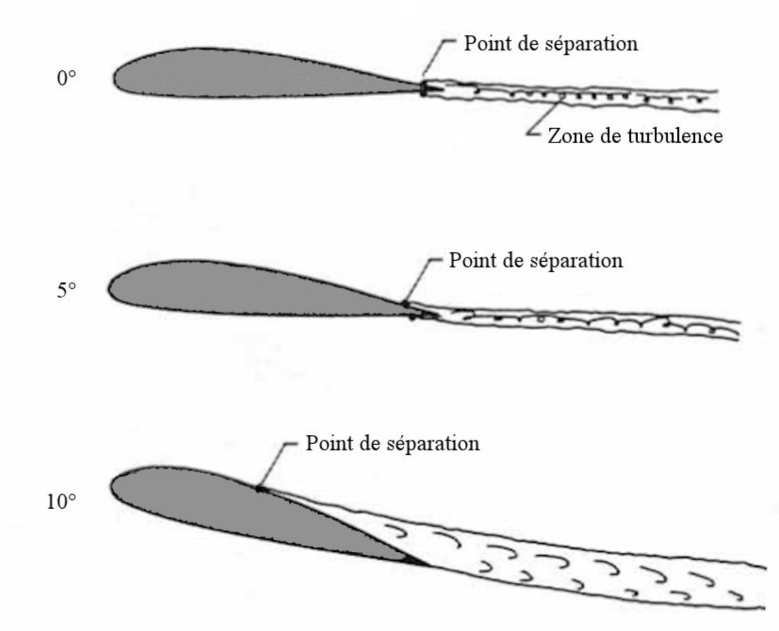


ffden-2.phys.uaf.edu/211.fall2000.web.projects/c.%20Schaefer/aero4.htm

Cette séparation nuit à la portance puisque la pression dans la zone de turbulence n’est pas aussi basse que quand il n’y a pas de séparation de la couche limite. Tant que le point de séparation de la couche limite est près du bord de fuite, la baisse de portance n’est pas très grande puisque la baisse de pression importante qui permet d’obtenir une différence de pression entre le dessous et le dessus de l’aile se fait surtout près du bord d’attaque.

À mesure que l’angle d’attaque augmente, la trajectoire de l’air qui passe par-dessus le bord d’attaque courbe de plus en plus, ce qui signifie que la pression devra être de plus en plus basse à la surface de l’aile à cet endroit. C’est une bonne chose, car cela augmente la différence de pression entre le dessous et le dessus de l’aile et c’est cette différence de pression qui fait la portance. La portance augmente donc avec l’angle d’attaque.

Toutefois, cela augmente aussi la différence de pression sur le dessus de l’aile entre le bord d’attaque et le bord de fuite. Avec une différence de pression plus grande, la formation d’un flux inversé est favorisée. Cela fait en sorte que le point de détachement de la couche limite se déplace vers le bord d’attaque à mesure que l’angle d’attaque augmente.

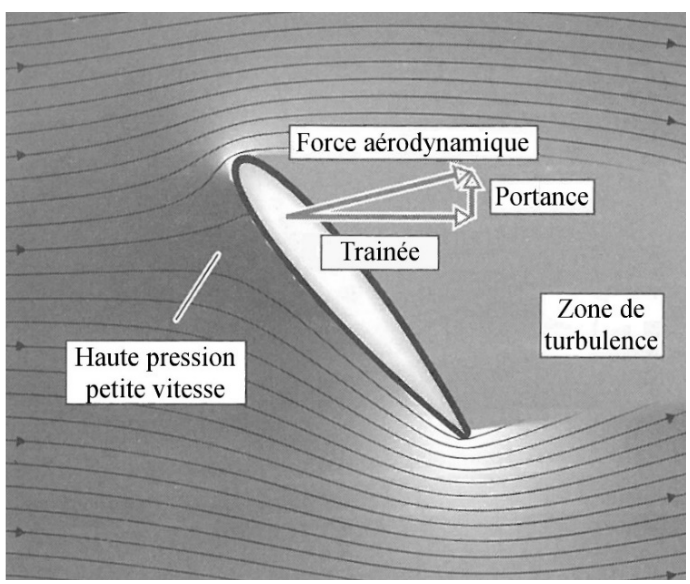


www.stengel.mycpanel.princeton.edu/MAE331Lecture3.pdf

L'effet de ce déplacement n'est pas encore très grand puisque c'est près du bord d'attaque que la basse pression génère la différence de pression qui fait la portance.

