

Cours électif Transversal – Mécanique des Fluides Numérique

Séance 2 – Portance et traînée autour d'une aile

Thibault Quatravaux

Objectif du cours

Positionnement

Ce cours a pour objectif de fournir les repères aérodynamiques nécessaires à l'analyse et à l'interprétation des résultats du TD de simulation numérique autour d'un profil.

À l'issue du cours, l'étudiant doit être capable de :

- ▶ mobiliser les notions de portance, de traînée, d'incidence et de finesse pour commenter un résultat ;
- ▶ relier les grandeurs globales (F_x , F_z , C_x , C_z) aux structures locales de l'écoulement ;
- ▶ identifier et interpréter, dans les champs calculés, les zones d'accélération, le décollement, le sillage et une éventuelle onde de choc ;
- ▶ construire un commentaire physique argumenté en vue du compte rendu du TD.

Idée directrice

L'enjeu n'est pas seulement de lire des courbes ou des cartes de contours, mais de relier des observations locales, des grandeurs globales et une interprétation physique cohérente.

Plan

Un peu d'histoire

Portance, traînée, incidence

Observation et interprétation des écoulements autour d'un profil

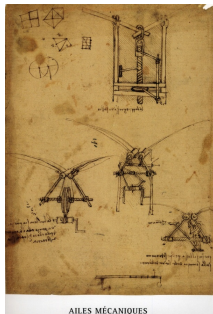
De l'aile bidimensionnelle à l'aile réelle

Exemples : un profil d'aile selon l'usage

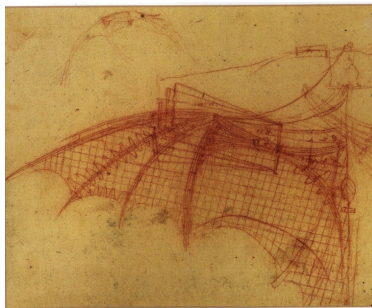
Consignes pour le TD

Quelques repères historiques

À la fin du XVe siècle, Léonard de Vinci comprend que le vol ne peut pas être pensé comme une simple imitation naïve de l'oiseau : il observe, dissèque, compare et cherche à formaliser. Cependant, il ne dispose ni des outils expérimentaux, ni des concepts de pression, de couche limite ou de coefficient aérodynamique.



Carnets de Léonard
de Vinci



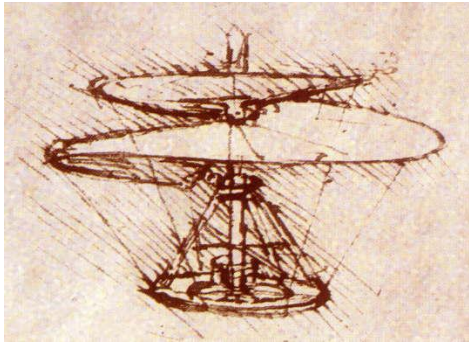
Études de dispositifs inspirés du vol
animal

Anecdote historique

Les projets de Léonard de Vinci témoignent d'une intuition remarquable : avant même la naissance de la mécanique des fluides, il avait perçu que la compréhension du vol exigeait une analyse rationnelle des formes et du mouvement de l'air.

L'aérodynamique moderne se distingue toutefois de cette phase pionnière par l'articulation entre **observation**, **expérimentation quantitative** et **modélisation**.

De l'invention mécanique à l'analyse physique



Concept de machine volante dans les carnets de
Léonard de Vinci



Reconstitution du dispositif imaginé

Idée essentielle

Léonard de Vinci ne se limite pas à représenter le vol : il propose aussi des dispositifs concrets, comme cette **vis aérienne**, souvent présentée comme un ancêtre conceptuel de l'hélicoptère.

De l'histoire du vol à l'analyse aérodynamique

Changement de perspective

Les premières réflexions sur le vol portent d'abord sur les formes, les dispositifs et les analogies avec le vivant. L'aérodynamique de l'ingénieur change de point de vue : il ne s'agit plus seulement d'imaginer une machine volante, mais de déterminer **quels efforts l'air exerce sur elle**.

On est alors conduit à répondre à trois questions fondamentales :

1. comment l'écoulement autour d'un profil modifie-t-il la pression et les contraintes de surface ?
2. comment ces actions se traduisent-elles en une **portance** et une **traînée** ?
3. comment quantifier ces efforts pour comparer des configurations ou interpréter une simulation ?

