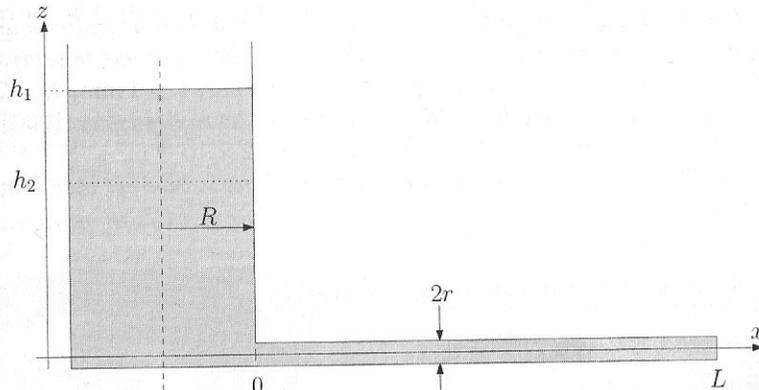


TD – bloc 4 – Fluides en écoulement partie 2

Fluides en écoulement interne

1. Viscosimètre de Poiseuille

Le dispositif ci-dessous présente un viscosimètre de Poiseuille. Le liquide considéré comme incompressible dont on veut déterminer la viscosité est placé dans un réservoir et s'écoule à travers un tube capillaire de longueur L et de rayon $r \ll R$ connecté au bas du réservoir.



On mesure la durée de descente Δt du fluide entre deux niveaux d'altitude h_1 et h_2 . On rappelle la loi de Hagen-Poiseuille applicable pour un écoulement laminaire dans une conduite de longueur L , qui relie le débit volumique à la différence de pression entrée/sortie : $D_V = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\Delta P}{L} = \frac{\Delta P}{R_{\text{capillaire}}}$

Modélisation de l'écoulement

- Établir une première relation entre débit volumique et vitesse d'évolution de l'altitude h du niveau dans le réservoir.
- En considérant que le fluide est au repos dans le réservoir, exprimer la pression en entrée P_e du capillaire. Quelle est la condition qui valide cette hypothèse ? Que vaut-elle en sortie P_s ?
- En déduire l'équation différentielle d'évolution de la hauteur h dans le réservoir. Exprimer le temps caractéristique d'évolution de h , noté τ , qui est le temps typique de vidange du réservoir.
- Établir alors la relation entre η , Δt , h_1 et h_2 et les grandeurs caractéristiques du viscosimètre, qui permettra la mesure de viscosité.

Mesure de viscosité et validation de la modélisation

Le réservoir a une section $S = 8.10^3 \text{ cm}^2$, la masse volumique μ du fluide est de 900 kg.m^{-3} . La pression extérieure est mesurée à 1 bar. La hauteur de fluide initiale est de $h_1 = 1 \text{ m}$. La longueur du capillaire est $L = 1 \text{ m}$, son rayon $r = 5 \text{ mm}$. On prendra $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$. On mesure $\Delta t = 32 \text{ minutes}$ pour $h_2 = 90 \text{ cm}$.

- Quelle est la viscosité du fluide ?
- Evaluer le temps caractéristique de vidange τ , le comparer à Δt .
- Exprimer le débit volumique en fonction du temps, le représenter. La condition d'un écoulement stationnaire dans le capillaire est-elle validée pour appliquer la loi de Hagen-Poiseuille? Quelle est l'approximation à faire ?

2. Sténose des vaisseaux sanguins

Exploitation de la notion de résistance hydraulique

On étudie la circulation du sang dans une artère moyenne saine modélisée par un tronçon cylindrique de longueur $l = 7 \text{ cm}$ et de rayon $r_0 = 0.7 \text{ cm}$ constant parcouru par le sang avec une vitesse débitante $v = 0.1 \text{ cm.s}^{-1}$. Le sang a pour viscosité dynamique $\eta = 6 \times 10^{-3} \text{ Pl}$ et pour masse volumique $\rho = 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$.

- Déterminer l'ordre du nombre de Reynolds dans le vaisseau sanguin. Conclure.
- Déterminer la résistance hydraulique R de ce vaisseau. En déduire la perte de charge ΔP le long du vaisseau. Dans toute la suite cette différence de pression sera supposée constante.
- Le tiers central de ce vaisseau sanguin est le siège d'une sténose. Dans cette portion centrale, le rayon intermédiaire r_1 est plus petit que le rayon r_0 du vaisseau non altéré (on prendra $r_1 = \frac{r_0}{2}$). Le tronçon de longueur l est alors partagé en trois portions de même longueur $l/3$ et de résistances hydrauliques respectivement notées R_1 , R_2 et R_3 . La figure 1 représente la coupe diamétrale du vaisseau atteint d'une sténose.

Déterminer les expressions des résistances R_1 , R_2 et R_3 . En déduire la valeur de la nouvelle résistance hydraulique R' de l'artère. Comparer le débit volumique dans l'artère présentant une sténose (Q') à celui d'une artère saine (Q). Conclure.