Décrochage de l'aile

Le point de séparation de la couche limite se déplace vers l'avant à mesure que l'angle d'attaque augmente. Si on augmente trop l'angle d'attaque, le point de séparation va trop s'approcher du bord d'attaque. Voici le flux d'air autour de l'aile quand il y a cette séparation au bord d'attaque.



Bien qu'il y ait encore la zone de haute pression sous l'aile, on a perdu la zone de basse pression au-dessus de l'aile. La différence de force entre les deux surfaces devient beaucoup plus petite et la force de portance devient beaucoup plus petite. L'aile décroche.

La figure suivante montre ce flux d'ail autour d'une aile qui décroche.

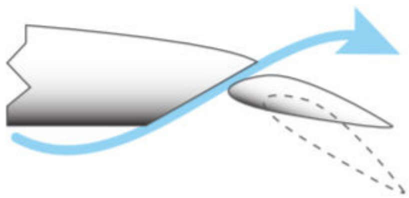
en.wikipedia.org/wiki/Flow_separation

Le petit clip suivant montre la zone de turbulence qui se forme au décrochage
https://www.youtube.com/watch?v=3buV79Q_YzE

Comment retarder la séparation de la couche limite

La séparation de la couche limite a donc de graves conséquences pour un avion si le point de séparation est trop près du bord d'attaque. On doit donc tout faire pour nuire à la formation du flux inversé.

L'utilisation des volets augmente la courbure de l'aile et favorise la séparation de la couche limite. Pour l'éviter, on laisse souvent passer un peu d'air entre l'aile et les volets. Cet air, qui arrive du dessous de l'aile va se ramasser sur le dessus de l'aile pour aider à pousser la couche limite vers l'arrière pour éviter la formation du flux inverse.



www.century-of-flight.net/5-types-of-flaps-explained/

On a vu aussi qu'une couche limite turbulente se sépare moins facilement de la surface. Il y a donc souvent de multiples artifices sur l'aile qui servent à générer de la turbulence dans la couche limite. Ce sont des générateurs de tourbillons (figure de gauche).

Au contraire, les réducteurs de portance (spoilers) éloignent la couche limite de l'aile ce qui force sa séparation. C'est ainsi qu'on détruit la portance de l'aile.

www.boldmethod.com/learn-to-fly/aerodynamics/vortex-generators/

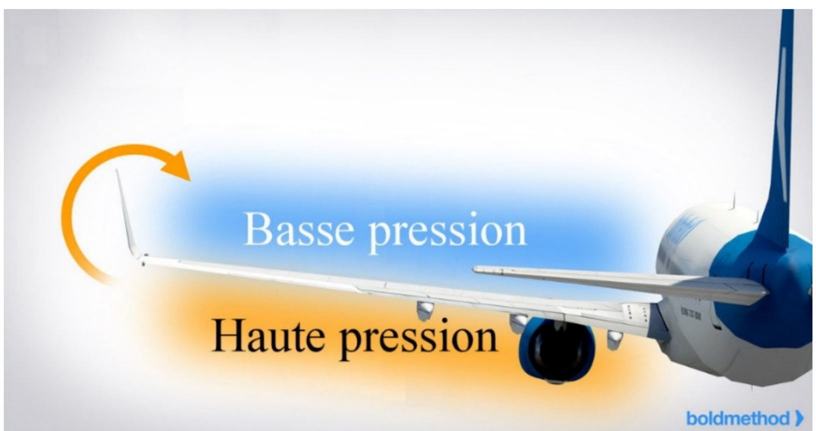
Condensation dans les zones de basse pression

Quand la pression de l'air très humide baisse, il peut y avoir condensation de l'humidité. Comme la pression de l'air qui passe sur le dessus de l'aile diminue, il se peut qu'il y ait condensation de l'air sur le dessus des ailes. L'image suivante est un cas extrême de condensation de l'humidité dans la zone de basse pression.

i.stack.imgur.com/Q78za.jpg

Les tourbillons marginaux

La pression de l'air sous l'aile est plus grande que la pression de l'air au-dessus de l'aile. Au bout de l'aile, l'air va donc vouloir contourner l'aile pour passer du dessous de l'aile au-dessus de l'aile.

