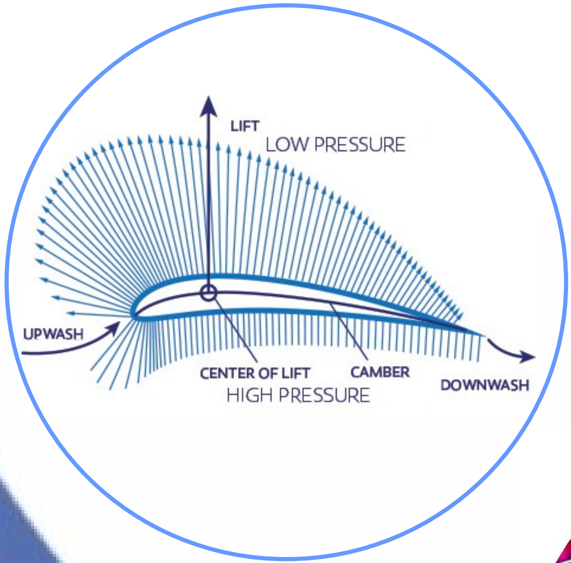
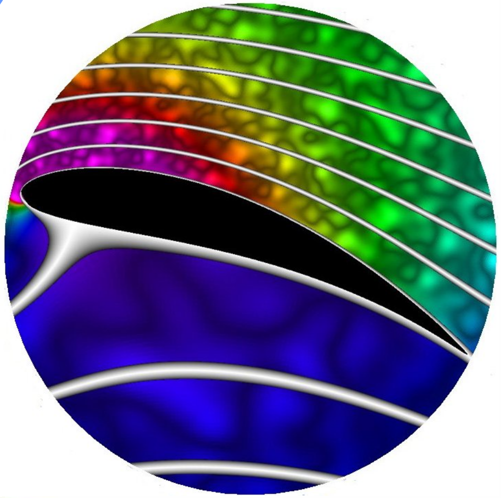
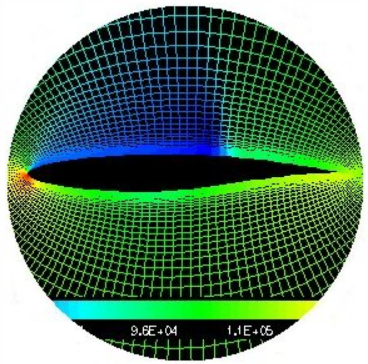


Notions d’aérodynamique:

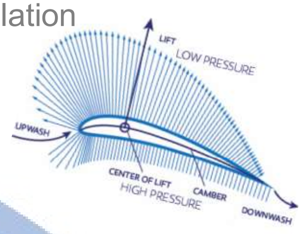
Chapitre 01-01

La Portance





V10
01/09/2017

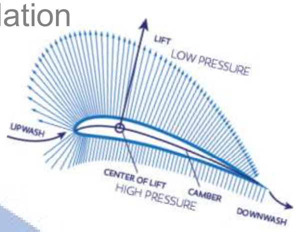


AVERTISSEMENT:

Ceci n’est pas un cours académique et ne peut pas servir en tant que tel.

Ceci est une approche simplifiée à l’intention des jeunes ingénieurs qui désirent se lancer dans l’aéromodélisme.

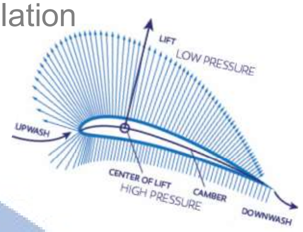
Pour une étude plus approfondie, il est indispensable de consulter la documentation spécialisée.



Introduction

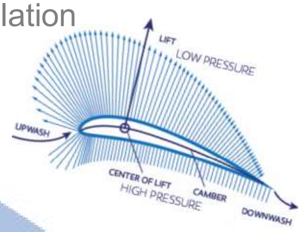
- Ce chapitre est consacré à « *découvrir* » la force de *portance*.
- Il est clair que nous sommes familiers avec la manifestation la plus naturelle de la portance, à savoir *les oiseaux*.

- Mais, on verra le long de ce chapitre qu’il s’agit de trouver une explication à l’origine de cette force via les théories physiques existantes.



Sommaire:

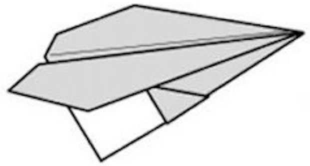
- **Découvrir la portance**
- « Modèle » simpliste
- Théorème de Bernoulli
- Equal Transit Time
- Notion de circulation

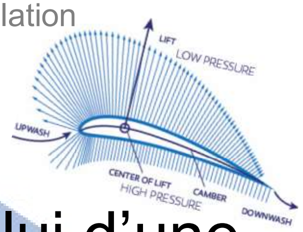


Expérience: l’avion en papier

- Une approche simple consiste à réaliser un avion en papier à partir d’une feuille A4 (technique de l’origami).
- Voici la forme la plus classique:

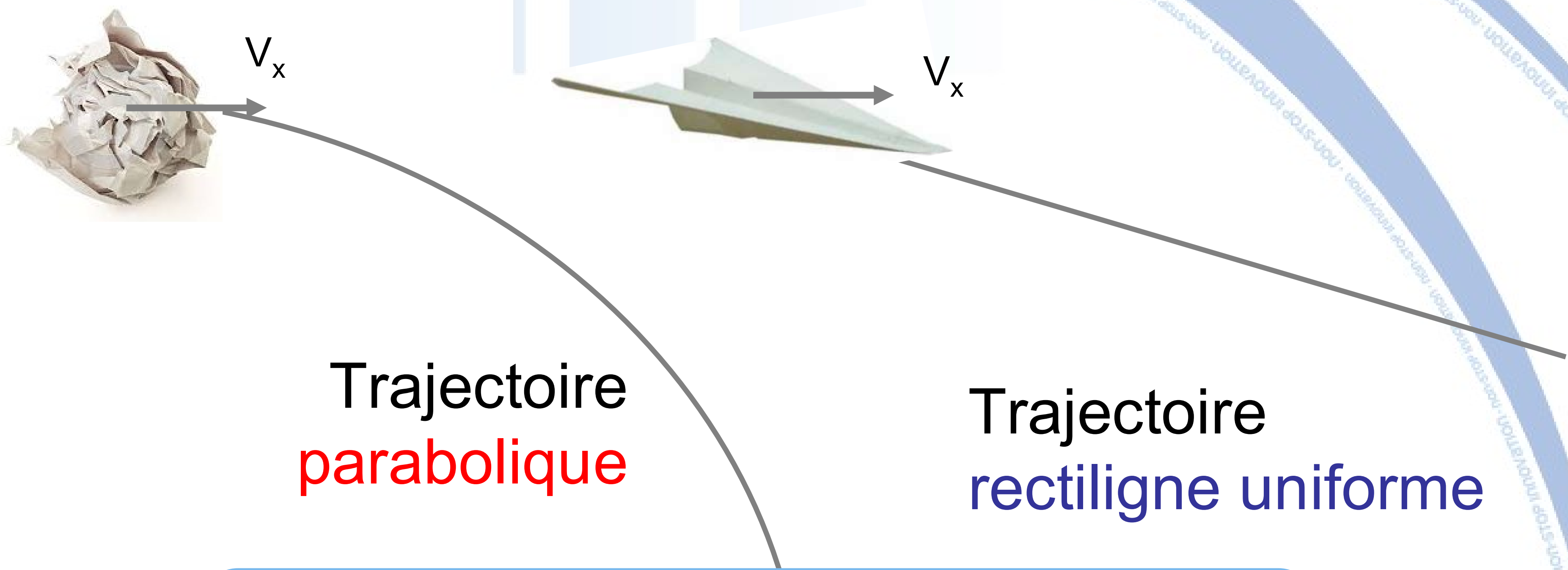
- D’autres formes existent sur youtube:





Avion en papier

- On compare la trajectoire de l'avion en papier à celui d'une boule en papier de même poids (en dehors du régime transitoire):



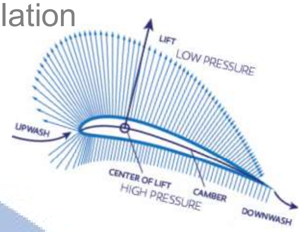
Trajectoire parabolique

Trajectoire rectiligne uniforme

Deux trajectoires différentes

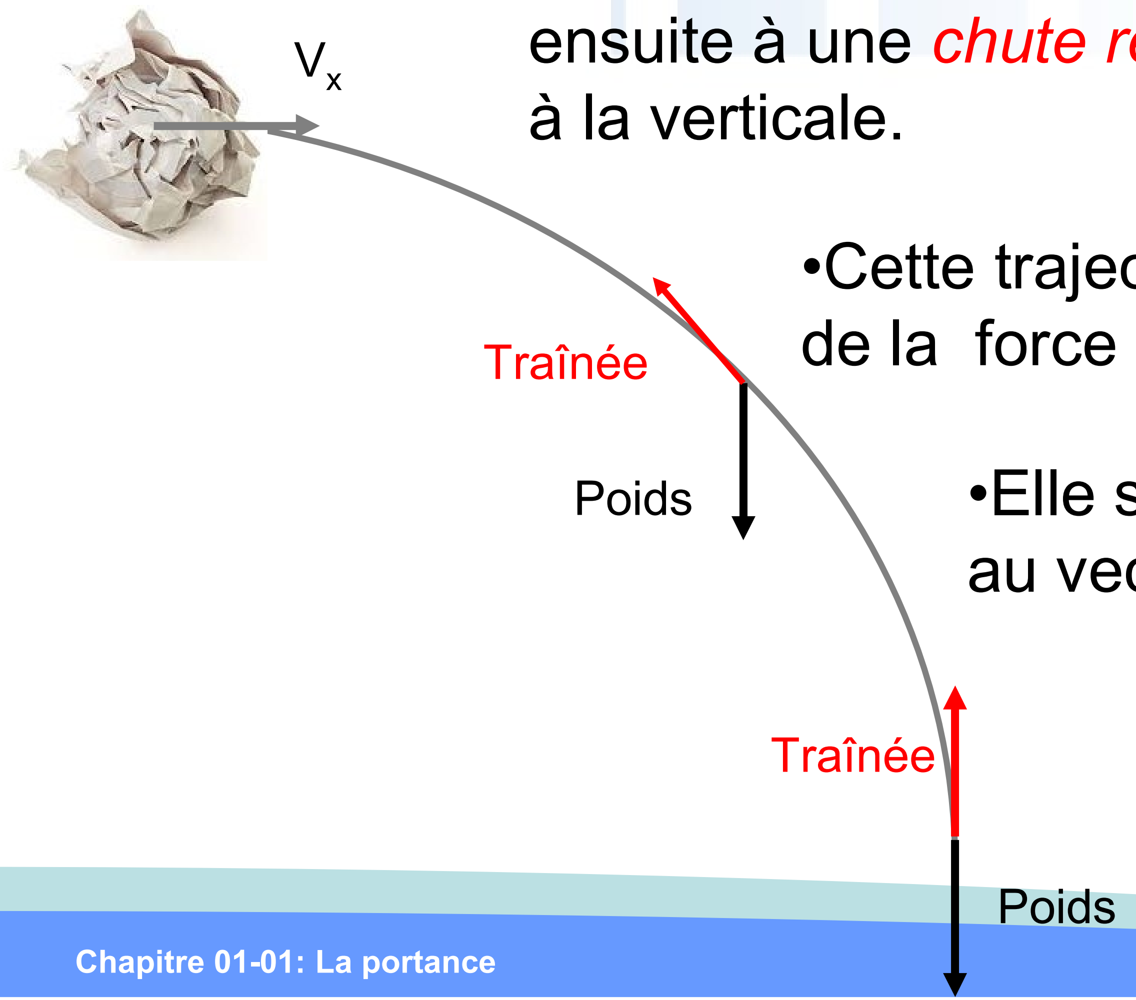
=

Deux forces « aérodynamiques » différentes



Avion en papier

- Cas de la boule en papier:

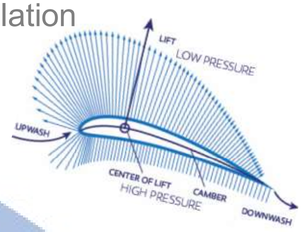


•La trajectoire parabolique conduit ensuite à une *chute rectiligne uniforme* à la verticale.