4) Un pontage est réalisé afin de réparer l'artère sclérosée. Le pontage consiste à contourner l'obstacle à l'aide d'une tubulure mise en parallèle sur la totalité du tronçon. La figure 2 représente la coupe diamétrale du pontage. Déterminer l'expression du rayon r_2 de la tubulure du pontage permettant de rétablir le débit volumique sanguin à sa valeur en l'absence de sténose.

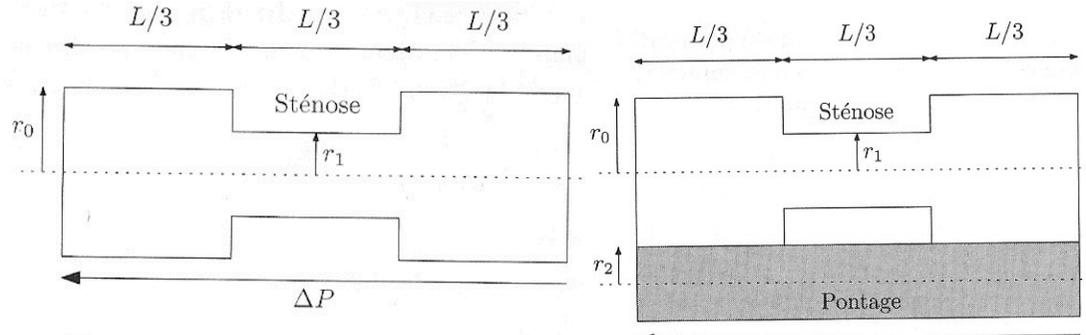


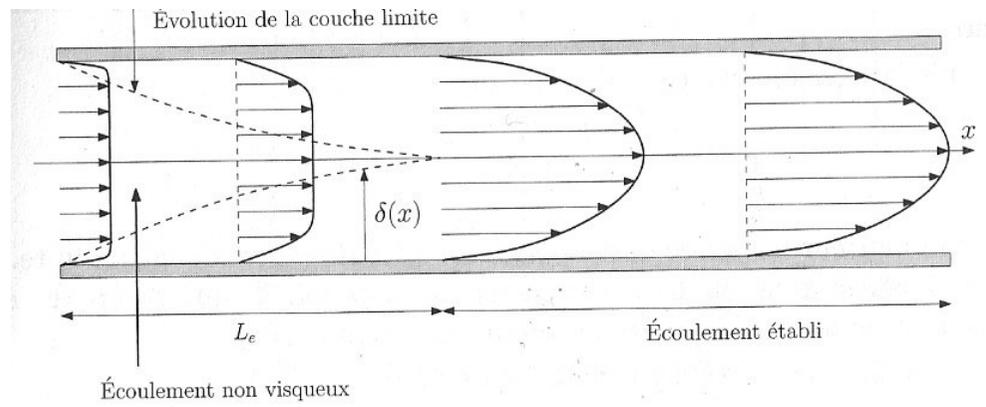
FIGURE 1 – Artère atteinte d'une sténose

FIGURE 2 – Pontage

Pour aller plus loin ...

3. Longueur d'établissement de la couche limite dans une conduite
Utiliser un raisonnement en ordre de grandeur (ODG)

Quand le fluide pénètre dans une canalisation, le profil parabolique de vitesse imposé par la viscosité n'est pas encore établi. Elle s'établit progressivement au bout d'une certaine distance notée L_e , les particules de fluides périphériques au voisinage de la paroi freinant progressivement les autres plus intérieures.



Expérimentalement, on mesure $L_e / D \approx 0,06 Re$. En exploitant le temps caractéristique de diffusion par viscosité appliqué à la couche limite et le temps caractéristique de convection trouver une relation équivalente entre L_e , Re et D .

Fluides en écoulement externe autour d'un obstacle

4. Traînée d'une balle de ping-pong

Evaluation du nombre de Reynolds, choix d'un modèle de traînée

Une balle de ping-pong de masse $m = 2,7$ g, de diamètre $D = 40$ mm est couramment envoyée à la vitesse $v_0 = 100$ km.h⁻¹. Pour l'air : $\mu = 1,2$ kg.m⁻³ et $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Pa.s

- a) Quel est le nombre de Reynolds associé ?
- b) On prendra $C_x \approx 0,4$, en déduire la force de traînée. La comparer au poids de la balle.
- c) En 2000, le diamètre des balles a été augmenté de 38 mm à 40 mm. Quelles peuvent être les raisons ?
- d) En supposant que le mouvement de la balle est horizontal, quelle est la vitesse de la balle après $d = 3$ m ? L'hypothèse d'un mouvement horizontal sur cette distance est-elle justifiée ?

5. Vol horizontal d'un avion

Sujet de concours Centrale TSI – Projet Skysailor

III Projet d'un avion solaire autonome sur Mars : le Sky-Sailor

Dans cette partie, g_0 et g désignent l'intensité du champ de pesanteur au sol et à une altitude z . On note (\mathcal{R}) le référentiel lié au sol martien et (\mathcal{R}') celui lié aux ailes du Sky-Sailor.