Conséquence pour la suite

La suite du cours introduit donc les grandeurs qui serviront directement à lire et commenter les résultats du TD.

Plan

Un peu d'histoire

Portance, traînée, incidence

Observation et interprétation des écoulements autour d'un profil

De l'aile bidimensionnelle à l'aile réelle

Exemples : un profil d'aile selon l'usage

Consignes pour le TD

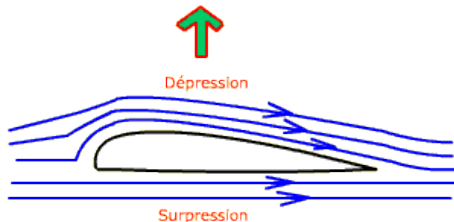
Pressions, frottement et résultante aérodynamique

Lorsqu'un écoulement rencontre un profil, il exerce sur sa surface des actions mécaniques réparties.

Ces actions résultent de deux contributions :

- ▶ les **pressions** ;
- ▶ les **contraintes visqueuses** liées au frottement.

Comme les distributions de pression diffèrent entre les surfaces supérieure et inférieure, la résultante aérodynamique n'est pas nulle.



On décompose cette résultante en :

- ▶ la **portance** F_z , perpendiculaire à l'écoulement incident ;
- ▶ la **traînée** F_x , parallèle à l'écoulement incident.

Définitions des coefficients aérodynamiques

Définitions

$$F_z = \frac{1}{2} \rho u_\infty^2 S C_z(\alpha), \quad F_x = \frac{1}{2} \rho u_\infty^2 S C_x(\alpha)$$

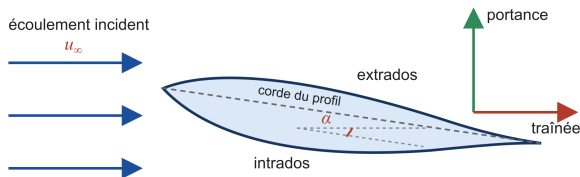
- ▶ C_z est le **coefficient de portance**.
- ▶ C_x est le **coefficient de traînée**.
- ▶ Ces coefficients sont sans dimension.
- ▶ Ils permettent de comparer le comportement aérodynamique de configurations différentes.

Dans le TD, il faudra commenter leur évolution en fonction de l'incidence, puis relier cette évolution à la structure de l'écoulement.

Profil, corde et incidence

Notions de base

- ▶ l'**extrados** est la face supérieure du profil
- ▶ l'**intrados** est la face inférieure
- ▶ la **corde** est le segment de référence du profil
- ▶ l'**incidence** α est l'angle entre la corde et la direction de l'écoulement incident

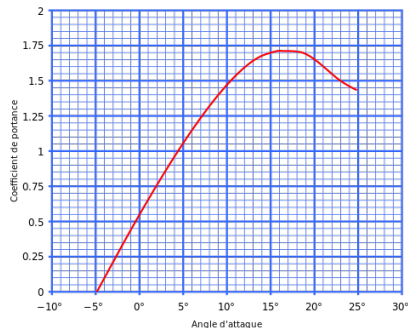


α : angle entre la corde du profil et la direction de l'écoulement incident

L'incidence constitue l'un des paramètres essentiels du problème aérodynamique : lorsqu'elle varie, la répartition des actions de l'air sur le profil se modifie.

Influence de l'incidence

- L'incidence α modifie la distribution de pression autour du profil.
- Lorsque α augmente, la portance croît en général dans un premier temps.
- Cette augmentation s'accompagne également d'une évolution de la traînée.
- Au-delà d'un certain seuil, l'écoulement peut se dégrader fortement sur l'extrados.



Point pédagogique

L'augmentation de la portance n'est jamais gratuite : elle doit toujours être analysée conjointement avec la traînée.

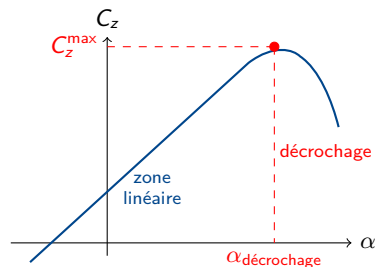
Le décrochage : quand la portance s'effondre

Au-delà d'un angle d'incidence critique, l'écoulement ne peut plus suivre l'extrados : la couche limite **décolle massivement**.

