

Aéronautique : Étude du phénomène de décrochage dynamique

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Amaury BELLIER-GANIERE

Édité le
26/09/2022

école
normale
supérieure
paris-saclay

Cette ressource est issue d'un travail personnel d'Amaury BELLIER-GANIERE, étudiant en Master 2 Aéronautique et Spatial à CentraleSupélec et élève du département d'enseignement et de recherche (DER) de Génie Mécanique de l'ENS Paris-Saclay. Ce texte a été relu par Luc PASTUR, enseignant chercheur à l'ENSTA Paris.

Cette ressource a pour but de présenter l'étude expérimentale de la dynamique d'oscillations basse-fréquence de profils portants (aile d'avion, foils, etc). Au cours de ce document, toute la démarche expérimentale de recherche sera présentée, ainsi que les principaux résultats obtenus. Cette présente ressource repose sur les travaux de recherche, réalisés sur un an, au cours de mon master 2 en aéronautique et spatial. Ces travaux ont été menés en collaboration avec le laboratoire d'Énergétique Moléculaire et Macroscopique, Combustion (EM2C) et l'ENSTA Paris.

1 – Introduction

1.1 - Contexte

Le décrochage est un phénomène aérodynamique caractérisé par une perte de portance d'un avion ou d'une surface causée par un angle d'incidence trop important (supérieur à l'angle d'incidence critique). Ce phénomène est présent dans de nombreuses configurations d'écoulements, c'est pourquoi il impacte un grand nombre de domaines, notamment dans les véhicules de transport. En effet, par exemple, dans le secteur marin, le décrochage des surfaces portantes immergées d'un voilier (foil, dérives, safrans, ...) a un impact direct sur la manœuvrabilité et le contrôle du bateau.

En aéronautique, le phénomène de décrochage se produit généralement dans les phases où l'incidence de l'avion est maximale, c'est à dire au décollage ou à l'atterrissage mais celui-ci peut également survenir lors des phases de vol de croisière ou encore en virage.

Ce phénomène, lorsqu'il survient, peut alors avoir des effets dévastateurs allant jusqu'au crash de l'avion. En effet, on dénombre plusieurs accidents causés par le décrochage :

- Vol Air France 447 (2009) [4] : décrochage en vol de croisière haute altitude. Celui-ci fut initié par le copilote, trompé par des informations de vitesses erronées dues au givrage des sondes Pitot. Le décrochage a été entretenu jusqu'à l'impact avec la mer sans que les deux pilotes aux commandes ne l'aient détecté (228 morts).
- Vol Turkish Airlines 1951 (2009) : au moment de l'atterrissage, le pilote automatique du Boeing 737 effectue un arrondi en diminuant la vitesse et en levant le nez de l'avion à 500 pieds du sol. L'incidence est alors trop importante et l'avion décroche (9 morts et 117 blessés).
- Plus récemment, le Vol Cubana 972 (2018) : L'avion décroche au décollage à cause d'une montée verticale trop abrupte et trop rapide causant alors une perte de portance (112 morts).



Figure 1 - Image du vol Air France 447 au décollage

1.2 - Présentation du phénomène

Rappel de mécanique des fluides

Considérons un profil d'aile plongé dans un écoulement avec une incidence α . L'écoulement se divise alors en 2 sous écoulements dont l'un évolue sur l'intrados (face supérieure) du profil et l'autre sur l'extrados (face inférieure) du profil. Sur l'extrados, le fluide est accéléré tandis que sur l'intrados, celui-ci est décéléré. En vertu du théorème de Bernoulli, une dépression et une surpression se créent respectivement sur l'extrados et l'intrados créant alors une force appelée résultante aérodynamique, composée de la force de portance et de la traînée. Cette force dépend de plusieurs paramètres : forme du profil, angle d'incidence, propriétés de l'écoulement, etc.