Dans toute cette partie III, le Sky-Sailor possède un mouvement de translation rectiligne, horizontal, uniforme à la vitesse \vec{V} par rapport à (\mathcal{R}) .



Figure 4 Photographie du Sky-Sailor (<http://www.sky-sailor.thez.ch>)

Le maintien de l'avion dans l'atmosphère est assuré par une force aérodynamique appelée force de portance \vec{F}_p . Cette dernière naît de la circulation de l'atmosphère martienne autour des ailes. Les caractéristiques de cette force sont les suivantes :

- elle est perpendiculaire à la vitesse \vec{V} de l'avion par rapport à l'atmosphère martienne (supposée immobile) ;
- elle est ascendante ;
- sa norme est $\|\vec{F}_p\| = F_p = \frac{1}{2}\rho S C_p V^2$ avec $V = \|\vec{V}\|$, C_p un coefficient sans unité appelé coefficient de portance et S la surface des ailes.

Masse des batteries Lithium Ion Polymère	$m = 1,2 \text{ kg}$
Masse totale de l'avion	$M_{\text{av}} = 2,6 \text{ kg}$
Énergie maximale stockée dans les batteries	$\mathcal{E}_{\text{stock}} = 3,78 \times 10^5 \text{ J}$
Envergure	$3,2 \text{ m}$
Surface S des ailes	$S = 0,78 \text{ m}^2$
Surface des panneaux solaires	$S' = 0,51 \text{ m}^2$
Rendement des panneaux solaires	$\eta = 0,28$
Rendement du système de propulsion	$\eta' = 0,82$
Puissance maximale du système de propulsion	100 W
Coefficient de traînée	$C_t = 1,3 \times 10^{-2}$

Tableau 1 Caractéristiques de l'avion Sky-Sailor

Dans les conditions de l'expérience, on admet que C_p est constant et ne dépend que de la géométrie des ailes. Enfin, localement autour des ailes, on supposera que la masse volumique ρ de l'atmosphère est constante.

III.A – Détermination du coefficient de portance dans le modèle de l'écoulement parfait

On considère une coupe de profil d'une aile du Sky-Sailor (figure 5). La surface extérieure de l'aile est appelée extrados, la surface intérieure intrados. On adopte le modèle très simplifié suivant :

- l'écoulement de fluide autour des ailes est parfait, stationnaire et unidirectionnel ; nous noterons L_i, P_i (respectivement L_e, P_e) la longueur de l'intrados (respectivement de l'extrados) et la pression immédiatement sous l'aile (respectivement au dessus de l'aile) supposée constante ;
- la vitesse immédiatement sous l'intrados supposée constante est prise égale à V et on note V_e la vitesse immédiatement au dessus de l'extrados également prise constante ;
- l'intrados est parallèle au sol.

Dans cette sous-partie III.A, nous travaillerons dans le référentiel (\mathcal{R}') lié aux ailes.

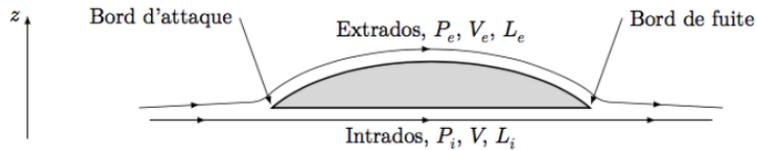


Figure 5 Représentation schématique de deux lignes de courant au voisinage de l'intrados et de l'extrados d'une aile du Sky-Sailor

Dans le cadre d'un modèle simple, on admet que tout se passe comme si les particules fluides parcourent les trajets le long de l'intrados et de l'extrados pendant la même durée.

Q 36. Trouver la relation entre L_i, V, L_e et V_e .

Dans le cadre des hypothèses de travail, en notant v la vitesse relative d'une particule de fluide vis-à-vis du référentiel (\mathcal{R}'), située à l'altitude z , le théorème de Bernoulli s'écrit $\frac{P}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 + gz = \text{constante}$.

Q 37. La longueur de l'extrados est plus grande que celle de l'intrados. En négligeant la variation d'altitude de l'aile, montrer qualitativement, à l'aide du théorème de Bernoulli, l'existence de la force de portance.

On pourra noter P_0 et v_0 les pression et vitesse de l'écoulement au loin de l'aile.

Q 38. En admettant que la résultante des forces de pression verticales qui s'exercent sur l'intrados et l'extrados est la force de portance F_p , donner l'expression de son intensité F_p en fonction de P_i, P_e et S . En déduire que :

$$F_p = \frac{\rho V^2}{2} \left(\left(\frac{V_e}{V} \right)^2 - 1 \right) S$$

Q 39. En déduire que l'expression du coefficient de portance est

$$C_p = \left(\frac{L_e}{L_i} \right)^2 - 1. \quad (\text{III.1})$$

Q 40. Sachant que l'extrados est 2,0 % plus long que l'intrados, calculer numériquement C_p .