Il en résulte :

- ▶ une chute brutale de la portance (C_z diminue fortement) ;
- ▶ une augmentation importante de la traînée (C_x croît) ;
- ▶ une dégradation de la finesse.

Ce phénomène est appelé **décrochage** (*stall* en anglais). Il correspond au maximum du C_z sur la courbe incidence/portance.



Point de vigilance pour le TD

Le terme « décrochage » doit être réservé à ce régime précis. Un simple épaissement de la couche limite ou une recirculation locale ne constituent pas un décrochage.

Finesse aérodynamique

La **finesse** est définie par :

$$f = \frac{F_z}{F_x} = \frac{C_z}{C_x}$$

Elle mesure le compromis entre :

- ▶ la capacité à produire de la portance ;
- ▶ le coût aérodynamique associé en termes de traînée.

La **courbe polaire** permet de représenter ce compromis dans le plan (C_x, C_z) . Chaque point correspond à un état de fonctionnement du profil.

Sur une telle représentation, la finesse s'interprète comme le rapport entre l'ordonnée et l'abscisse d'un point de la courbe : plus ce rapport est élevé, plus la configuration est aérodynamiquement efficace.

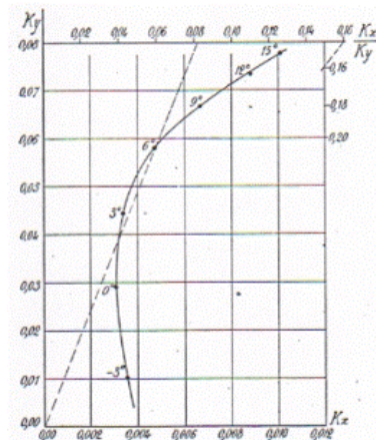


FIG. 21. — Tracé nouveau des polaires. Aile n° 81.

La courbe polaire visualise l'évolution conjointe de C_z et C_x .

Plan

Un peu d'histoire

Portance, traînée, incidence

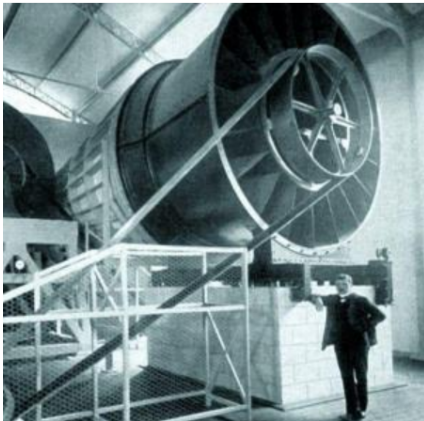
Observation et interprétation des écoulements autour d'un profil

De l'aile bidimensionnelle à l'aile réelle

Exemples : un profil d'aile selon l'usage

Consignes pour le TD

Pourquoi une soufflerie ?



Soufflerie Eiffel à Auteuil

L'expérimentation en soufflerie permet de :

- ▶ mesurer des efforts globaux sur un profil ;
- ▶ visualiser certains phénomènes d'écoulement ;
- ▶ comparer des configurations ;
- ▶ établir des lois de comportement.

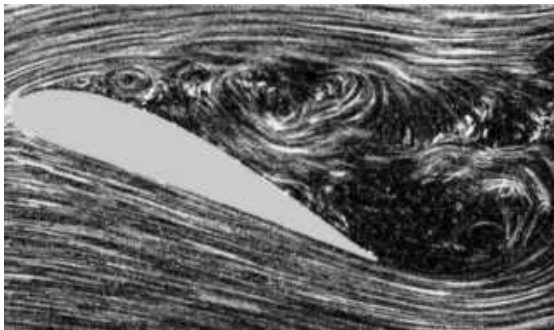
On ne cherche donc pas seulement à **voir** un écoulement, mais à relier ce que l'on observe aux efforts aérodynamiques mesurés.

Soufflerie et simulation : deux démarches complémentaires

La simulation numérique ne remplace pas l'expérience : elle en constitue une représentation calculée. Les données de soufflerie servent à **valider** les modèles numériques ; les deux approches se renforcent mutuellement.

Que peut-on observer dans un écoulement ?

L'observation d'un écoulement autour d'un profil permet de repérer plusieurs phénomènes caractéristiques.