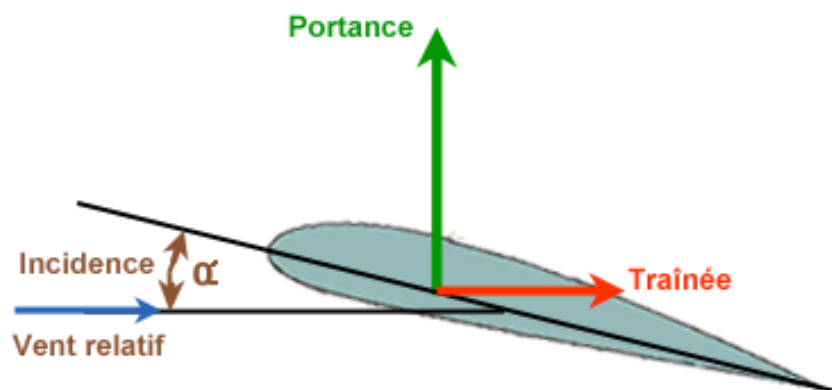


Figure 2 - Profil d'aile plongé dans un écoulement et forces aérodynamiques

La force de portance L peut s'écrire de la manière suivante [3] :

$$L = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_L(\alpha)$$

Avec ρ la masse volumique du fluide, S la surface de référence, V la vitesse de l'écoulement et $C_L(\alpha)$ le coefficient de portance. Ce coefficient dépend de la forme de l'aile mais aussi de son incidence α (aussi appelé parfois angle d'attaque). Pour un profil d'aile donné, il est possible de tracer le graphe de C_L en fonction de l'incidence α .

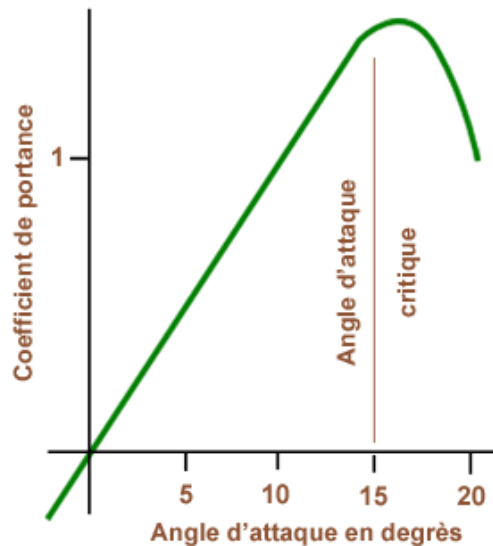


Figure 3 - Forme du graphe $C_L = f(\alpha)$

Mise en évidence du phénomène

Considérons alors un profil d'aile plongé dans un écoulement à angle d'incidence α nul (voir Figure 3). Lorsqu'on augmente cet angle, le coefficient de portance augmente également, de manière linéaire : on dit alors que l'écoulement est accroché au profil. Si l'on continue d'augmenter cet angle, le coefficient de portance continue d'augmenter linéairement jusqu'à une valeur critique α_c . Passé cet angle, le coefficient de portance, et donc la portance, chute brutalement : cela est généralement associé à un écoulement décollé du profil. **Ce changement brutal de conditions aérodynamiques est appelé décrochage.** Les figures ci-dessous, prises de la base de données de l'ONERA, montrent la typologie de l'écoulement avant et après décrochage d'un profil d'aile.

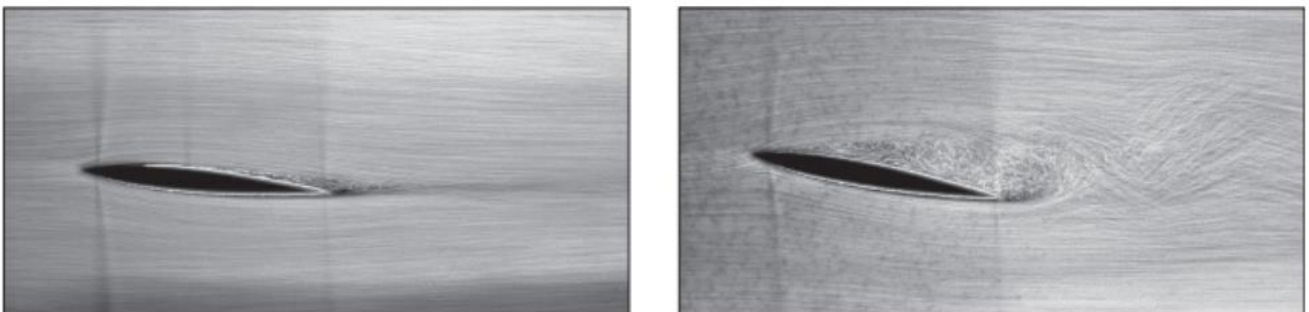


Figure 4 - Typologie de l'écoulement avant (à gauche) et après (à droite) décrochage