III.B – Étude mécanique

Dans cette sous-partie III.B, nous travaillons dans le référentiel (\mathcal{R}) supposé galiléen.

On remplace le modèle de l'écoulement parfait décrit précédemment par le modèle d'écoulement visqueux gazeux. L'écoulement de gaz autour des ailes s'accompagne maintenant, en plus de la force de portance, d'une force de frottement fluide appelée traînée $\vec{F}_t = -\frac{1}{2}\rho S C_t \|\vec{V}\| \vec{V}$, avec C_t un coefficient sans unité appelé coefficient de traînée. Nous admettrons ici que le coefficient C_t est constant.

En sus de ces deux forces aérodynamiques, l'avion est soumis à son poids \vec{P} et à la force de propulsion \vec{T} due au système de propulsion (moteur et hélices).

Q 41. Faire un schéma des forces s'exerçant sur l'avion. Pour simplifier, on supposera que toutes ces forces s'appliquent au centre de masse G de l'avion.

Q 42. Trouver une relation littérale entre P, T et $f = C_p/C_t$ la finesse de l'avion.

Q 43. On définit la puissance motrice P_m (puissance mécanique) comme la puissance nécessaire à propulser l'avion dans l'atmosphère. Montrer que cette puissance a pour expression

$$P_m = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{2g^3 M_{\text{av}}^3}{\rho C_p S}}. \quad (\text{III.2})$$

Q 44. Est-il plus facile sur Mars de voler à basse ou à haute altitude ? Justifier la réponse (comme l'altitude de l'avion demeure faible devant le rayon de la planète, on négligera la variation de l'intensité du champ de pesanteur avec l'altitude). On pourra s'aider d'un résultat de la question 23.

Q 45. Le coefficient de portance du Sky-Sailor vaut : $C_p = 0,80$ (valeur tabulée que nous conserverons par la suite). Comparer cette valeur à celle trouvée à la question 40. Proposer une explication de la différence entre les valeurs de C_p calculée et tabulée.

Q 46. Calculer numériquement la vitesse V et la puissance motrice pour un vol à basse altitude ($z \approx 0$). Comparer cette puissance à celle d'un dispositif du quotidien consommant de l'énergie. Le système de propulsion est-il suffisamment puissant ?

Exo 6 Sujet Centrale PSI 2020 – Etude simplifiée du vol d'un Airbus A320

I L'Airbus A320 en vol

I.A – Éléments de description d'une aile

On considère un avion de ligne de type Airbus A320. L'avion, de masse $m = 60\,000$ kg supposée constante, est équipé de deux turboréacteurs (un sous chaque aile) délivrant une poussée totale \vec{F} . La figure 1 rappelle la signification des termes utiles à la description d'une aile.

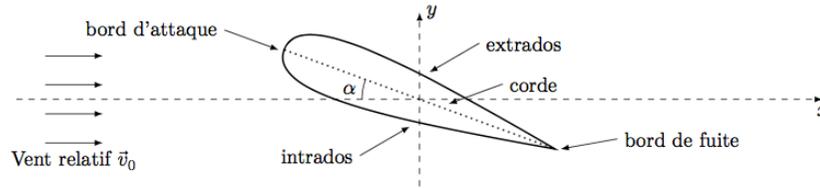


Figure 1

Chaque aile mesure environ 12 mètres de long et sa corde 3 mètres en moyenne. Le profil de chaque aile est supposé symétrique.

On se place dans le référentiel de l'avion (O, x, y) (figure 1). L'aéronef est dans un flux d'air unidirectionnel et stationnaire, dit vent relatif, de vitesse $\vec{v}_0 = v_0 \vec{e}_x$ et d'angle d'incidence α par rapport à l'aile. L'écoulement de l'air est partout supposé incompressible, homogène et stationnaire. Chaque aile subit alors une force de portance d'intensité $\frac{1}{2} \rho S v_0^2 C_y$ et une force de traînée d'intensité $\frac{1}{2} \rho S v_0^2 C_x$ où ρ est la masse volumique de l'air et S la surface portante de l'aile. La valeur des coefficients C_x et C_y varie avec l'angle d'incidence comme indiqué figure 2. Pour l'écoulement autour de l'aile, dans le cadre de ces hypothèses, vitesse v et pression P sont liées par la relation de Bernoulli $P + \frac{1}{2} \rho v^2 = P_t = \text{Cte}$. P_t est appelé *pression totale*.