•Cette trajectoire révèle la nature de la force aérodynamique en jeu.

•Elle s'oppose en permanence au vecteur vitesse.

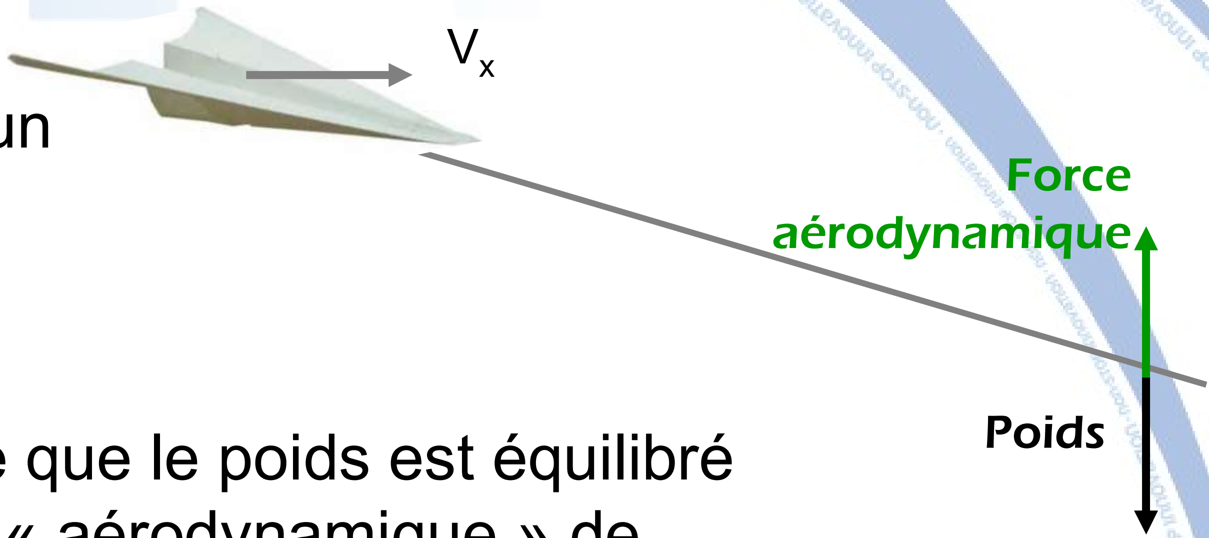
•On parle de *traînée aérodynamique*.



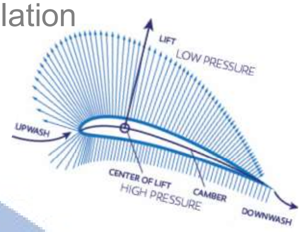
Avion en papier

- Pour l'avion en papier:

Après un régime transitoire, on obtient un mouvement *rectiligne uniforme en pente*.

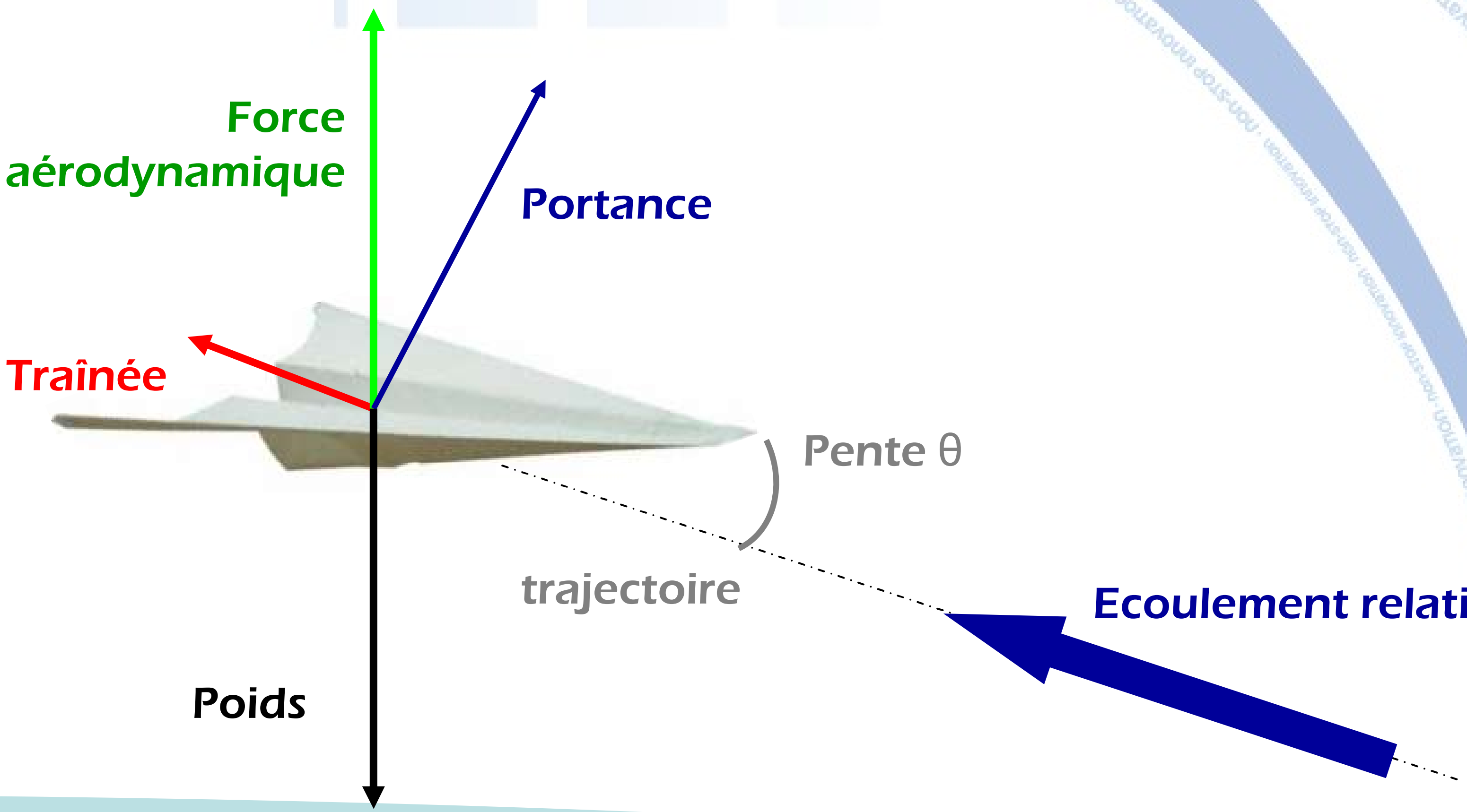


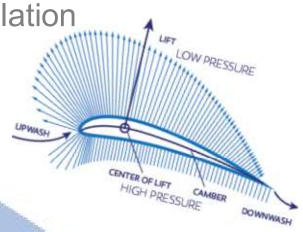
•Ceci suggère que le poids est équilibré par une force « aérodynamique » de même « valeur » mais dans le sens contraire.



Avion en papier

- On peut décomposes cette force aérodynamique en:
  - Une composante qui s'oppose à la vitesse: ***Traînée***
  - Une composante perpendiculaire à la vitesse: ***Portance***

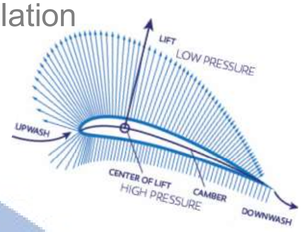




Sommaire:

- Découvrir la portance

- **« Modèle » simpliste**
- Théorème de Bernoulli
- Equal Transit Time
- Notion de circulation



Approche « simpliste »

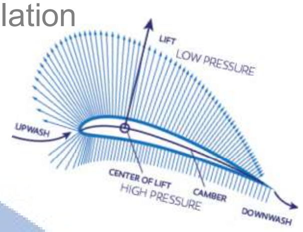
- Une approche simpliste consiste à prendre le modèle du « ski nautique ».

L'écoulement de l'eau subit une variation de sa vitesse.

$$\vec{V}_2-\vec{V}_1\neq 0$$

$2^{ème}$ loi de Newton: les skis exercent une force sur l'écoulement

$$m.\vec{a}_{ccélération} = \vec{F}_{skieur/eau}$$



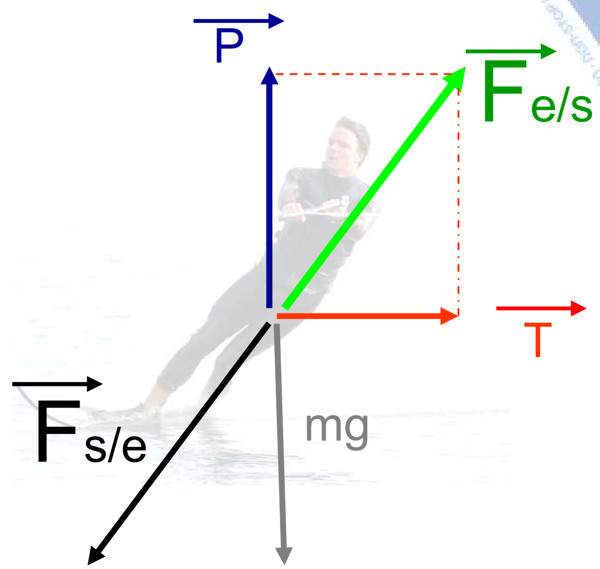
Approche « simpliste »

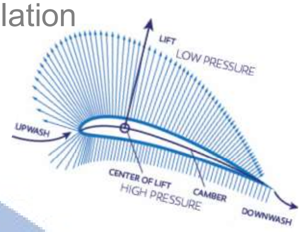
- 3ème loi de Newton: l'écoulement exerce une force sur les skis de même valeur que $F_{skieur/eau}$ et dans le sens opposé.