On s'intéressera notamment à :

- ▶ l'accélération de l'écoulement sur l'extrados ;
- ▶ une éventuelle **onde de choc**, c'est-à-dire une variation brusque des grandeurs d'écoulement ;
- ▶ le **décollement** de la couche limite, lorsque l'écoulement ne suit plus la paroi ;
- ▶ le **sillage**, c'est-à-dire la zone perturbée située en aval du profil.

L'onde de choc en régime transsonique

En régime transsonique ($Ma_\infty \approx 0,7-0,9$), l'écoulement peut être **subsonique à l'infini** mais atteindre localement des vitesses **supersoniques** sur l'extrados.

Cela se produit car l'accélération sur l'extrados peut faire franchir la barrière sonique ($Ma_{local} = 1$).

L'écoulement doit alors retrouver des conditions subsoniques : il le fait brutalement à travers une **onde de choc**.

Conséquences sur l'aérodynamique :

- ▶ chute de pression brusque en aval du choc ;
- ▶ épaissement, voire décollement de la couche limite ;
- ▶ augmentation significative de la traînée (traînée d'onde).

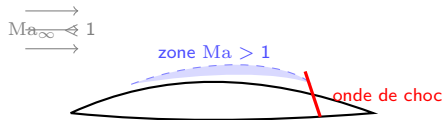


Schéma de principe : zone supersonique locale et onde de choc sur l'extrados d'un profil en régime transsonique.

Lien avec le TD

Dans Fluent, l'onde de choc se repère sur la carte du nombre de Mach : c'est une ligne de discontinuité au passage de $Ma = 1$. Elle est distincte de la zone transsonique étendue qui la précède. Son apparition se traduit dans les courbes globales par une augmentation de C_x et une inflexion de C_z — les coefficients sont définis de la même façon qu'en régime incompressible,

De l'observation au calcul numérique

Un autre outil pour un même objectif

La simulation numérique ne fournit pas seulement des images : elle doit permettre d'**interpréter physiquement** le comportement aérodynamique du profil.

Dans le TD, les champs calculés devront être utilisés pour :

- ▶ repérer les zones d'accélération de l'écoulement sur l'extrados ;
- ▶ identifier une éventuelle zone transsonique et localiser l'onde de choc ;
- ▶ mettre en évidence le décollement de la couche limite ;
- ▶ caractériser l'évolution du sillage en aval du profil.

Attente du TD

Il ne suffit pas de montrer une figure Fluent : il faut expliquer ce qu'elle met en évidence et pourquoi cela influence l'aérodynamique de l'aile.

Relier structures d'écoulement et grandeurs globales

- ▶ Une modification locale de l'écoulement modifie la distribution de pression autour du profil.
- ▶ Lorsqu'un décollement apparaît, l'écoulement suit moins bien la paroi et la récupération de pression sur la partie aval du profil se dégrade.
- ▶ Le sillage s'épaissit alors généralement, ce qui s'accompagne d'une augmentation de la traînée de pression.
- ▶ L'efficacité aérodynamique s'en trouve dégradée : la traînée augmente, tandis que la portance peut cesser de croître ou diminuer si le décollement devient important.

Conséquence pour le TD

Dans le commentaire des résultats, il faudra relier l'évolution de C_x , de C_z et de la finesse à l'apparition du décollement et à l'évolution du sillage.

Plan

Un peu d'histoire

Portance, traînée, incidence

Observation et interprétation des écoulements autour d'un profil

De l'aile bidimensionnelle à l'aile réelle

Exemples : un profil d'aile selon l'usage

Consignes pour le TD

Limite du modèle 2D

- ▶ Le profil étudié dans le TD constitue une représentation bidimensionnelle utile, mais simplifiée.
- ▶ Une aile réelle est un objet tridimensionnel.
- ▶ La différence de pression entre intrados et extrados provoque, près des extrémités, un contournement de l'écoulement.
- ▶ Il en résulte la formation de **vortex marginaux**.

Idée clé

Le TD est réalisé sur un profil 2D, mais l'aile réelle présente des effets tridimensionnels absents de ce modèle.

Condensation de la vapeur d'eau en bout d'aile



Dans certaines conditions atmosphériques, des structures blanches peuvent apparaître au voisinage du bout des ailes.