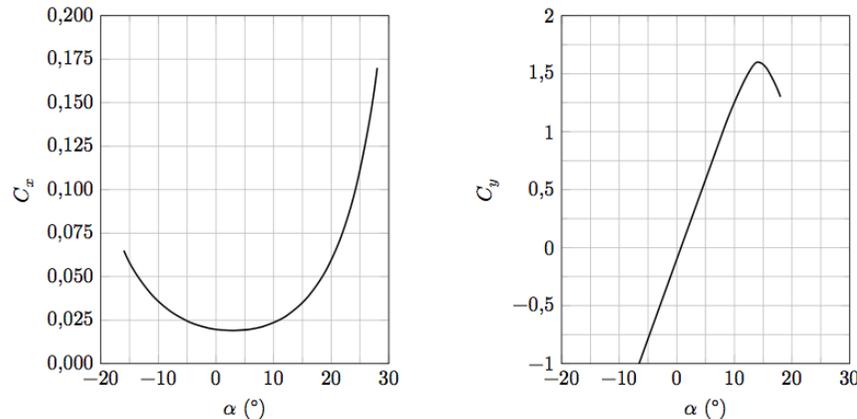


Figure 2

Q 1. Recopier sommairement le schéma de la figure 1 en y faisant figurer la résultante aérodynamique \vec{R} ainsi que ses composantes suivant les axes (Ox) et (Oy) , notées \vec{R}_x et \vec{R}_y .

On appelle *angle de calage*, l'angle β que fait la corde des ailes avec l'axe longitudinal du fuselage de l'avion (figure 3). Pour l'avion étudié, il vaut 3° . On appelle *assiette* l'angle que fait l'axe longitudinal de l'avion avec l'horizontale et *pente* l'angle que fait le support de la vitesse du centre de masse de l'avion (sa trajectoire) avec l'horizontale. En vol horizontal (pente nulle) et à assiette nulle, la vitesse du centre de masse de l'avion est dirigée suivant son axe longitudinal. En phase de montée ou de descente, le pilote peut modifier l'assiette à pente constante, modifiant ainsi l'angle d'incidence.

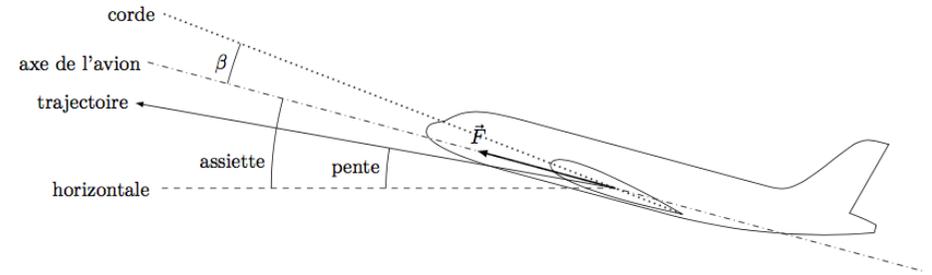


Figure 3

On suppose que le centre de poussée de l'avion correspond à son centre de masse et que la force de poussée totale \vec{F} produite par les deux turboréacteurs est dirigée selon l'axe longitudinal du fuselage (figure 3). On assimile les coefficients aérodynamiques C_x et C_y de l'avion à ceux des ailes. La vitesse du centre de masse de l'avion est considérée constante dans le référentiel terrestre, supposé galiléen.

Q 2. On considère l'avion en vol de croisière à pente et assiette nulles (trajectoire confondue avec l'axe de l'avion). Écrire, dans ces conditions, l'équation, dite de sustentation, liant la masse de l'avion m à C_y et l'équation, dite de propulsion, liant F à C_x .

Q 3. Estimer numériquement la vitesse de croisière et la poussée nécessaire à son maintien.

I.B – Rôle des ailes

En notant P_0 la pression en avant de l'avion, P la pression en un point de l'aile et P_t la pression totale en ce même point, on définit le coefficient de pression en ce point par $K_p = \frac{P - P_0}{P_t - P_0}$. La figure 4 donne l'allure du coefficient de pression d'une aile d'A320 pour trois valeurs d'angle d'incidence en fonction de la position le long de l'intrados et de l'extrados, 0 représentant le bord d'attaque et 1 le bord de fuite. La courbe en trait continu correspond à l'extrados, les pointillées à l'intrados. À incidence nulle, les courbes pour l'intrados et l'extrados sont confondues.

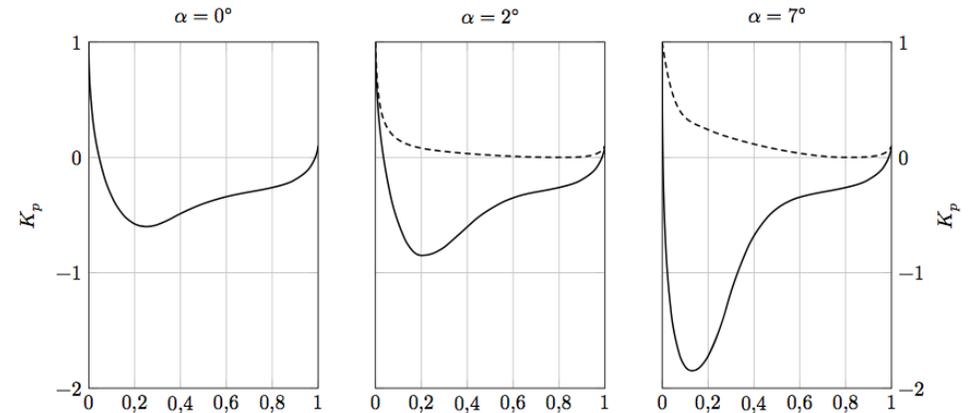


Figure 4

Q 4. À l'aide de la figure 4, expliquer l'existence d'une force de portance pour les angles d'incidence non nuls.