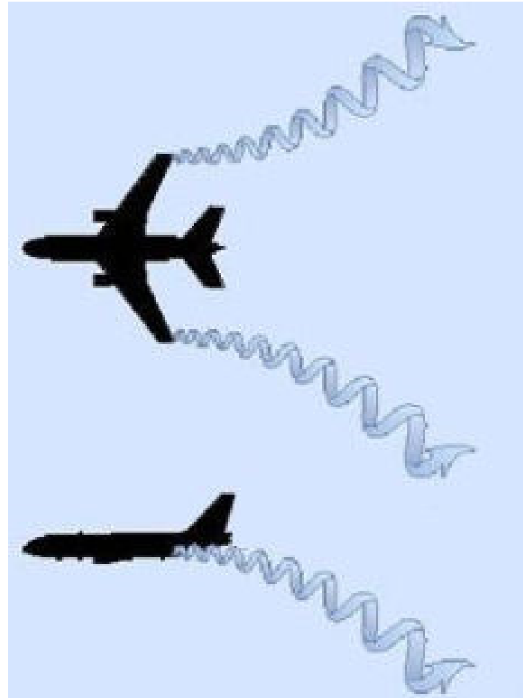


www.boldmethod.com/learn-to-fly/aerodynamics/how-winglets-work-to-reduce-drag-and-how-wingtip-vortices-form/

Il va donc se former des tourbillons au bout de l'aile, appelés des tourbillons marginaux (*wingtip vortices*). Ces tourbillons ne sont pas vraiment désirables puisqu'ils réduisent l'écart de pression entre les 2 surfaces de l'aile. Pour réduire l'importance des tourbillons, on peut ajouter des ailettes verticales (*winglets*) au bout des ailes.

www.boldmethod.com/learn-to-fly/aerodynamics/how-winglets-work-to-reduce-drag-and-how-wingtip-vortices-form/

Les tourbillons marginaux trainent derrière l'avion sur une distance de plusieurs kilomètres.



mediawiki.ivao.aero/index.php?title=Wake_turbulence

Ces tourbillons peuvent être un danger sérieux pour les avions. Un avion qui passe dans les tourbillons marginaux d'un autre avion peut se faire sérieusement secouer, surtout si c'est un avion assez léger qui passe dans les tourbillons d'un gros avion.

Les accidents causés par ces tourbillons sont quand même rares puisque le phénomène est bien connu. Les contrôleurs aériens laissent au moins un écart de 90 secondes entre les avions pour que les tourbillons aient le temps de se dissiper un peu.

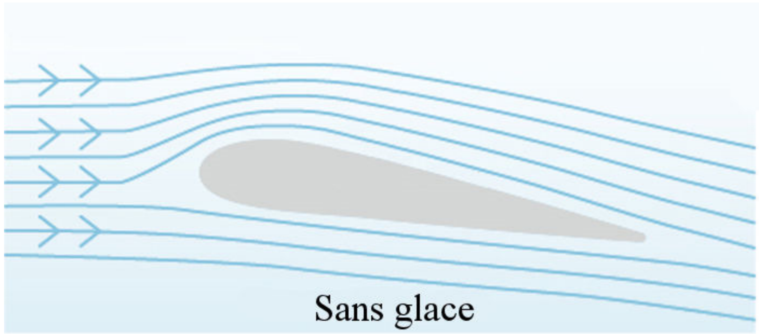
Il y a quand même eu quelques accidents. Le 12 novembre 2001, l'Airbus A300 du vol 587 d'American Airlines se retrouve dans les turbulences marginales d'un Boeing 747-400 qui avait décollé un peu avant à l'aéroport de JFK à New York. Les manœuvres nécessaires pour garder le contrôle de l'avion furent si importantes que la gouverne de direction s'est détachée de l'avion (Mayday, saison 13, épisode 5).

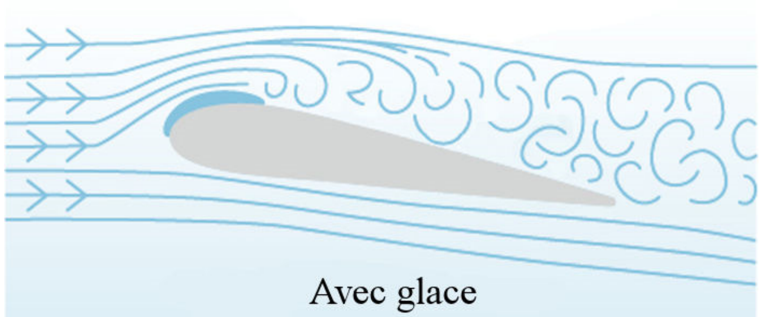
Le 4 novembre 2008, un Learjet 45 transportant le ministre de l'Intérieur du Mexique s'écrase en pleine heure de pointe à Mexico après une perte de contrôle provoquée par les tourbillons marginaux d'un Boeing 767-300 de Mexicana (Mayday, saison 14, épisode 8).

Le 6 février 1991, un avion militaire de ravitaillement de carburant se fait sérieusement secouer en Arabie Saoudite par les tourbillons marginaux d'un KC-135, un autre avion militaire qui le dépassait. Les mouvements de l'avion de ravitaillement ont été si violents que les deux moteurs de l'aile gauche se sont détachés. Les pilotes sont heureusement parvenus à se poser d'urgence.