1.3 - Mécanisme du décrochage

Considérons un profil plongé dans un écoulement et intéressons-nous à la circulation du fluide sur l'extrados de ce profil (voir Figure 5) [1] [2]. Entre A et B, le fluide est massivement accéléré, à cause de l'augmentation de l'épaisseur du profil. La pression statique diminue alors créant un gradient de pression négatif, dit gradient de pression favorable. Dans cette zone, la couche limite est alors massivement accrochée au profil. Passé le point d'épaisseur maximal B, l'écoulement est décéléré, la pression statique diminue et le gradient de pression résultant devient donc positif. Il est appelé gradient de pression adverse. Si ce gradient de pression adverse devient trop important, il peut alors renverser la direction de l'écoulement dans la couche limite (point E). Cette zone est appelée zone de recirculation. La couche limite est alors totalement décrochée du profil. Le point où l'écoulement commence à se renverser est appelé point de séparation (point D). Il apparaît alors clairement que le décollement de la couche limite joue un rôle majeur dans le phénomène de

décrochage. Notons par ailleurs que l'augmentation de l'angle d'attaque du profil a une incidence directe sur la force du gradient de pression adverse qui est à l'origine de ce décollement.

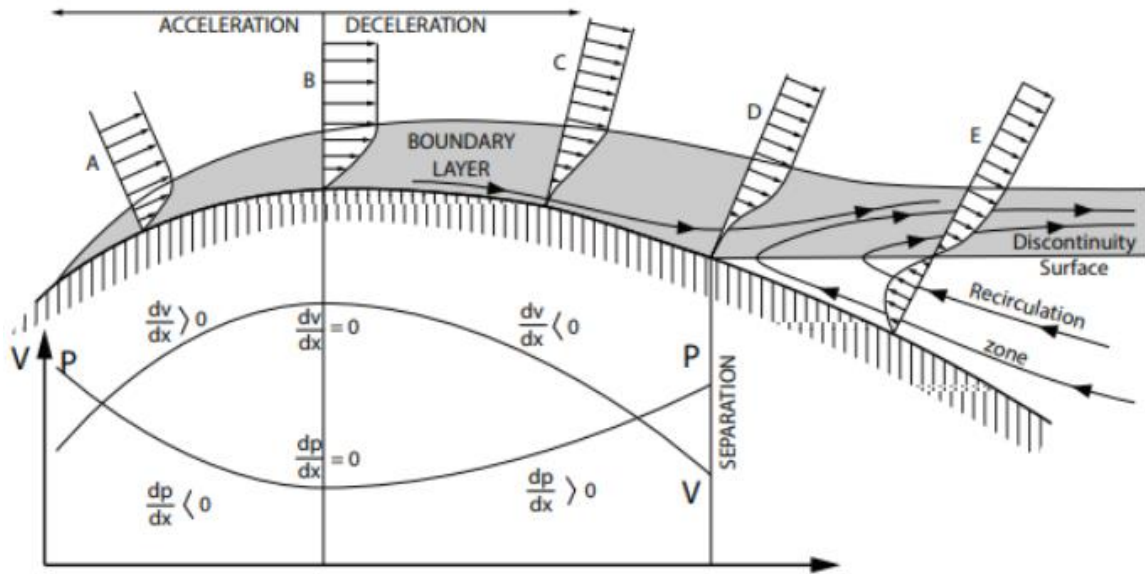


Figure 5 - Schéma de décollement de la couche limite sur un profil d'aile

2 – Dispositif expérimental

La partie précédente présente les bases pour comprendre les phénomènes physiques mis en jeu au moment du décrochage, et montre les enjeux liés à ce phénomène. L'objectif est donc d'avoir une meilleure compréhension de ce phénomène, dans sa globalité afin de mieux l'appréhender. Notre approche expérimentale vise à étudier le phénomène d'oscillations basse fréquence de la force de portance observée à la limite du décrochage.

Le dispositif expérimental retenu pour l'étude est présenté ci-après.

2.1 - Profil utilisé

Le modèle utilisé est un profil NACA0012 qui a été produit par impression 3D. Ses dimensions sont une longueur de corde = 200 mm et une longueur de l'aile = 200 mm. Il est incliné avec un angle d'attaque $\alpha = 20.6 \pm 0.5$ deg. Cet angle est déterminé à partir d'études préliminaires, que nous détaillerons rapidement dans la section 3.

Les deux zéros du code 0012 nous indiquent qu'il s'agit d'un profil symétrique. Les 12 définissent l'épaisseur maximale à 12% de la corde. Et comme il s'agit d'un profil NACA codé à 4 chiffres, nous savons également que l'emplacement du maximum d'épaisseur est à 30% de la corde. Ainsi, le schéma du profil NACA0012 est comme indiqué dans la figure suivante.