PRINCIPE
ACTION / REACTION

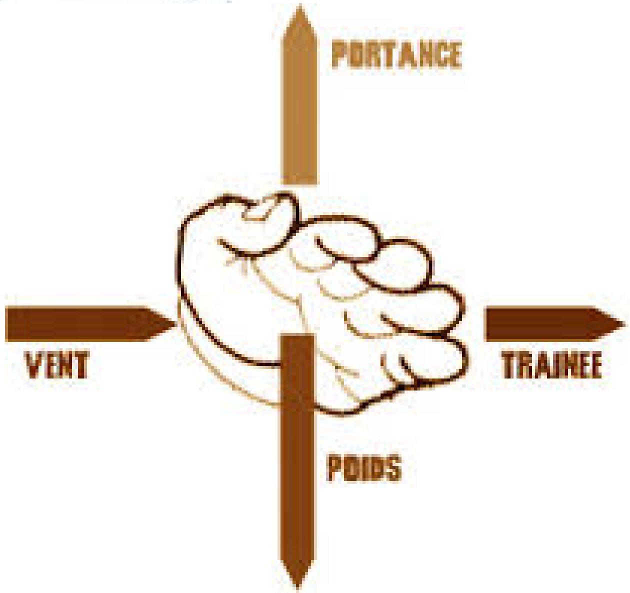
•Cette force peut être décomposée en

- •Composante verticale: **portance**
- •Composante horizontale: **traînée**



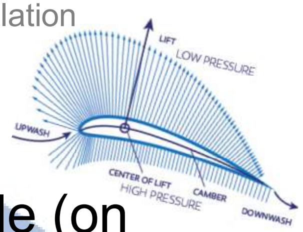


Approche « simpliste »



- Une autre illustration de cette approche consiste à mettre la main dans un écoulement (voiture en marche par exemple).
- En partant de la position horizontal, on pivote la main légèrement pour orienter le flux vers le bas

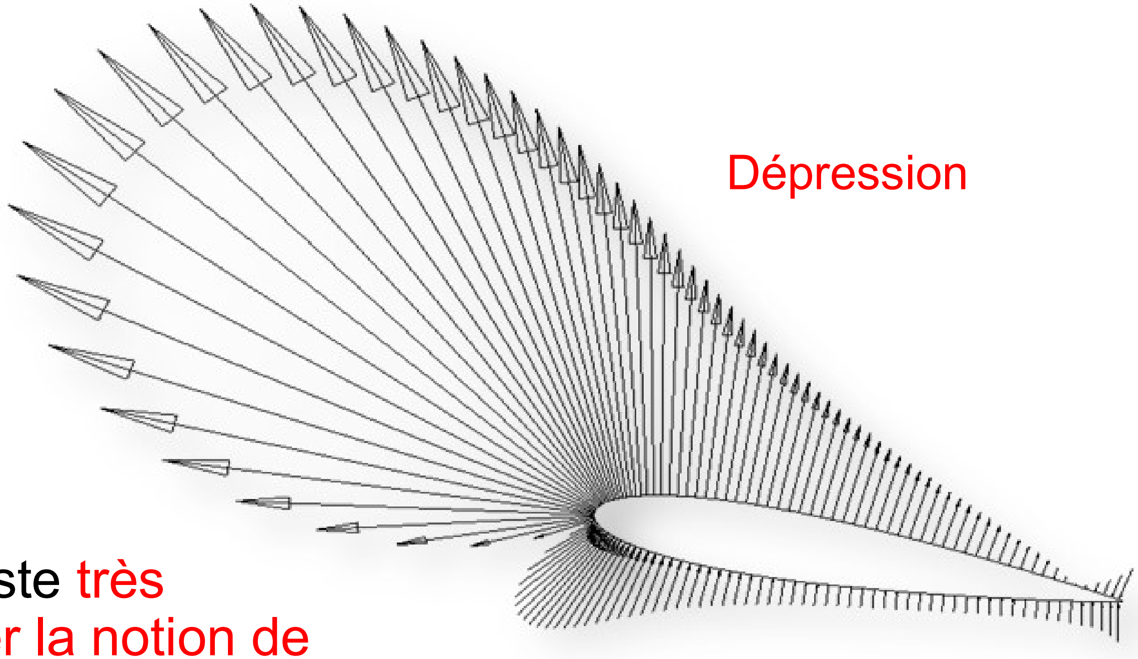
On a une sensation de légèreté qui s'explique par la *présence d'un composante verticale* (portance) qui s'oppose (légèrement) au poids.



Le contre exemple

- Cette approche ne s’intéresse pas à la partie supérieure de l’aile (on l’appellera ***extrados***).

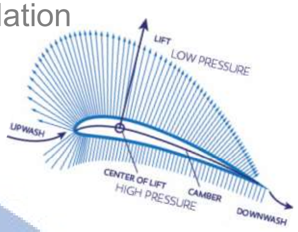
- Or, certaines études montrent que l’extrados génère 75% de la portance (*).



- Donc, cette explication reste très intéressant pour vulgariser la notion de portance et elle est à la portée de Mr tout le monde.

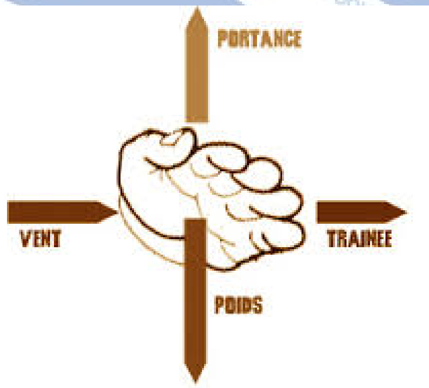
Pour le niveau ingénieur, il faut passer à la méca flu!

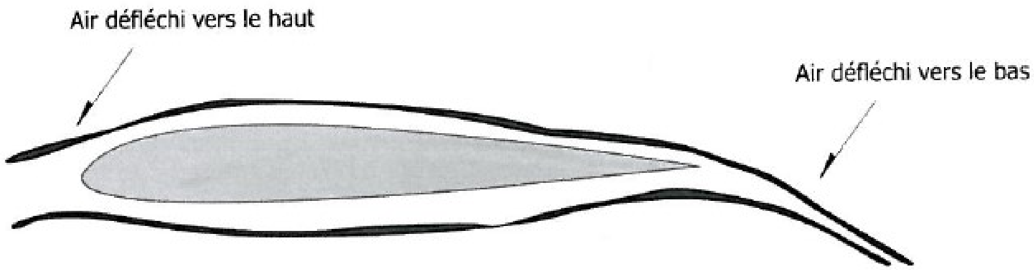
(*) Pour plus d’info sur ce sujet, à consulter le site foilers: http://foils.wordpress.com/2011/12/07/portance-13/



Attention :

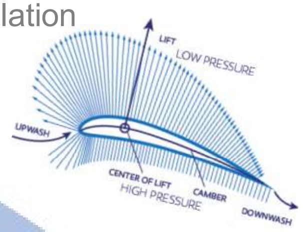
- Même si ce modèle simpliste n'est pas valable, ceci ne met pas en doute le principe d'action/réaction.





Si l'écoulement exerce une force aérodynamique sur une aile, alors l'aile exerce une force qui dévie l'écoulement vers le bas, on parle de ***down wash***.

- Ce ***down wash*** ne peut être calculé par une approche méca solide. Il est nécessaire de passer en mécanique de fluide.

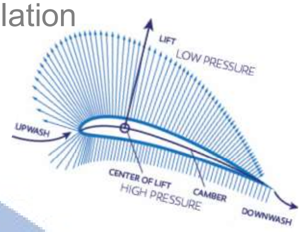


Sommaire:

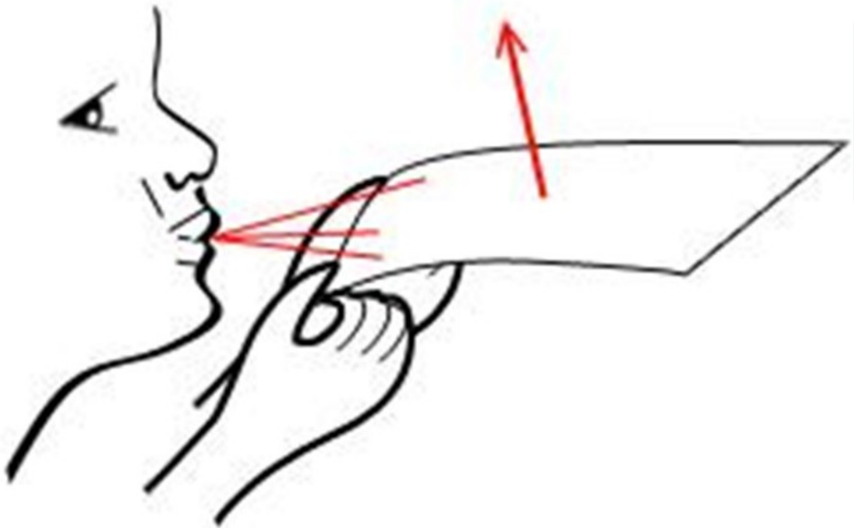
- Découvrir la portance
- « Modèle » simpliste

Théorème de Bernoulli

- Equal Transit Time
- Notion de circulation



Expérience simple

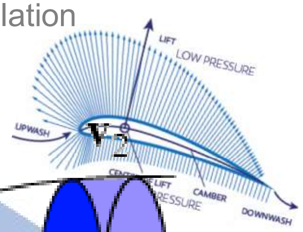


- Une expérience simple illustre le théorème de Bernoulli.
- Il s’agit de souffler au-dessus d’une feuille en papier.

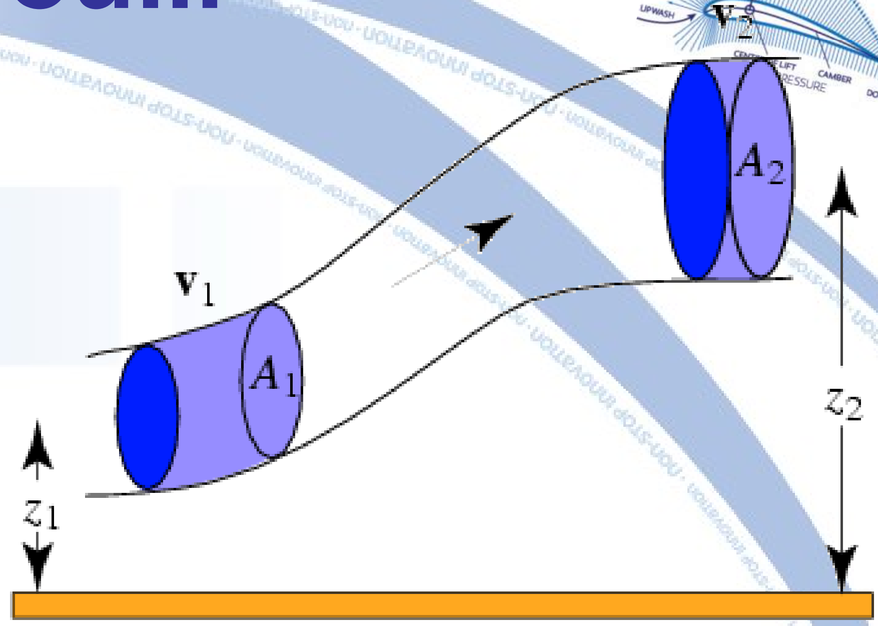
- On remarque que la feuille se soulève.
- La force en question résulte d’une différence de pression entre les deux faces de la feuille en papier.