Effet du givrage

Parfois, de la glace peut s'accumuler sur l'aile, surtout au bord d'attaque. Cette accumulation de glace, même minime, peut complètement changer le flux d'air autour de l'aile en provoquant un détachement de la couche limite. Comme la couche de glace se termine souvent abruptement, la couche limite se détache à la fin de la couche de glace.

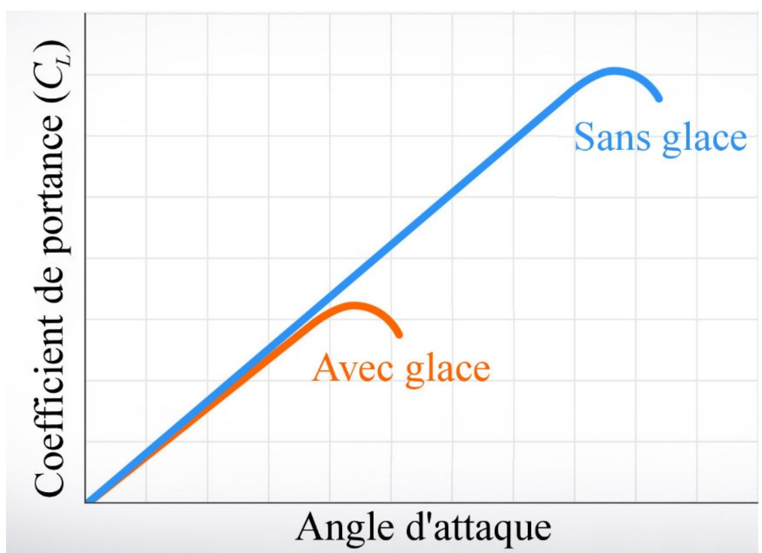




www.clariant.com/en/Innovation/Innovation-Spotlight-Videos/Safewing

Ce détachement, tout près du bord d'attaque, élimine la différence de pression entre le dessus et le dessous de l'aile et réduit considérablement la portance.

Voici comment pourrait changer le coefficient de portance d'une aile ayant une accumulation de glace sur son bord d'attaque.



www.boldmethod.com/learn-to-fly/aerodynamics/how-aircraft-icing-affects-your-wing-and-leads-to-early-stalls

La couche de glace fait donc sérieusement diminuer l'angle de décrochage.

Voici quelques accidents pour lesquels l'accumulation de glace sur les ailes a joué un rôle important.

1) Le 13 janvier 1982, le vol 90 d'Air Florida (un Boeing 737-200) décroche à une altitude de 300 m et s'écrase dans le Potomac peu après son décollage de Washington (Mayday, saison 13, épisode 4).

2) Le 12 décembre 1985, le vol 1285 d'Arrow Air (un DC-8) s'écrase à Gander (Terre-Neuve) (Mayday, saison 11, épisode 3).

3) Le 15 novembre 1987, le vol 1713 de Continental Airlines (un DC-9) s'écrase au Colorado (Mayday, saison 18, épisode 10).

4) Le 10 mars 1989, le vol 1363 d'Air Ontario (un Fokker F28-1000) s'écrase à Dryden en Ontario (Mayday, saison 20, épisode 6).

5) Le 22 mars 1992, le vol 405 d'USAir (un Fokker F28-4000) s'écrase New York (Mayday, saison 20, épisode 6).

6) Le 31 octobre 1994, le vol 4184 d'American Eagle (un ATR 72-200) s'écrase à Chicago (Mayday, saison 7, épisode 8).

7) Le 9 janvier 1997, le vol 3272 de Comair (un ATR 72-200) s'écrase à Détroit (Mayday, saison 17, épisode 2).

8) Le 18 mai 2011, le vol 5428 de Sol Lineas Aéreas (un Saab 340A) s'écrase en Argentine (Mayday, saison 20, épisode 6).

Mauvaises explications de la force de portance

L'explication de la portance des ailes est souvent mal faite. Très souvent, on montre une image de ce type.

www.discoverhover.org/infoinstructors/newguides/guide17-bernoulli.html

On dit alors que l'air qui passe par-dessus l'aile doit parcourir une distance plus grande que l'air sous l'aile. En partant du principe que le temps doit être le même pour le passage sous ou sur l'aile, on en conclut que la vitesse de l'air doit être plus grande au-dessus de l'aile. Puisqu'une vitesse plus grande signifie une pression plus petite selon l'équation de Bernoulli, on en conclut que la pression doit être plus grande sous l'aile que sur l'aile. La différence de pression génère alors la portance.