Q 5. Justifier que cette force de portance est nulle pour un angle d'incidence nul.

Q 6. À partir de la figure 2, en considérant que la trajectoire est horizontale et que l'assiette est non nulle, expliquer l'existence d'une vitesse minimale v_{\min} , dite *vitesse minimale de sustentation*, en-deçà de laquelle la sustentation ne peut plus être assurée. On dit alors que l'avion *décroche*.

- Q 7. Exprimer la vitesse v_{\min} .
- Q 8. Pour l'aile considérée, estimer la valeur numérique de l'incidence permettant de voler à v_{\min} .
- Q 9. Estimer la valeur numérique de v_{\min} pour l'aile considérée.
- Q 10. Pourquoi cette situation risque-t-elle de se présenter en phase d'atterrissage ?

Afin de permettre un atterrissage en sécurité, les ailes d'avion sont équipées de becs sur le bord d'attaque et de volets sur le bord de fuite. Ces éléments mobiles permettent de modifier le profil de l'aile et de faire ainsi varier ses coefficients aérodynamiques et sa surface portante. La figure 5 montre l'influence des becs et des volets sur le C_y de l'aile.

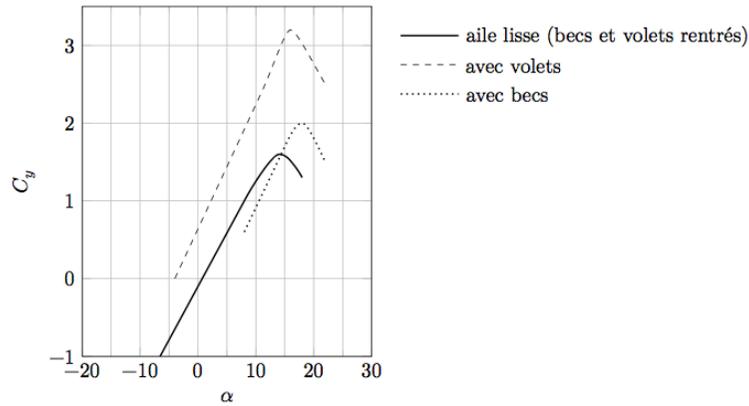


Figure 5

- Q 11. En s'appuyant sur la figure 5 et en sachant que, pour des raisons de sécurité, l'atterrissage doit se faire à $250 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, discuter qualitativement le rôle des becs et des volets.

I.C – Le vol plané

Le rendement d'une aile se caractérise par sa finesse, notée f . Considérons un avion en l'air qui coupe ses moteurs et poursuit en vol plané descendant (sans propulsion) à vitesse constante sur une pente constante avec une assiette non nulle. La finesse de l'avion est définie comme le rapport entre la distance horizontale parcourue avant d'atteindre le sol et la hauteur de chute.

- Q 12. À partir d'un schéma représentant les forces s'exerçant sur l'avion, exprimer la finesse de l'aile en fonction du rapport C_y/C_x .

La figure 6 présente la *polaire de type Eiffel* de l'aile d'un A320. Il s'agit de la courbe représentant, pour un nombre de Reynolds donné, la valeur de C_y en fonction de celle de C_x pour chaque valeur de l'angle d'incidence.

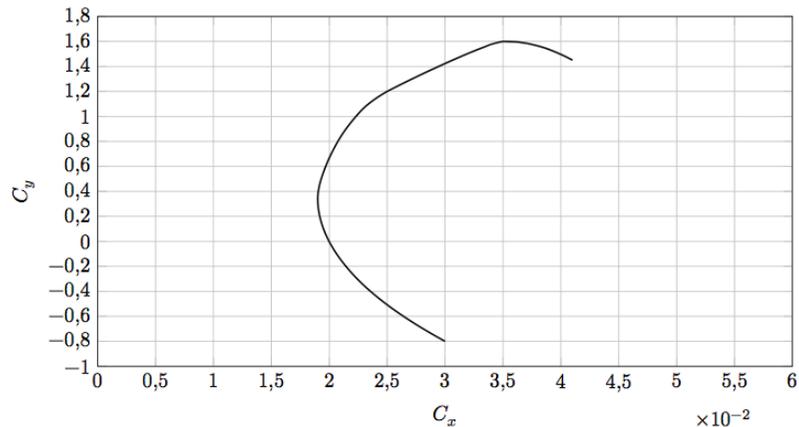


Figure 6

- Q 13. Comment se traduit graphiquement la finesse maximale sur la polaire de type Eiffel ?
- Q 14. En utilisant la figure 6, évaluer numériquement la finesse maximale de l'aile considérée.

- Q 15. En déduire la distance horizontale maximale que peut parcourir l'avion en vol plané en cas de panne de moteur à 1000 mètres au dessus du sol.