N déduit qu’il y a une relation entre la vitesse d’un écoulement et sa pression statique: c’est le théorème de Bernoulli

Théorème de Bernoulli



- Le théorème de Bernoulli s’applique pour un fluide incompressible, irrotationnel, parfait (non visqueux).
- Ces hypothèses sont bien vérifiées dans la plage de vol qui nous concerne (vol subsonique).
- Le théorème de Bernoulli découle de l’application du ***théorème de l’énergie cinétique***.



$$\Delta E_c = \sum W(\vec{F_{ext}})$$

Théorème de Bernoulli:

$$\frac{v^2}{2} + gh + \frac{p}{\rho} = C$$

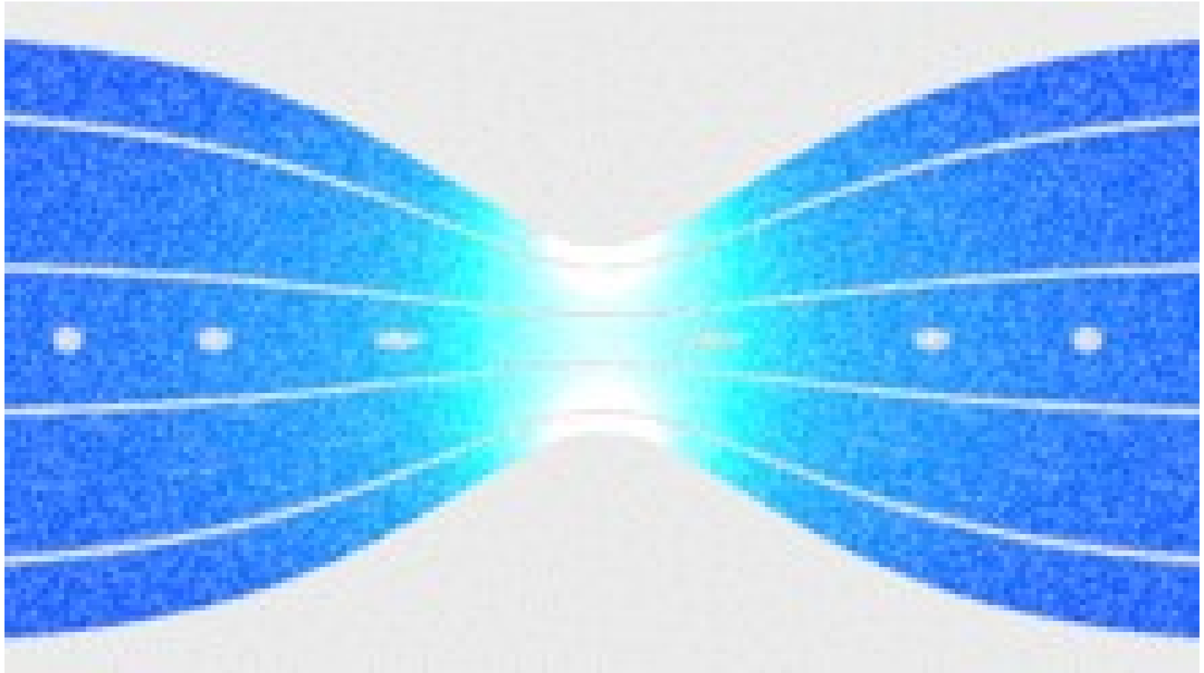
- Une version simplifiée (on néglige h) sera:

$$P_{statique} + 0{,}5.\,\rho\,.\,V^2 = Cste$$

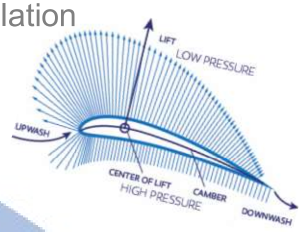
$$P_{statique} + P_{dynamique} = P_{totale}$$

Pour info: effet venturi

- L'application la plus connue du théorème de Bernoulli en mécanique et le célèbre **effet Venturi**(*).
- Lorsque le fluide traverse une zone rétrécie (un convergeant), la vitesse augment (pour conserver le débit) et la pression diminue (dépression).

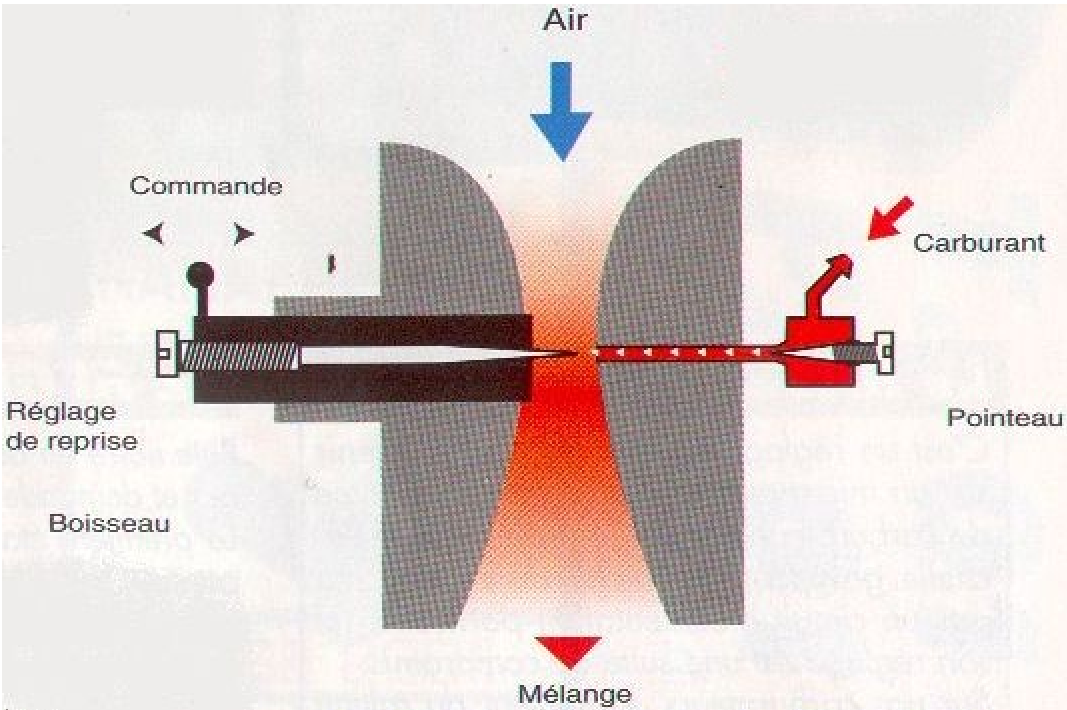


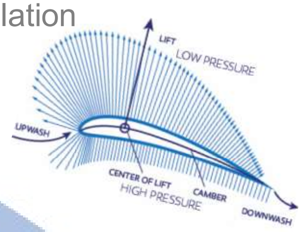
(*) du nom du physicien italien Giovanni Battista Venturi



Pour info: effet venturi

- L'effet venturi est utilisé dans le carburateur.
- **La dépression aspire le carburant:** on obtient le mélange air / carburant qui sera injecté dans les cylindres.



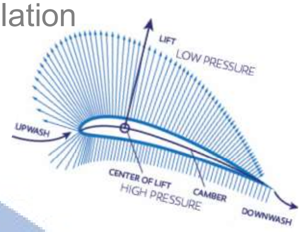


Sommaire:

- Découvrir la portance
- « Modèle » simpliste
- Théorème de Bernoulli

Equal Transit Time

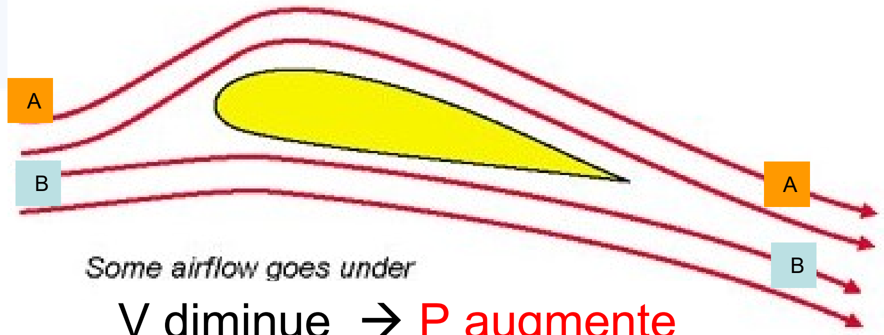
- Notion de circulation



Explication « populaire »

- Les particules A et B se séparent en amont et se rejoignent à l'aval de l'écoulement.
- La vitesse de la particule A est plus importante que celle de B (distance à parcourir plus grande).

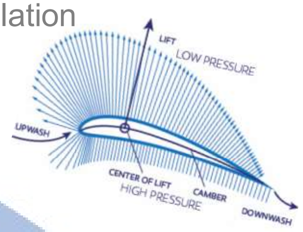
V augmente → P diminue,



V diminue → P augmente

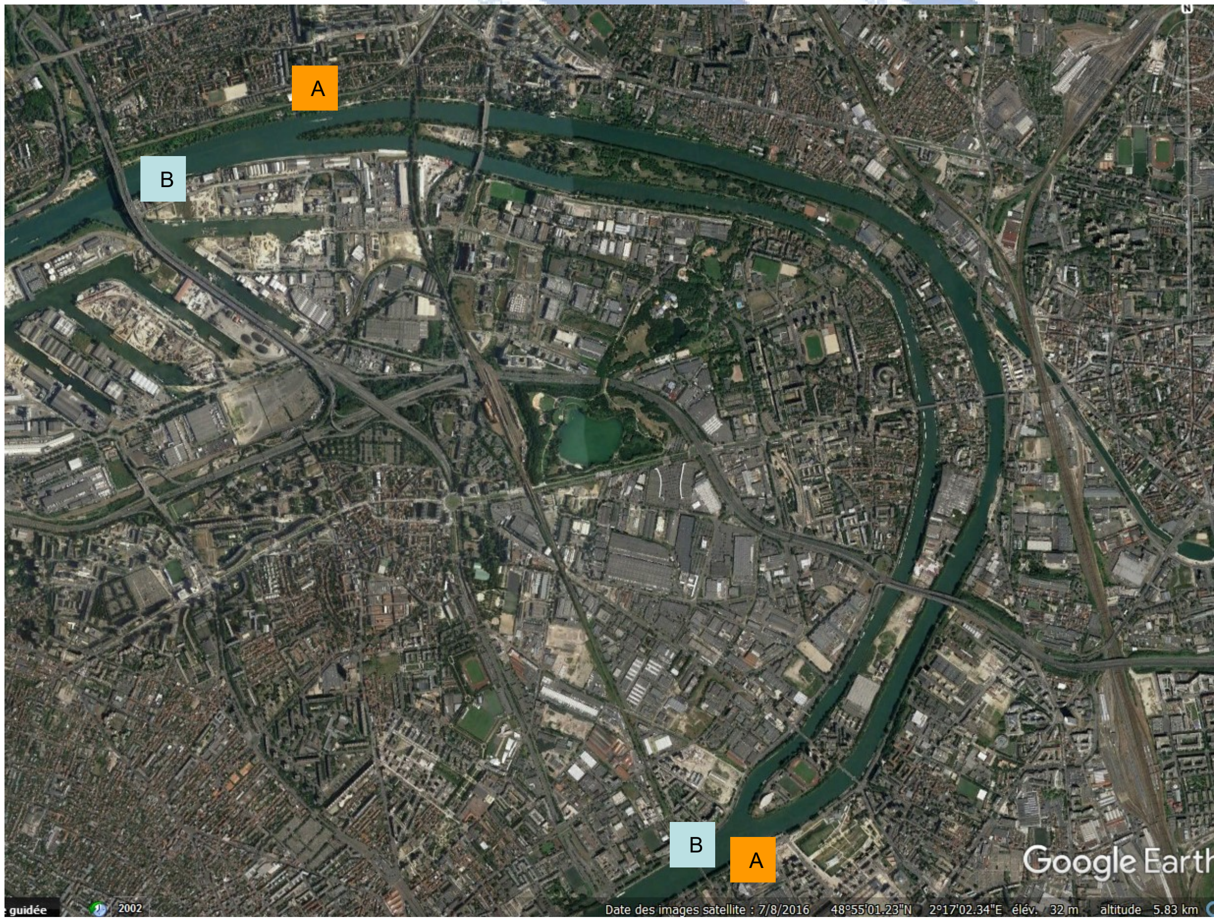
- On applique le théorème de Bernoulli: on obtient une différence de pression et donc ***une portance***.