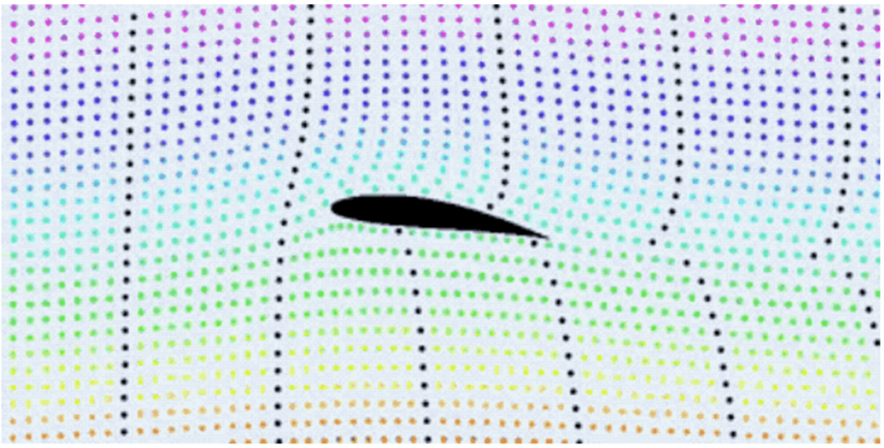
Voyons ce qui cloche avec cette explication.

Commençons par le fait que les lignes de courant ne sont pas déviées vers le bas après la rencontre avec l'aile. Si l'air n'est pas dévié vers le bas, il n'y a pas de force sur l'air. S'il n'y a pas de force sur l'air, alors il n'y a pas de force sur l'aile.

On utilise ensuite l'idée que le temps de passage de l'air au-dessus et en dessous de l'aile doit être le même. On se sert de cette idée pour arriver à la conclusion que la vitesse de l'aile au-dessus de l'aile doit être plus grande. Ce principe signifie que la portance pourrait seulement exister si le dessus de l'aile est davantage courbé que le dessous de l'aile. Pourtant, il peut y avoir de la portance sur une aile symétrique et même sur des ailes à cambrure négative (dessous de l'aile plus courbé que le dessus). On ne pourrait pas non plus expliquer comment un avion pourrait pouvoir voler la tête en bas.

www.si.edu/newsdesk/releases/british-royal-air-forces-red-arrows-fly-national-air-and-space-museums-udvar-hazy

En fait, le principe des temps égaux sur les 2 faces n'est pas vrai ! En réalité, l'air qui passe au-dessus de l'aile arrive au bord de fuite avant l'air qui passe en dessous de l'aile.



astrocampschool.org/flight/

Le principe des temps égaux n'est donc même pas vrai. Évidemment, on pourrait simplement dire que l'air va plus vite sur le dessus, mais cette affirmation semblerait venir de nulle part. On n'explique pas grand-chose si on fait seulement partir du postulat que la vitesse est plus grande sur le dessus sans pouvoir le justifier. Il faut donner une explication à cette vitesse plus élevée.

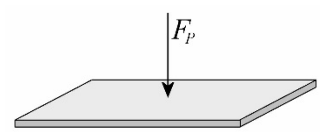
RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Force de pression (F_p)

1) Grandeur de la force

$$F_p = PA$$

2) Direction de la force



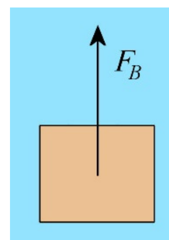
Force sur la paroi, perpendiculairement à la surface.

3) Point d'application de la force

Répartie également partout sur la surface de l'objet (ce qui revient au même que de mettre le point d'application au centre de la surface).

Poussée d'Archimède (F_A)

1) Grandeur de la force



$$F_A = \rho g V_f$$

2) Direction de la force

Vers le haut.

3) Point d'application de la force

Répartie partout sur la surface de la partie de l'objet qui est dans le fluide. (Ici, on peut se contenter de mettre le point d'application au centre de la partie de l'objet qui est dans le fluide.)