Ce phénomène s'explique par :

- ▶ une **forte chute de pression** locale ;
- ▶ une **diminution de température** associée ;
- ▶ la **condensation** de la vapeur d'eau lorsque l'air est proche de la saturation.

Interprétation

La condensation ne crée pas le vortex : elle le rend visible en matérialisant l'écoulement au voisinage du bout d'aile.

Ce que révèle cette condensation

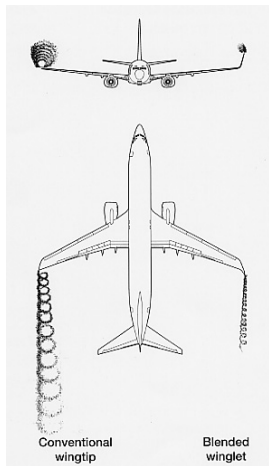


Ces images mettent en évidence le caractère **tridimensionnel** de l'écoulement autour d'une aile réelle.

Au voisinage du saumon (c'est-à-dire du bout d'aile), la différence de pression entre intrados et extrados engendre un mouvement tourbillonnaire : le **vortex marginal**.

- ▶ ce vortex persiste en aval de l'aile ;
- ▶ il constitue une signature de l'écoulement tridimensionnel ;
- ▶ il est associé à une **traînée induite** absente d'un modèle strictement bidimensionnel.

Réduction de la traînée induite : les winglets



- ▶ Les winglets visent à réduire le contournement entre intrados et extrados au voisinage du saumon.
- ▶ Ils contribuent ainsi à limiter la traînée induite.
- ▶ Cet effet concerne l'aile réelle et complète la compréhension fournie par le modèle 2D.

À ne pas confondre : vortex marginaux et traînées de réacteurs



- ▶ Les traînées observées derrière les réacteurs proviennent principalement des gaz d'échappement et des phénomènes de condensation associés.
- ▶ Elles ne doivent pas être confondues avec les vortex marginaux liés à la portance.

Message à transmettre

Deux phénomènes visuellement proches peuvent avoir des origines physiques très différentes.

Plan

Un peu d'histoire

Portance, traînée, incidence

Observation et interprétation des écoulements autour d'un profil

De l'aile bidimensionnelle à l'aile réelle

Exemples : un profil d'aile selon l'usage

Consignes pour le TD

Quelques situations aéronautiques contrastées



Airbus A380



F-35B



Décollage sur piste tremplin

Croisière : recherche d'une faible traînée et d'une bonne finesse

Compromis entre performances aérodynamiques, propulsion et contraintes STOVL

Aide au décollage sur courte distance grâce à une trajectoire initiale ascendante

Malgré la diversité des configurations et des missions, les mêmes notions restent centrales : **portance, traînée, finesse et compromis aérodynamique.**

Plan

Un peu d'histoire

Portance, traînée, incidence

Observation et interprétation des écoulements autour d'un profil

De l'aile bidimensionnelle à l'aile réelle

Exemples : un profil d'aile selon l'usage

Consignes pour le TD

Consignes pour le compte rendu du TD

Ce qui est attendu

Le compte rendu doit proposer une **lecture physique argumentée** des résultats. Il ne s'agit ni d'un journal de bord Fluent, ni d'une succession d'images.

Le rapport devra montrer, en fonction de l'incidence :

- ▶ l'évolution des forces, des coefficients C_x , C_z et de la finesse ;
- ▶ la position du décollement de couche limite sur l'extrados ;
- ▶ la présence éventuelle d'une région transsonique et la position de l'onde de choc ;
- ▶ l'évolution du sillage et des grandeurs liées à la turbulence ;
- ▶ la qualité de convergence des calculs.

Consignes pour le compte rendu du TD (suite)

Méthode de rédaction :

- ▶ numéroter systématiquement les figures et les tableaux ;
- ▶ appeler chaque figure depuis le texte et expliquer ce qu'elle montre ;
- ▶ préciser la grandeur tracée, la gamme de valeurs et les unités ;
- ▶ distinguer clairement les **forces** et les **coefficients** ;
- ▶ relier les observations locales aux évolutions globales de C_x , C_z et de la finesse ;
- ▶ quantifier dès que possible les positions caractéristiques.

Points de vigilance

Ne pas confondre région transsonique et onde de choc, ni recirculation de l'écoulement moyen et turbulence. Le mot « décrochage » doit être employé avec prudence.