Ce modèle appelé « ***equal transit time*** » est très connu. Mais il souffre d'une « erreur » subtile qu'on se propose d'illustrer.



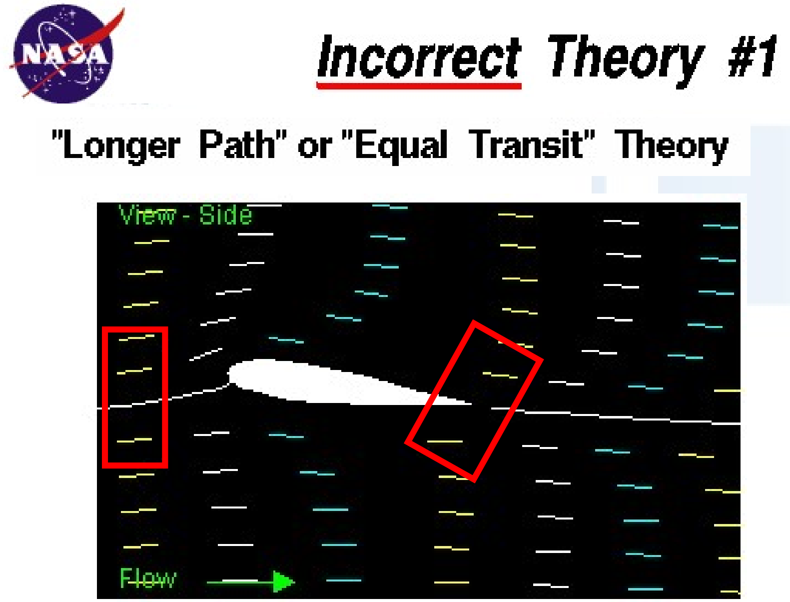
Approche critique

- Si on prend une rivière (la seine par exemple) et qu'on s'intéresse à une bifurcation de l'écoulement, on constate que deux particules adjacentes au départ, ne le seront plus à l'arrivée:

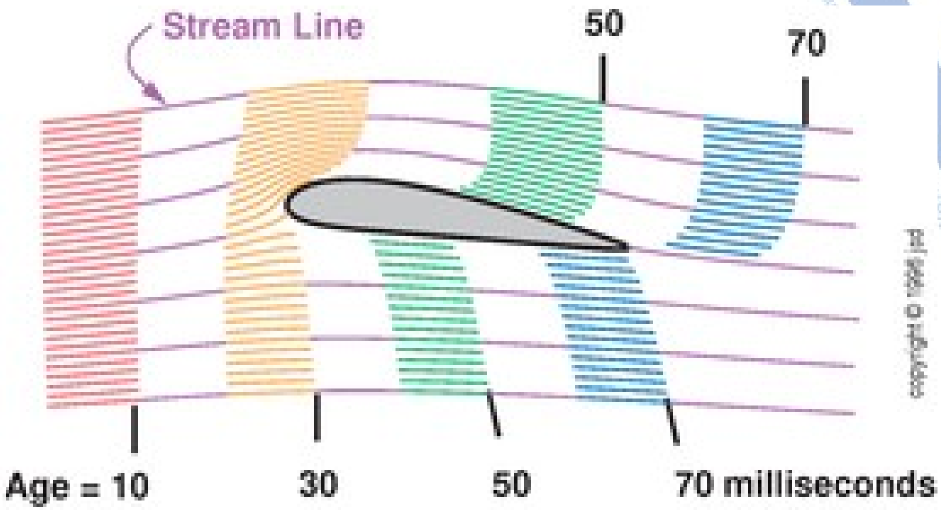


- Dans l'exemple précédent, l'écoulement est toujours stationnaire mais A et B n'arrivent pas en même temps ce qui met en cause l'explication « populaire » de l'« ***equal transit time*** » !

Approche critique

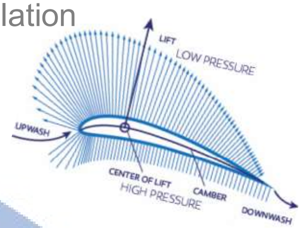


- Sur son site, la NASA donne une petite applette java pour démontrer l'erreur du modèle « equal transit time ».



- La simulation de J Denker ([1]) donne le même résultat.

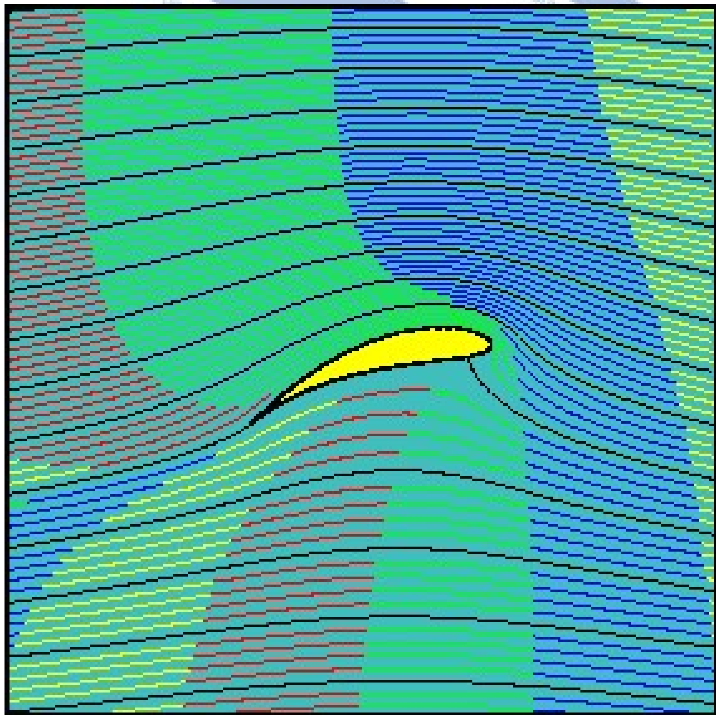
([1]) http://www.av8n.com/how/htm/airfoils.html



Approche critique

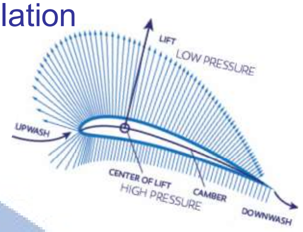
- Sur le site de Mr La J Denker ([1]), une simulation dynamique démontre l'erreur du modèle « equal transit time ».

- Le mythe des particules qui se retrouvent en aval est parfaitement erroné.



Mais ceci ne met pas en cause le théorème de Bernoulli.

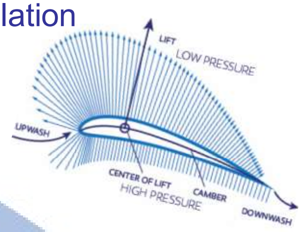
([1]) http://www.av8n.com/how/htm/airfoils.html



Sommaire:

- Découvrir la portance
- « Modèle » simpliste
- Théorème de Bernoulli
- Equal Transit Time

Notion de circulation

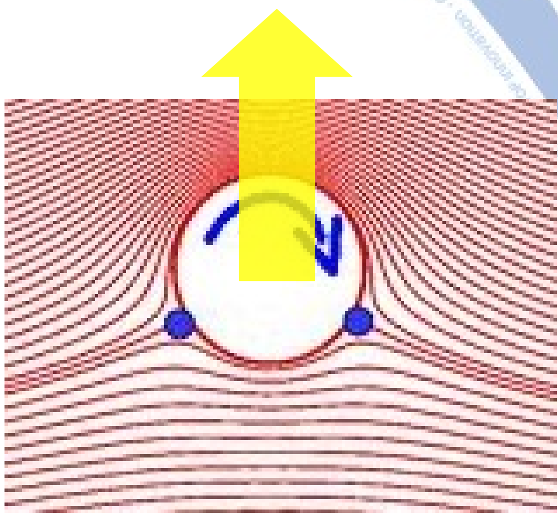


Notion de circulation

- C’est une notion bien connue dans le milieu de la « méca flu ».
- Elle implique un bagage « mathématique » de quelques pages A4.
- Alors pour faire simple, on va essayer de comprendre l’esprit de cette notion.

Cylindre 2D en rotation

- On démontre théoriquement et expérimentalement qu’un cylindre en rotation dans un écoulement « crée » de la portance .

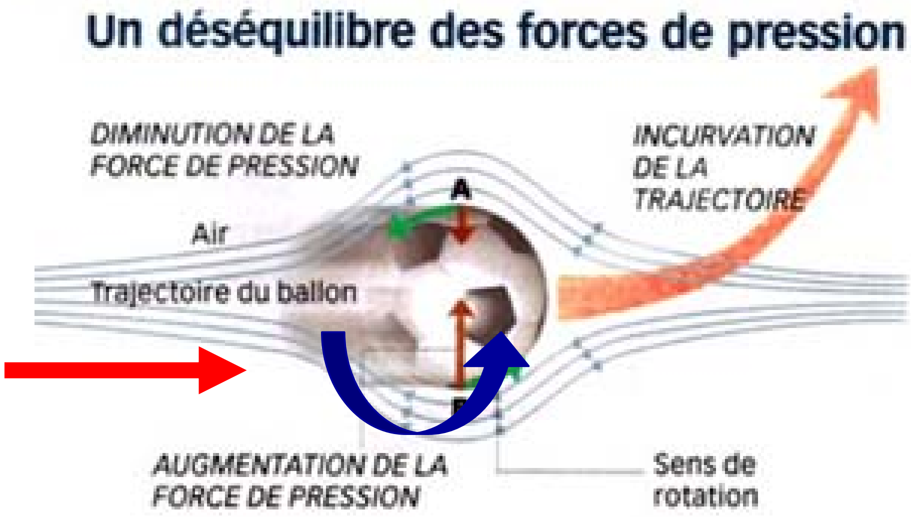


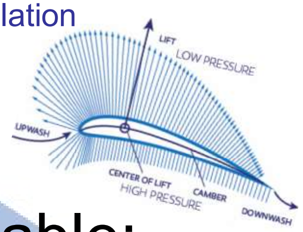
On parle de ***l’effet Magnus***

Notion de circulation

- Cet effet est connu par le grand publique: c’est la balle liftée de « Roberto Carlos » dans le match France-Brésil:

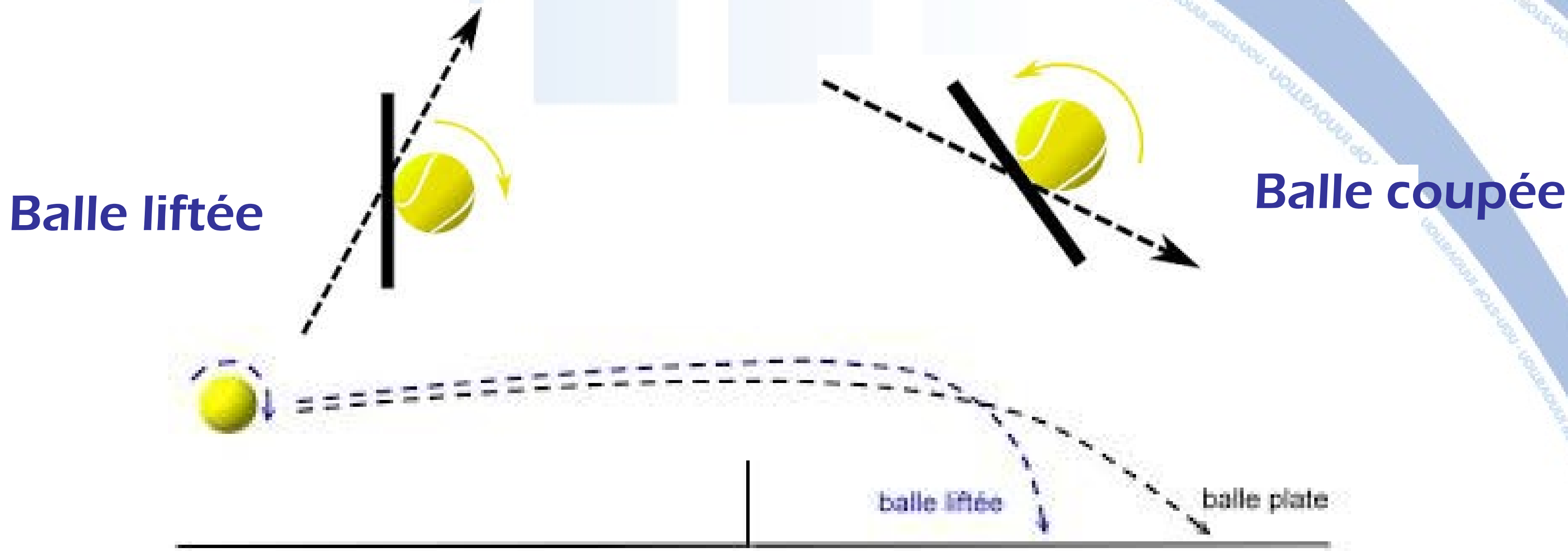
3/06/1997





Exemple pratique:

- Cet effet est très utilisé aussi au tennis / tennis de table: balle liftée ou balle coupée.