Débit du fluide

$$Q = Av$$

Équation de continuité pour un fluide incompressible

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Équation de Bernoulli pour un fluide incompressible

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Pression en fonction de la profondeur dans un fluide incompressible

$$P_h = P_{surf} + \rho g h$$

Lien entre la pression atmosphérique et la hauteur de la colonne d'un liquide (si la pression est nulle à la surface du liquide dans le tube)

$$P_{atm} = \rho_{liq} g h$$

Pression à la surface d'un liquide dans un tube à partir de la hauteur de la colonne de liquide

$$P = P_{atm} - \rho_{liq} g h$$

Force générée par un fluide

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

Formule de Torricelli

$$v^2 = 2gh$$

Différence de pression à partir de la différence de hauteur des colonnes de liquide

$$\Delta P = \rho_{liq} g \Delta h$$

Vitesse selon le tube de Pitot

$$v = \sqrt{\frac{2\rho_{liq} g}{\rho_{air}} \Delta h}$$

EXERCICES

10.1 La force de pression

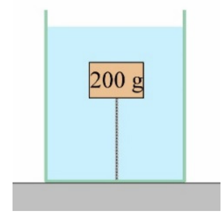
1. On place un gaz à l'intérieur d'une boite métallique hermétique de forme cubique dont les arêtes ont une longueur de 20 cm. Quelle est la force faite sur chacun des côtés de la boite par le gaz si sa pression à l'intérieur de la boite est de 300 kPa ?

2. Quelles sont la température, la pression et la masse volumique de l'air à une altitude de 15 500 pieds ?

3. Quelles sont la température, la pression et la masse volumique de l'air à une altitude de 42 000 pieds ?

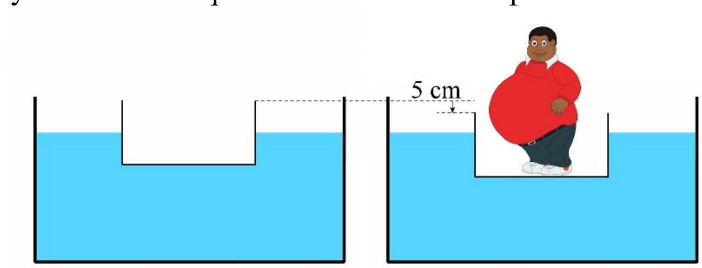
4. Un objet de 15 kg a un volume de 0,02 m³. On place cet objet dans l'eau (masse volumique de 1000 kg/m³). Est-ce que cet objet va couler ou flotter ?

5. Un bloc de cèdre de 200 g et ayant une masse volumique de 0,49 g/cm³ est attaché au fond d'un récipient rempli d'eau tel qu'illustré sur la figure. Quelle est la force exercée par la corde si la masse volumique de l'eau est de 1 g/cm³ ?



6. Un dirigeable avait une masse de 100 000 kg (sans hélium). Combien d'hélium devait-on utiliser pour le faire voler sachant que la masse volumique de l'air et de 1,3 kg/m³ et que la masse volumique de l'hydrogène est de 0,178 kg/m³ ?

7. Quand Sylvain embarque dans cette « chaloupe », elle descend de 5 cm. Quelle est la masse de Sylvain sachant que le fond de la chaloupe a une aire de 4 m² ?



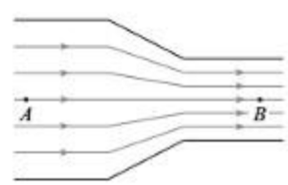
www.school-for-champions.com/science/fluid_floating.htm#.WSwYLes1-Uk
dk.pinterest.com/pin/507851295452117348/

8. Quel doit être le volume de chaque flotteur d'un DHC3 Otter pour qu'ensemble ils puissent générer une poussée d'Archimède 1,8 fois plus grande que le poids de l'avion ? (La masse maximale de cet avion est de 3 630 kg et la masse volumique de l'eau est de 1000 kg/m³.)

fr.wikipedia.org/wiki/De_Havilland_Canada_DHC-3_Otter

10.3 L'équation de continuité

9. De l'eau se déplace à 2 m/s dans un tuyau ayant 6 cm de diamètre (point A). L'eau arrive ensuite dans une partie du tuyau qui n'a que 2 cm de diamètre (point B). Quelle est la vitesse de l'eau dans cette partie du tuyau ?

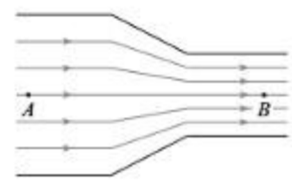


www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/problem-5-bernoulli-s-principle-saw-problems-1-2-pressure-two-points-fluid-different-point-q60995682

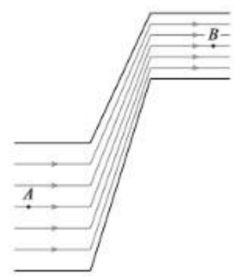
10. De l'eau se déplace à 2 m/s dans un tuyau ayant 6 cm de diamètre. L'eau arrive ensuite dans une autre partie du tuyau qui a un diamètre différent. Quel est le diamètre du tuyau si la vitesse de l'eau n'est que de 0,8 m/s dans cette partie du tuyau ?