- Q 16. En réalité, la finesse de l'avion complet (ailes, fuselage, moteurs, empennage, dérive...) est deux fois moins importante que celle de ses ailes. Proposer une explication.

Pour aller plus loin...

Un hydrofoil (ou voilier à aile marine) est une embarcation sustentée uniquement par la portance générée par des ailes se déplaçant dans l'eau à une vitesse suffisante, comme représenté figure 1. Le but de cet exercice est d'étudier le phénomène de sustentation de ces navires et de comprendre pourquoi des phénomènes de cavitation peuvent se poser.

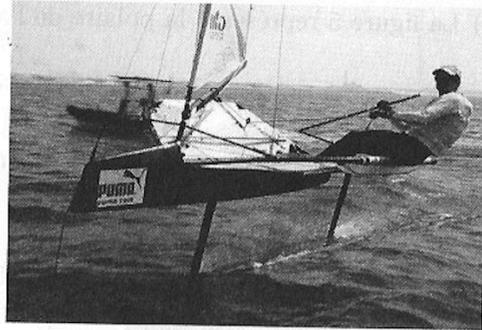


FIGURE 1 – Exemple d'hydrofoils : le Moth

Considérant un hydrofoil se déplaçant à la vitesse \vec{V} dans l'eau, on se place dans le référentiel qui lui est lié et on le modélise par une aile permettant d'obtenir la sustentation, entièrement immergée et représentée figure 2.

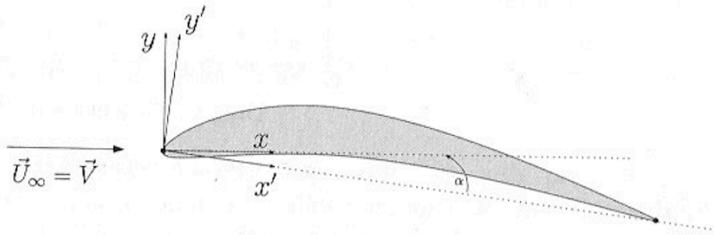


FIGURE 2

1) On note C_L et C_D les coefficients de portance et de trainée de l'aile et S sa surface alaire (équivalent du maître-couple).

- Rappeler les expressions des forces de trainée et de portance s'exerçant sur l'aile.
- Quelles sont les autres forces appliquées à l'aile? Quelle relation lie ces forces en régime stationnaire?

c) La figure 3 représente l'évolution de la trainée d'un catamaran équipé d'hydrofoils et d'un catamaran présentant les mêmes caractéristiques mais sans hydrofoil. Identifier les deux courbes. Commenter.

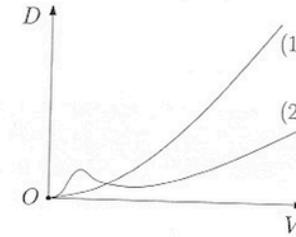


FIGURE 3

2) On cherche à déterminer la valeur de la surface alaire minimale d'un voilier équipé d'hydrofoils, afin que celui-ci décolle pour une vitesse de $V_d = 6$ nœuds. Ce voilier, un Moth à foils équipé d'ailes NACA-66-415, est représenté figure 4. Le Moth est un hydrofoil individuel, dont la masse (sans équipage) est $m = 30$ kg.

a) La figure 5 représente la polaire de l'aile NACA 66-415



FIGURE 4 – Photo des foils d'un Moth

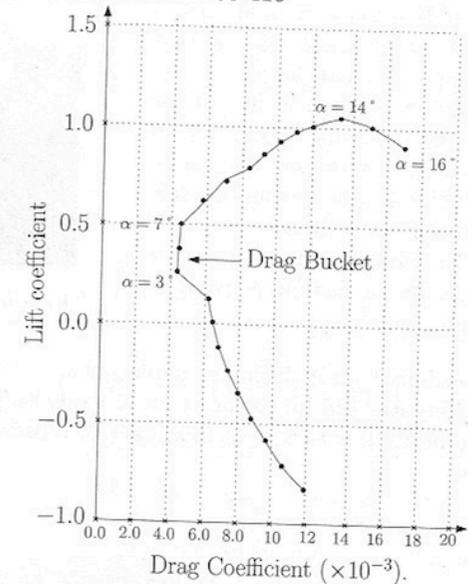


FIGURE 5 – Polaire de l'aile NACA 66-415

- Les marins utilisant ce genre de voilier, tentent de se placer dans la configuration où l'angle d'incidence varie entre $\alpha_1 = 3^\circ$ et $\alpha_2 = 7^\circ$. Pourquoi?
 - À partir de quelle valeur de l'angle α y a-t-il un risque de décrochage?
 - On suppose que l'angle d'incidence se situe dans la zone du Drag Bucket. Déterminer la surface alaire permettant au bateau de décoller. On pourra considérer les angles comme petits devant 1.
- 3) On teste l'aile dans un bassin d'écoulement sous une profondeur h et sous une incidence α données. Plus précisément, on relève la pression P_i aux différents

points de l'extrados et de l'intrados, repérés par leur position x_i comme représenté figure 6. On détermine ensuite les coefficients de pression C_{p_i} , définis de la manière suivante : $C_{p_i} = \frac{P_i - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho V^2}$, où P_∞ est la pression dans l'eau loin devant l'hydrofoil.