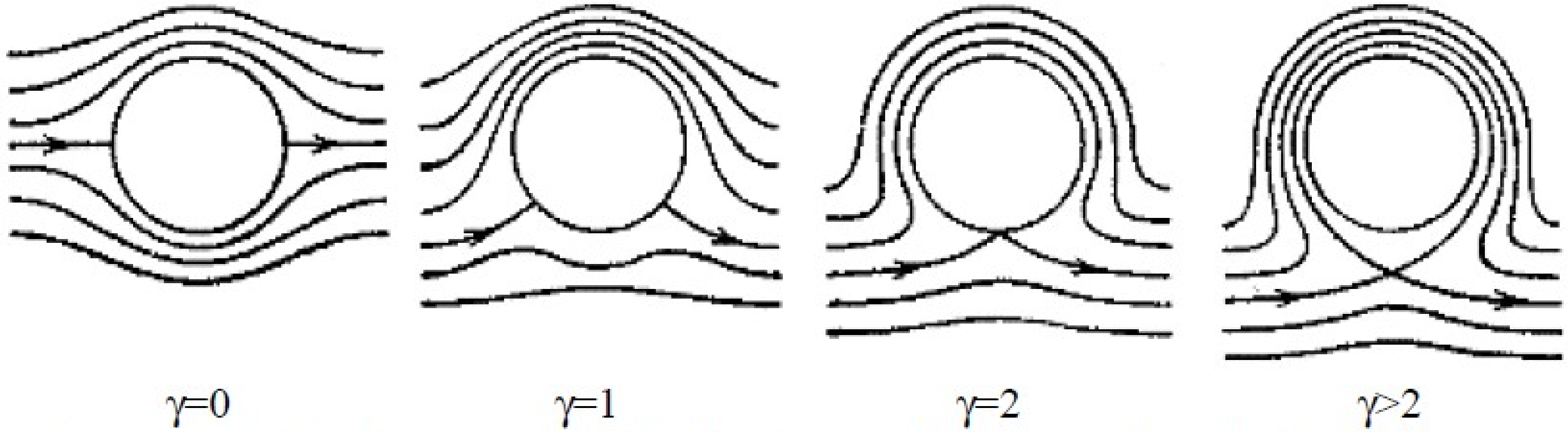


- On peut rajouter un effet de rotation vers la droite ou la gauche pour obtenir un slice.

La dépression qui apparaît d'un côté et la surpression de l'autre sont à l'origine de la force qui dévie la balle.

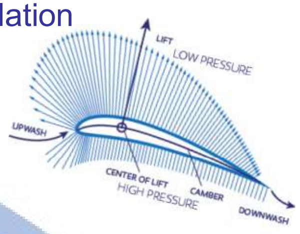
Explication

- Donc, on considère que la différence de vitesse sur le contour du cylindre, génère une différence de pression (Bernoulli) et donc *une Portance*.
- C'est le concept de la circulation, noté Gamma: Γ.



Ecoulement autour de cylindre avec différente valeur du "tourbillon γ".
$(\gamma = \Gamma/(2\pi.U_{\infty}.R))$.
(extrait de "Effets hydrodynamiques et modèles mathématiques", M.LAVRENTIEV et B.CHABAT, éditions MIR, Moscou 1980.).

Théorème de Kutta -JuKowski



- Ceci nous conduit à la formule suivante, appelée théorème de **Kutta-Jukowski**:

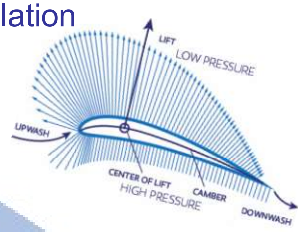
$$\textit{Portance} = \rho .\ U_0 \Gamma$$

- U_0 est la vitesse amont.
- La circulation est une intégrale des composante u et v de la vitesse U sur le contour du profil.

$$\Gamma = \int_{\mathcal{C}} u\, dx + v\, dy$$

- Des outils mathématiques permettent de créer une transformation entre les profils « minces » et un cylindre: ***transformation conforme***.

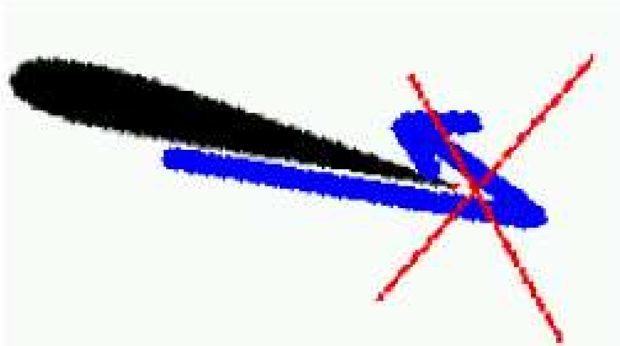
La théorie de la circulation très utilisée car elle permet de prédire la portance autour d'un profil 2D.



Naissance de la circulation

On peut se demander comment la circulation apparaît-elle autour du profil ?

- Les spécialistes préconisent qu'à cause du bord du fuite et de la viscosité (voir annexe), le fluide ne peut pas passer de l'intrados à l'extrados(*).



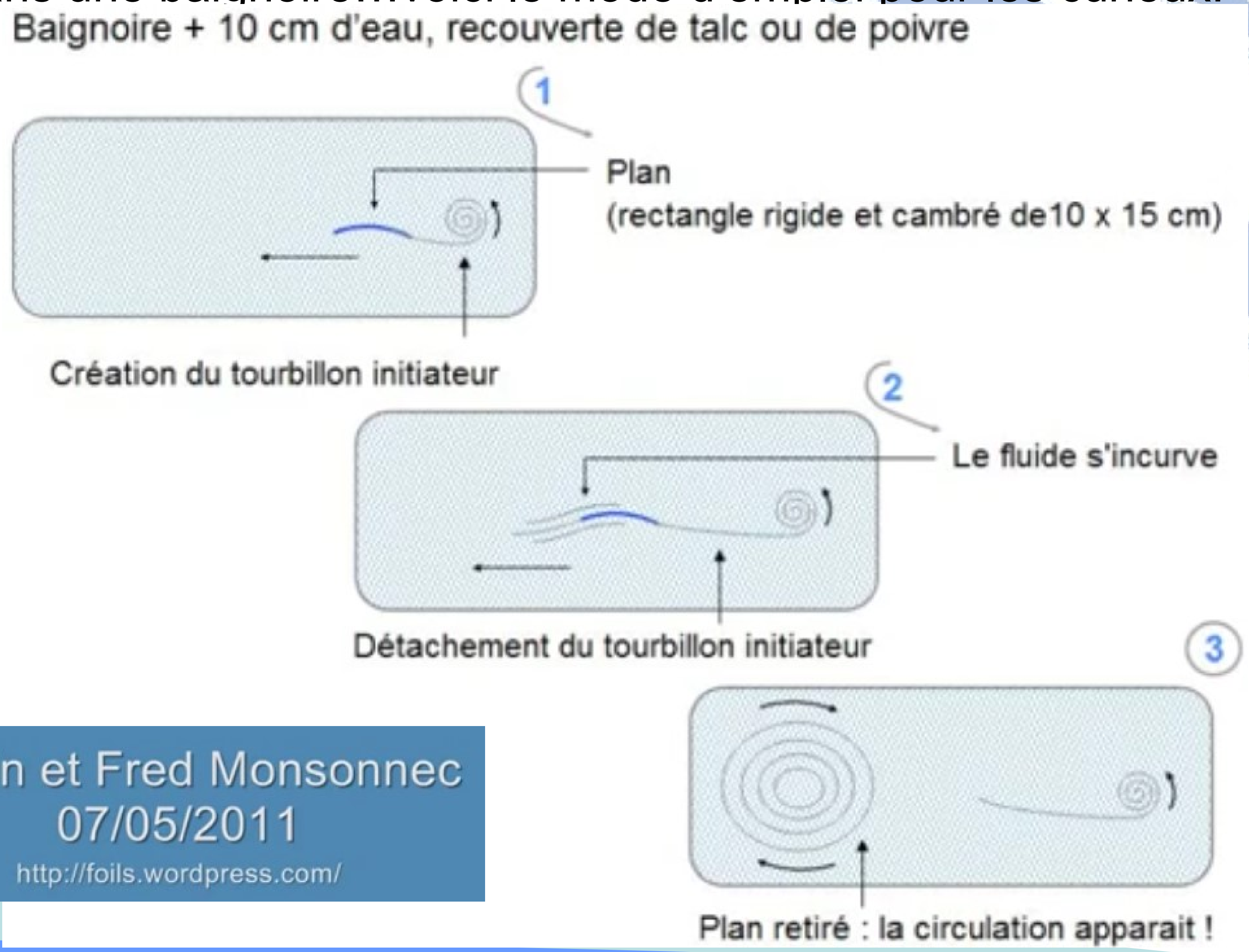
- Donc, au démarrage, un vortex se produit en aval du profil-> une circulation égale est de sens opposé se forme autour de l'aile-> **c'est la circulation du profil.**

Tourbillon de démarrage

(*) on parle de condition de Kutta-Jukowski, nécessaire pour créer la portance.