10.4 L'équation de Bernoulli

11. De l'air se déplace à 15 m/s dans un tuyau ayant 10 cm de diamètre (point A). La pression de l'air à cet endroit est de 2 atmosphères. L'air arrive ensuite dans une partie du tuyau qui n'a que 5 cm de diamètre (point B). Quelle est la pression de l'air (en atmosphère) dans cette partie du tuyau ? (La masse volumique de l'air dans le tuyau est de 2 kg/m³.)



12. De l'eau se déplace à 4 m/s dans un tuyau ayant 10 cm de diamètre (point A). La pression de l'eau à cet endroit est de 1 atmosphère. L'eau arrive ensuite dans une partie du tuyau qui a un diamètre de 8 cm (point B). Quelle est la pression de l'eau (en atmosphère) dans cette partie du tuyau si le point B est 5 m au-dessus du point A ? (La masse volumique de l'eau dans le tuyau est de 1000 kg/m³.)

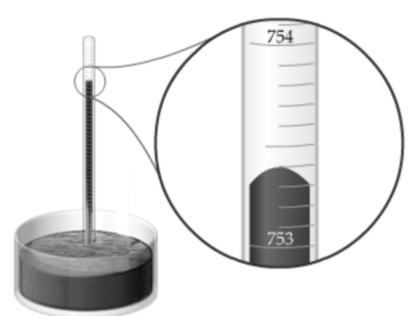


13. Quelle est la pression de l'eau (en atmosphère) à une profondeur égale à la profondeur de l'épave du Titanic (3821 m) ? (La masse volumique de l'eau est de 1000 kg/m³.)

14. Au fond d'un lac, la pression est 5 fois plus grande qu'en surface. Quelle est la profondeur du lac ? (La masse volumique de l'eau est de 1000 kg/m³.)

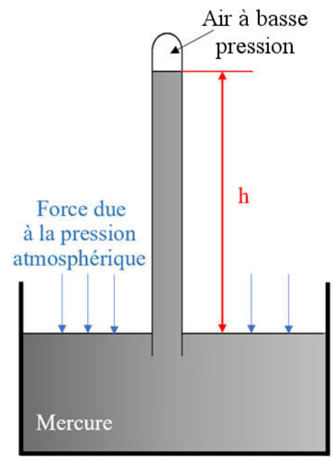
15. Un avion vole à une altitude de 20 000 pieds (à cette altitude, la pression est de 46,6 kPa). L'intérieur de l'avion est pressurisé à 80 kPa. En utilisant la table de l'atmosphère standard, calculez la force nette qui s'exerce vers l'extérieur sur un hublot qui a un diamètre de 40 cm.

16. L'image de droite montre la hauteur de la colonne de mercure (masse volumique de 13 600 kg/m³) sur un baromètre. Quelle est la pression atmosphérique ?

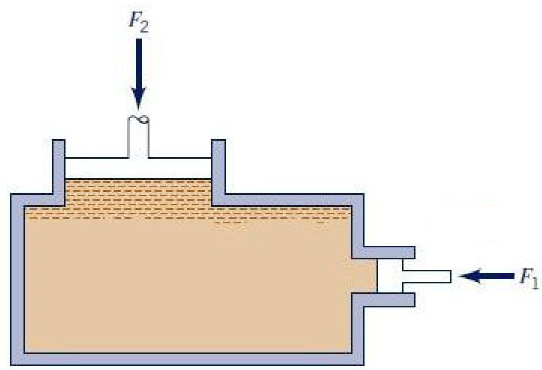


www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/part-barometer-shown-figure-1-measures-atmospheric-pressure-millimeters-mercury-mmhg--acco-q5939189

17. Le tube montré sur la figure est rempli de mercure (masse volumique de 13 600 kg/m³). Quelle est la pression de l'air au bout du tube (en atmosphère) si la colonne d'eau à une hauteur de 20 cm si la pression atmosphérique est de 99 kPa ?

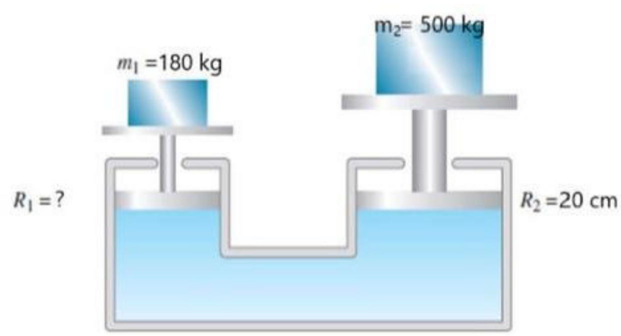


18. Quelle force F_1 doit-on exercer dans la situation montée sur la figure si $F_2 = 2000$ N. Le diamètre du piston de du haut est de 50 cm et le diamètre du piston de droite est de 10 cm.