- Quelle relation existe-t-il entre P_∞ et la profondeur h ?
- Quelle longueur caractéristique L , permet ici de déterminer le nombre de Reynolds R_e ? Exprimer R_e .
- Pour $\alpha = 6^\circ\text{C}$ et pour une profondeur $h_1 = 1\text{ m}$ donnée, on obtient les courbes données figure 7.

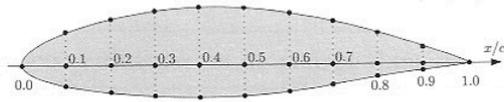


FIGURE 6 – Abscisses de corde

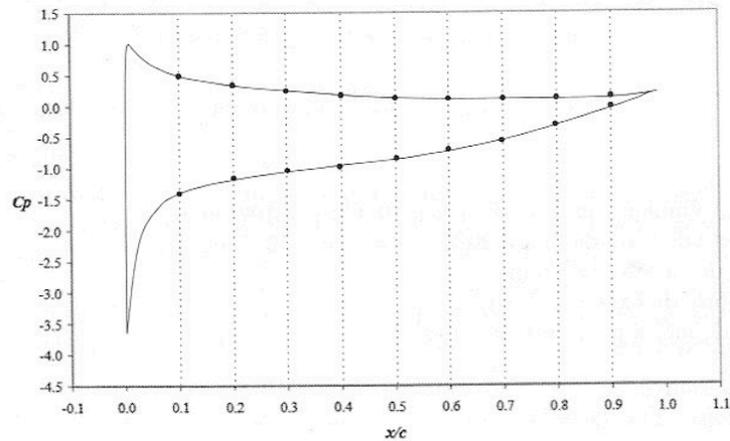


FIGURE 7 – Coefficients de pression sur intrados et extrados

Sur les deux courbes, identifier les points correspondant à l'intrados et à l'extrados. Justifier le fait que ces relevés permettent d'expliquer la portance de l'aile.

4) Le phénomène de cavitation apparaît lorsque la pression de l'eau atteint sa pression de vapeur saturante (pour une température T donnée). Ayant affaire ici à de l'eau de mer à la température de 20°C , sa pression de vapeur saturante vaut $P_v = 2294\text{ Pa}$. Lorsque le phénomène de cavitation apparaît, il se forme une poche de cavitation, constituée de vapeur d'eau et dans laquelle la pression sera considérée comme constante et égale à P_v . En aval de la poche, on suppose que l'écoulement « recolle » à l'hydrofoil.

- Sur quelle partie de l'aile le phénomène de cavitation apparaît-il en 1^{er} ?
- Pour $\alpha = 6^\circ\text{C}$ et pour une profondeur $h_2 = 0.5\text{ m}$ donnée, on obtient les courbes données figure 8.

- Quelle est la taille de la poche de cavitation ?
- À quoi correspond la portion de courbe en pointillés ?
- Que vaut la vitesse V ?

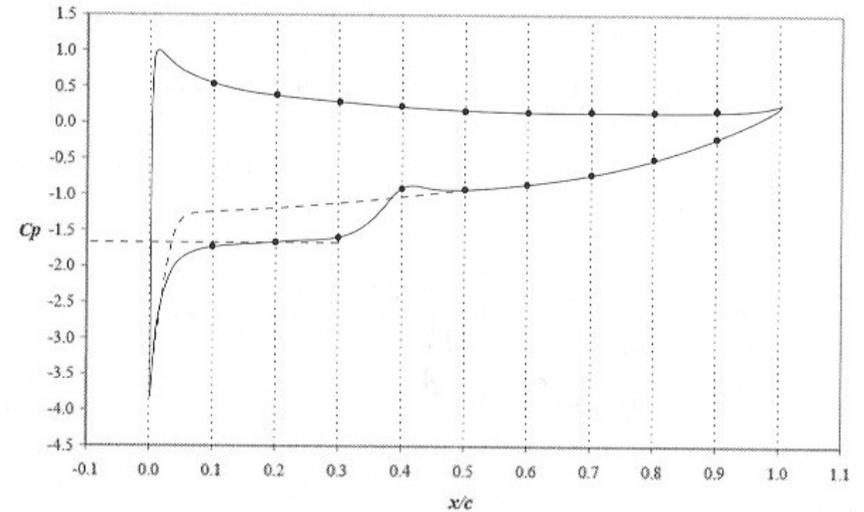


FIGURE 8

c) Conclure.

Données

Masse volumique de l'eau de mer à 20°C : $\rho = 1025\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
 Viscosité de l'eau de mer à 20°C : $\nu = 1.04 \times 10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,
 Corde de l'aile : $c = 15\text{ cm}$,
 Envergure de l'aile : $E = 80\text{ cm}$,
 L'eau de mer a pour salinité : 35 g/l .