Illustration

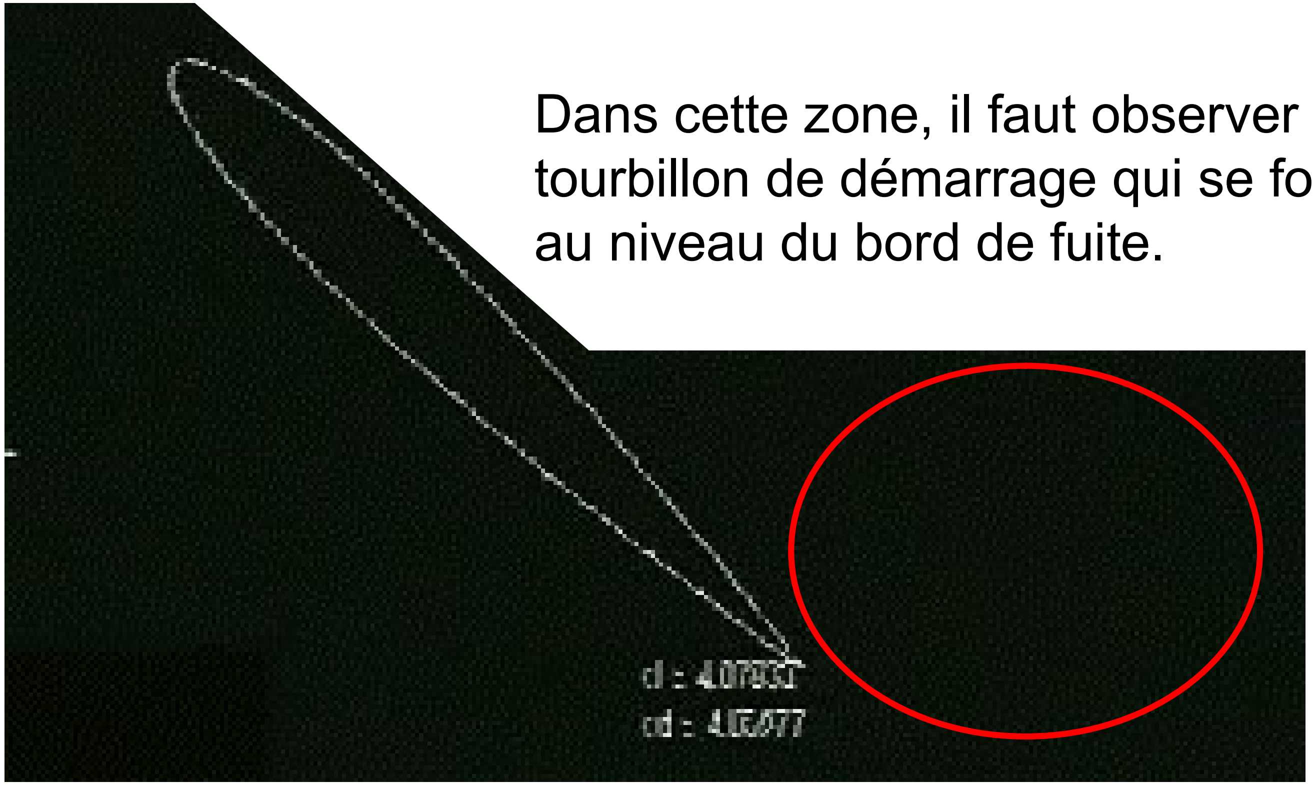
- Sur le site Foilers, on propose de visualiser la circulation autour d'un profil dans une baignoire…voici le mode d'emploi pour les curieux:



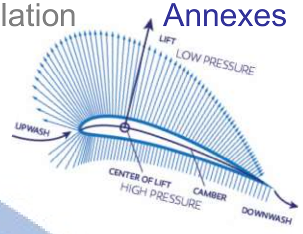
Gabin et Fred Monsonnec
07/05/2011
http://foils.wordpress.com/

Tourbillon de démarrage

- Exemple de tourbillon de démarrage:

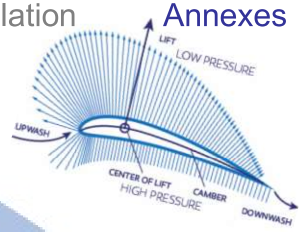


Dans cette zone, il faut observer le tourbillon de démarrage qui se forme au niveau du bord de fuite.



Sommaire:

Annexe 1:
l’air est-il visqueux ou pas ?



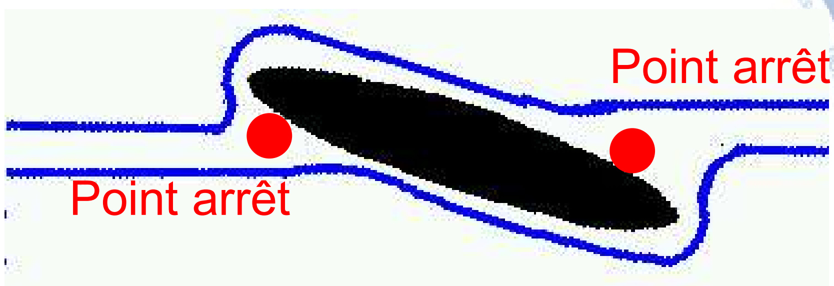
L'air est-il visqueux ou pas ?

? Une question qui peut venir à l'esprit: **est-ce que *l'air est visqueux ou pas ?***

- Si on considère que l'air n'est pas visqueux (pour pouvoir appliquer le théorème de Bernoulli) on arrive au paradoxe d'Alembert:

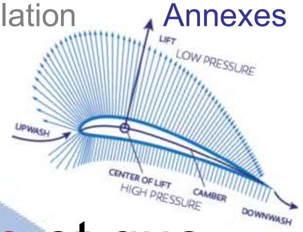
Paradoxe d'Alembert

- Lors d'un écoulement permanant, non visqueux le point d'arrêt arrière est au-dessus du bord de fuite (*).
- La distance au-dessus et au-dessous sont les mêmes.
- La vitesse est la même d'un côté ou de l'autre



- D'après le TH de Bernoulli, la pression reste constante: il n'y a ni portance ni trainée.

(*) L'écoulement est réversible: identique dans un sens comme dans l'autre.



L’air est-il visqueux ou pas ?

- Mais comme on sait qu’il y a une portance & une trainée et que la viscosité de l’air n’est pas nulle, on est obligé de considérer l’air comme étant visqueux.
- Mais dans ce cas, il n’est plus possible de parler de Bernoulli.

Solution

- L’air est visqueux au voisinage de la paroi de l’aile (couche limite). Elle est indispensable pour créer la portance.
- Loin de la paroi, on peut négliger la viscosité et appliquer Bernoulli.

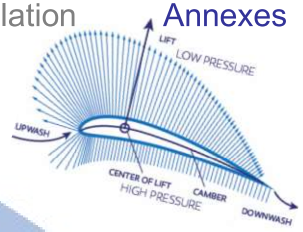
L’introduction de la notion de couche limite (voir ch 2) permet de résoudre le paradoxe d’Alembert

L'air est-il visqueux ou pas ?

- Cette situation est identique aux exercices de physique qui consistent à calculer le mouvement d'un skieur en considérant le frottement nulle.

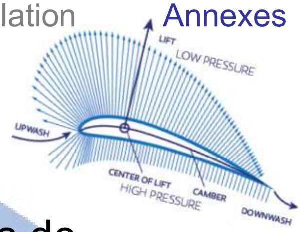
- Ceci semble logique mais dans la réalité, sans le frottement, le skieur ne peut pas démarrer (en poussant sur le sol). Le frottement (aussi faible soit il) est indispensable pour démarrer le mouvement.

De la même façon, la viscosité, aussi faible soit elle, est indispensable pour générer le tourbillon de démarrage et mettre en place la circulation.



Sommaire:

Annexe 2:
Equations de Navier-Stocks



Navier-Stocks

- Certains peuvent se demander pourquoi on ne fait pas allusion aux équations de Navier et Stocks (+ l'équation d'état en cas de fluide compressible):

- Équation de continuité (ou équation de bilan de la masse)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

- Équation de bilan de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \overline{\overline{\tau}} + \rho \vec{f}$$

- Équation de bilan de l'énergie

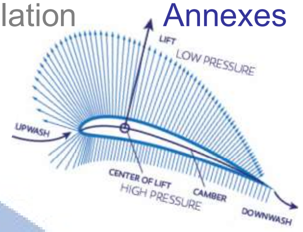
$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(\rho e + p) \vec{v}] = \vec{\nabla} \cdot (\overline{\overline{\tau}} \cdot \vec{v}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{v} - \vec{\nabla} \cdot (\vec{\dot{q}}) + r$$

Équation d'état:

$$f(p, \rho, T) = 0$$

Exemple gaz parfait: PV=NRT

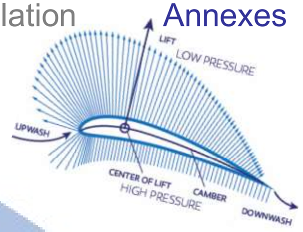
- t représente le temps (unité SI : s) ;
- ρ désigne la masse volumique du fluide (unité SI : kg·m^{-3}) ;
- $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$ désigne la vitesse eulérienne d'une particule fluide (unité SI : m·s^{-1}) ;
- p désigne la pression (unité SI : Pa) ;
- $\overline{\overline{\tau}} = (\tau_{i,j})_{i,j}$ est le tenseur des contraintes visqueuses (unité SI : Pa) ;
- $\vec{f}$ désigne la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide (unité SI : N·kg^{-1}) ;
- e est l'énergie totale par unité de masse (unité SI : J·kg^{-1}) ;
- $\vec{\dot{q}}$ est le flux de chaleur perdu par conduction thermique (unité SI : J·m^{-2}·s^{-1}) ;
- r représente la perte de chaleur volumique due au rayonnement (unité SI : J·m^{-3}·s^{-1}).



Navier-Stocks

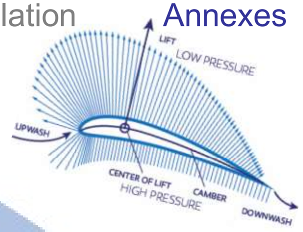
- Les équations de Navier et Stocks n’ont pas de solutions analytiques (sauf des cas particuliers)*.
- Elles sont difficiles à manipuler pour comprendre l’origine de la portance.
- C’est pourquoi un modèle comme celui de la circulation permet mieux de comprendre les paramètres qui influe sur la portance (angle d’attaque, vitesse, etc…)
- Mais les équation de Navier-Stocks sont indispensables pour les calculs numériques.

La résolution de ces équations est dotée d'un prix d‘1 million $ offert par l'institut.

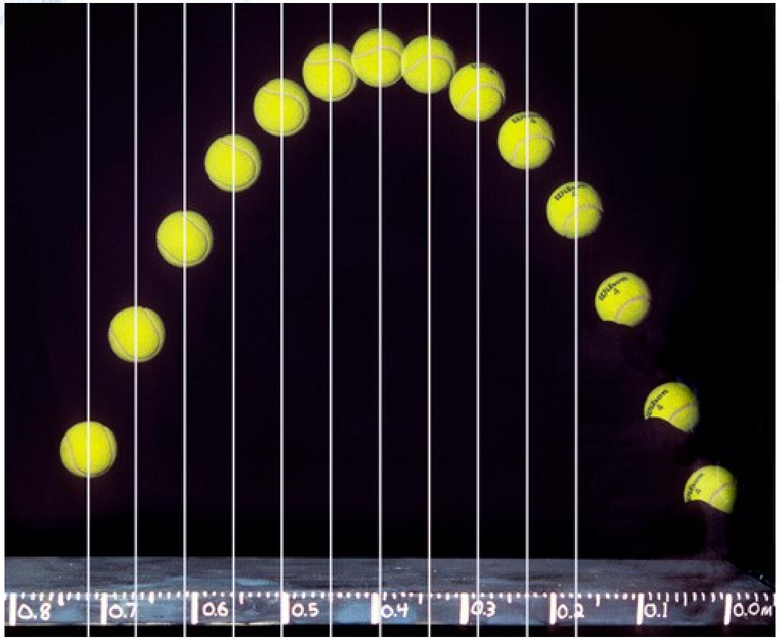


Sommaire:

Annexe 3:
Calculer la trajectoire d’une balle



Annexe 2: Exercice

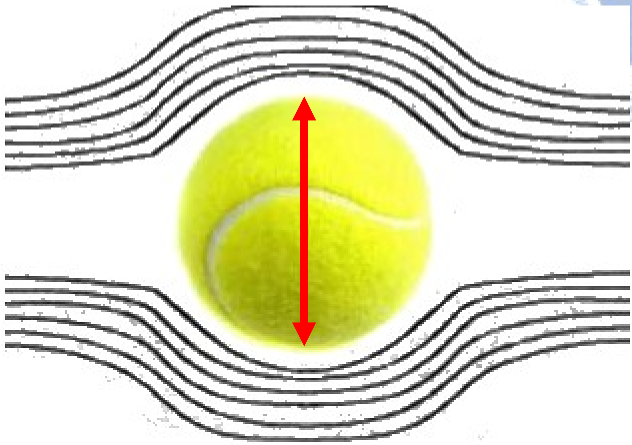


- On souhaite concevoir un programme informatique (le plus simple est une feuille de calcul xls) qui permet de déterminer la trajectoire d'une balle (rayon R) de masse M lancée avec une vitesse (V_x,V_z) et qui subit une trainée C_x=0.6 (*).