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/basic-elements-hydraulic-press-shown-figure--plunger-1-2-force-f1-applied-plunger-lever-me-q38983288

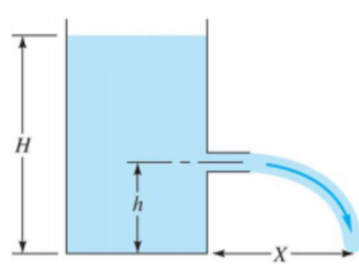
19. Dans la situation montrée sur la figure, quel est le rayon du piston de gauche ?



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/m2-06-hydraulic-system-shown-figure-q6-assume-system-equilibrium-state-force-transmitted-d-q75528452

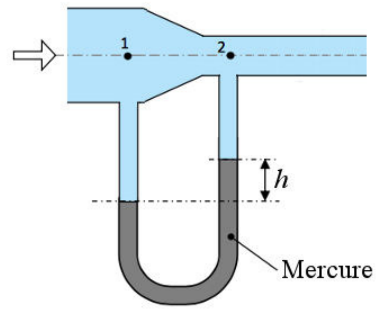
20. Dans la situation montrée sur la figure, H = 20 m et h = 8 m.

a) À quelle vitesse l'eau sort-elle du récipient ?
b) Quelle est la valeur de X ?



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/container-shown-figure-use-bernoulli-s-equation-derive-formula-distance-x-free-jet-leaving-q44915378

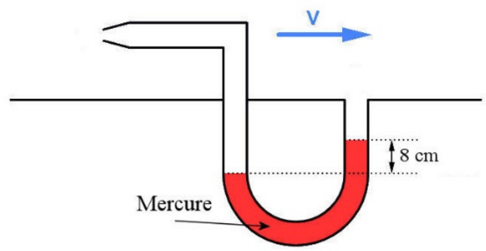
21. Dans la situation montrée sur la figure, le diamètre du tuyau est de 10 cm au point 1 et de 4 cm au point 2. La vitesse de l'air au point 1 est de 20 m/s et la pression est de 1 atmosphère. Quelle est la valeur de h sachant que la masse volumique du mercure est de 13 600 kg/m³ et que la masse volumique de l'air dans le tuyau est de 2 kg/m³ ?



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/water-flows-horizontal-venturi-meter-shown-figure-b3-inlet-throat-internal-diameters-15-cm-q21629657

10.6 Le tube de Pitot

22. Dans la situation montrée sur cette figure, quelle est la vitesse de l'air (en nœuds) ? (La masse volumique du mercure est 13 600 kg/m² et la masse volumique de l'air est de 1,2 kg/m².)



10.10 Les ailes d'avion

23. Un bombardier Q-400 de 24 000 kg vole. La vitesse de l'avion est de 300 nœuds. Quelle doit être la différence de pression entre le dessous et le dessus de l'aile pour générer la portance ? L'aire des ailes est de 63,1 m². (On va supposer que la pression est uniforme au-dessus de l'aile même si ce n'est pas vrai.)

24. Un bombardier Q-400 de 24 000 kg vole à une altitude où la masse volumique de l'air est de 0,736 kg/m³. La vitesse de l'avion est de 300 nœuds. On va supposer que l'air qui passe sous les ailes a aussi une vitesse égale à 300 nœuds. À quelle vitesse l'air doit-il passer au-dessus de l'aile (en nœuds) pour que la portance soit égale au poids de l'avion ? L'aire des ailes est de 63,1 m². (On va supposer que la pression est uniforme au-dessus de l'aile même si ce n'est pas vrai.)

RÉPONSES

10.1 La force de pression

1. 12 000 N
2. T = -15,69 °C P = 56,06 kPa ρ = 0,759 kg/m³
3. T = -56,5 °C P = 17,03 kPa ρ = 0,274 kg/m³

4. Il va flotter
5. 2,04 N
6. 89 129 m³
7. 200 kg
8. 3,267 m³

10.3 L'équation de continuité

9. 18 m/s
10. 9,49 cm

10.4 L'équation de Bernoulli

11. 1,967 atm
12. 0,402 atm
13. 370,7 atm
14. 41,3 m
15. 4197 N
16. 100,41 kPa
17. 0,714 atm
18. 80 N
19. 12 cm
20. a) 15,34 m/s b) 19,6 m/s
21. 11,42 cm

10.6 Le tube de Pitot

22. 259 nœuds

10.10 Les ailes d'avion

23. 3724 Pa
24. 358,1 nœuds