- La formule de la traînée est:

$$\textbf{Trainée} = 0,5.\ \rho.C_x.S.V^2$$

- S étant la surface de balle (disque) en face de l'écoulement.



(*) Exercice simple mais qui sera très utile lorsqu'on souhaitera modéliser le mouvement d'un planeur ou d'un avion.

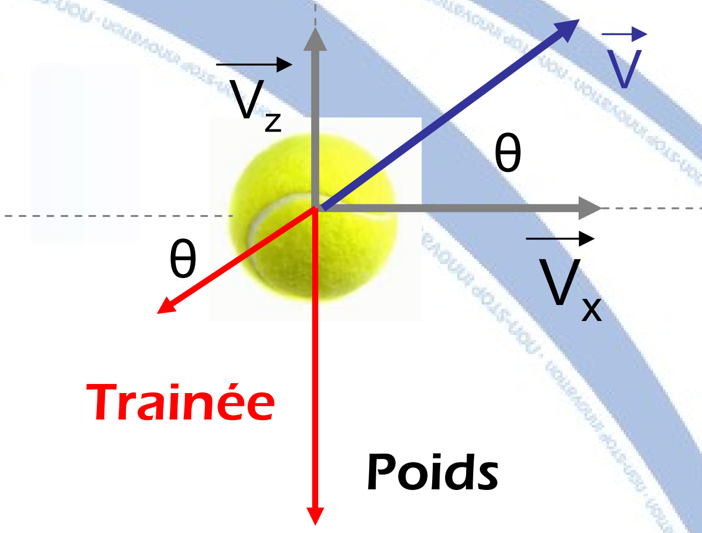
Solution

- **Mise en équation (PFD)**

Sur Z: $-mg-0.5\rho C_x S V^2.\sin\theta = mA_z$

Sur X: $-0.5\rho C_x S V^2.\cos\theta = mA_x$

$\sin\theta = V_z/V \quad V^2 = V^2_x + V^2_z$ (*)



- **Mise en équation avec un pas de Δt**

$$A_z(t_n) = -g - 0.5\rho C_x S V^2(t_{n-1}).\sin\theta(t_{n-1})\ /m$$

$$A_x(t_n) = -0.5\rho C_x S V^2(t_{n-1}).\cos\theta(t_{n-1})\ /m$$

(*) On évite ici l'utilisation du cosinus car la fonction ArcCos n'est pas bijective dans notre cas (2 angles possibles).

Intégration numérique

- L’intégration « discrète »

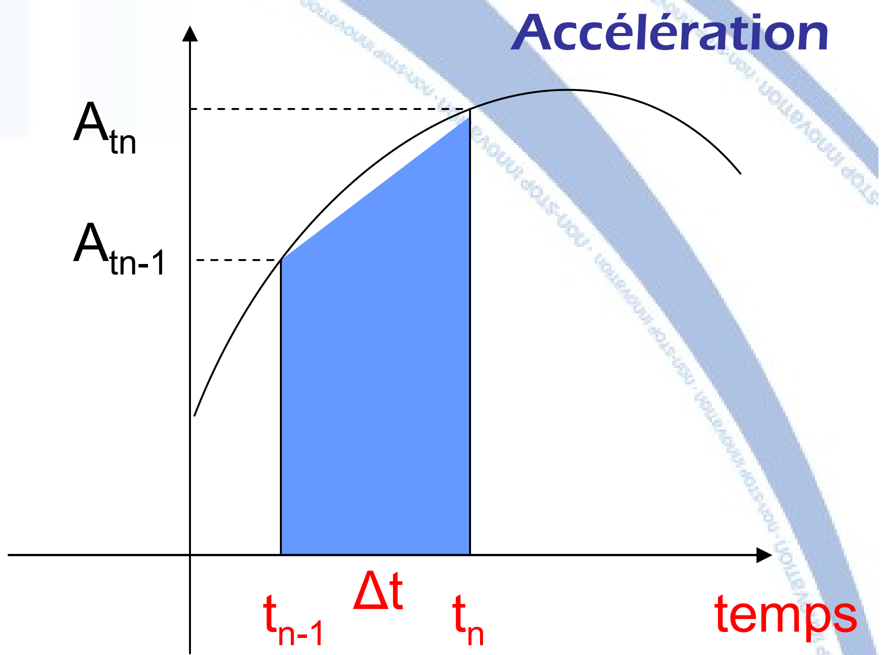
En toute rigueur, la vitesse à l’instant t_n est égale à:

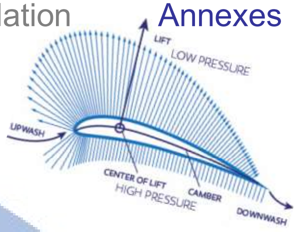
$$V_{tn} = \int_{t_{n-1}}^{t_n} A.dt + V_{tn-1}$$

L’intégrale est la surface au-dessous de la courbe de l’accélération prise dans un intervalle Δt.

On approche ceci par la surface d’un trapèze:

$$V_{tn} = \Delta t^*(A_{tn} + A_{tn-1})/2 + V_{tn-1}$$





Formulation

- **Vitesse = Intégration de l'accélération:**

$$V_z(t_n)= \Delta t * \left(A_z(t_n)+ A_z(t_{n-1})\right)/2 + V_z (t_{n-1})$$

$$V_x(t_n)= \Delta t * \left(A_x(t_n)+ A_x(t_{n-1})\right)/2 + V_x (t_{n-1})$$

$$\sin (t_n)= Vz (t_n) /V (t_n) \quad V^2=V^2_x + V^2_z$$

- **Position= Intégration de la vitesse:**

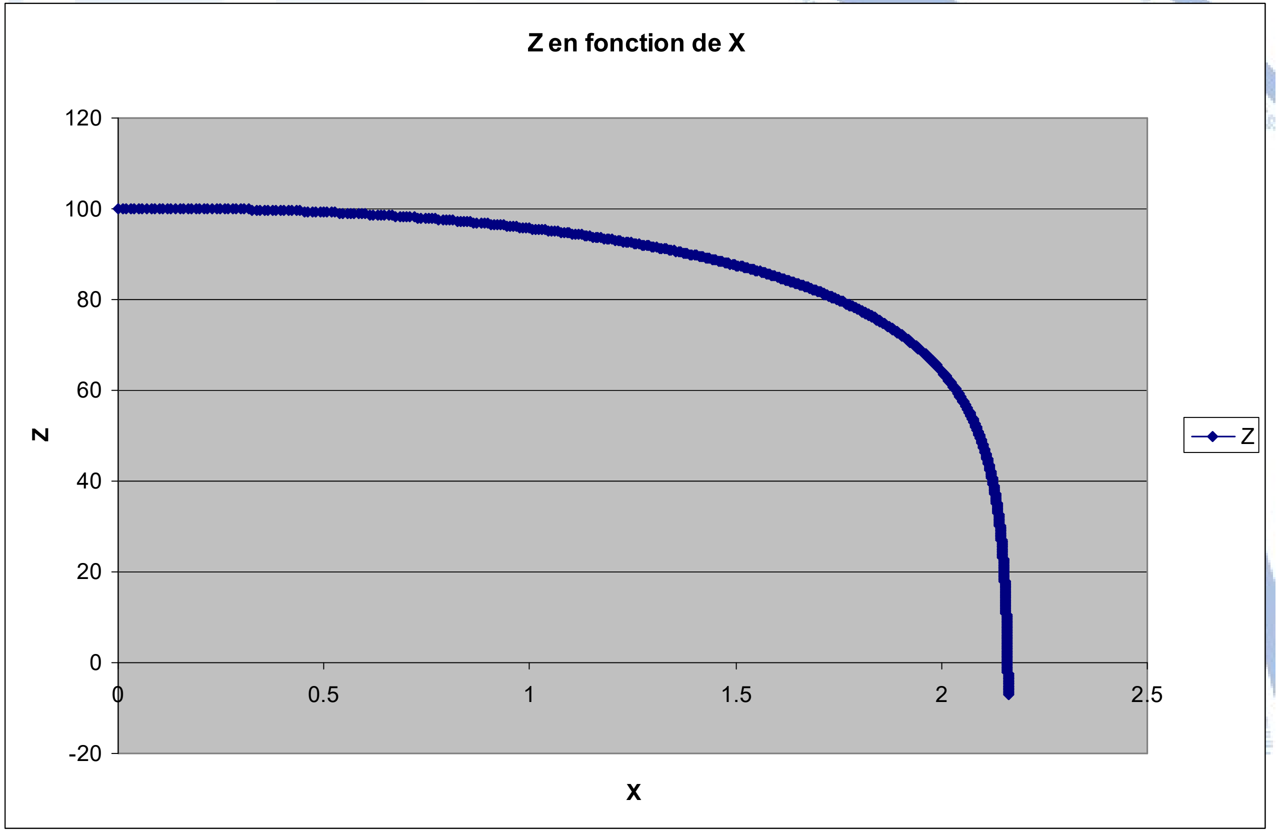
$$Z(t_n)= \Delta t * \left(V_z(t_n)+ V_z(t_{n-1})\right)/2 + Z (t_{n-1})$$

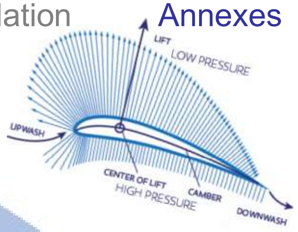
$$X(t_n)= \Delta t * \left(V_x(t_n)+ V_x(t_{n-1})\right)/2 + X (t_{n-1})$$

Solution graphique

M	0.2	kg
g	9.8	m/s
rou	1.22	Kg/m3
R	0.1	m
S	0.031415	m2
Cx	0.6	
Vx	1	m/s
Vz	1	m/s
X	0	m
Z	100	m
Teta	0.8	rd
Teta	45.0	degré
D T	0.01	s

Le calcul est réalisable sur une feuille xls.



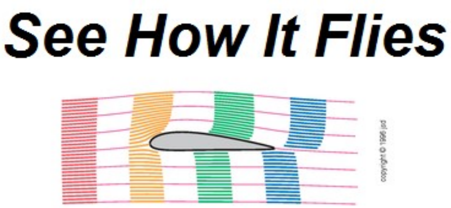


Références:

Foilers, le blog des bateaux volants

- http://foils.wordpress.com/2011/12/07/portance-13/

Nasa: Nationa Aironautics & Space Administration:
http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/wrong1.html



See how it flies de John S. Denker
http://www.av8n.com/how/htm/airfoils.html