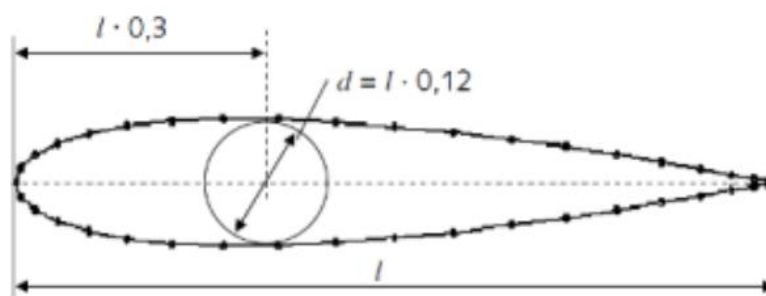


Figure 6 - Profil NACA 0012

Soufflerie

Les expériences sont effectuées dans une soufflerie ouverte ABB Solyvent-Ventec, pilotée en tours par min (tr/min) avec une vitesse d'écoulement maximale de 45 m/s et un maximum de 1450 tr/min.

Le tunnel a un espace quadratique de 50 cm de côté pour poser le modèle. Comme cela a été vérifié, la vitesse d'écoulement dans la soufflerie est constante sur tout le carré jusqu'à 3 cm de distance des murs. Les effets de couche limite n'affectent pas la vitesse d'écoulement.

2.2 - Balance aérodynamique

La balance aérodynamique comporte trois capteurs :

- Capteur de portance : FGP Instrumentation force accélération pression Type FN 3148 N°647
Plage de mesure 10 daN.
- Capteur de traînée : FGP Instrumentation force accélération pression Type FN 3148 N°647
Plage de mesure 10 daN.
- Capteur de moment : FGP Instrumentation force accélération pression Type FN 3148 N°647
Plage de mesure 5 daN.

La variation de l'angle d'attaque se fait par l'intermédiaire d'un rapporteur intégré. Le profil d'aile est fixé à trois positions, correspondant aux trois capteurs d'effort énoncés ci-dessus.

2.3 - Matériel pour analyse PIV

Afin de mener une analyse PIV (Vélocimétrie par Images de Particules), nous utiliserons un laser continu (18 W) et une caméra rapide. Les champs de vitesse ont été obtenus avec un laser Nd :YAG 2x65 mJ / 532 nm / 8 ns et une caméra Dantec FlowSense 2048 x 2048 pixels / 12 bits (voir Figure 7).

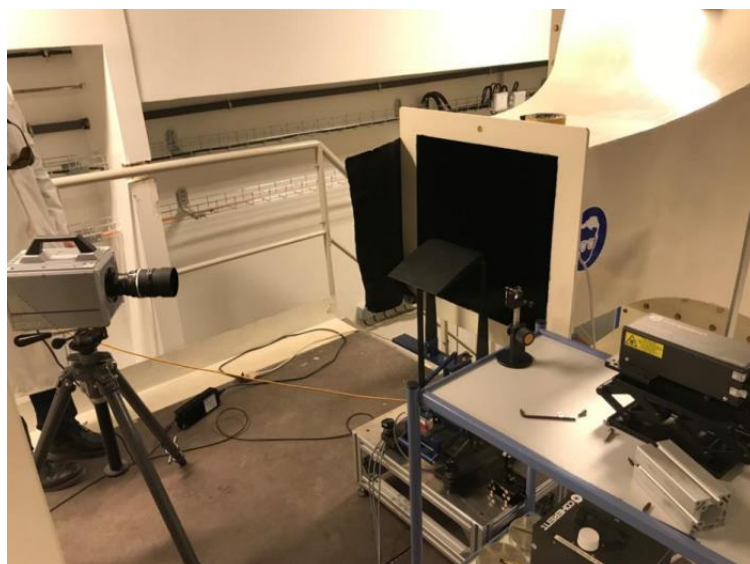


Figure 7 - Dispositif expérimental

3 – Résultats

3.1 - Visualisation du décrochage

Afin de pouvoir fixer l'angle d'incidence de l'aile à la limite de décrochage, il convient de déterminer dans un premier temps l'angle α avec lequel incliner notre profil. Pour cela, nous allons

fixer dans un premier temps le nombre de Reynolds Re à 300 000. Ensuite, nous traçons le graphe $C_L = f(\alpha)$ afin de déterminer à partir de quel angle le coefficient C_L chute. On obtient alors le graphe suivant :

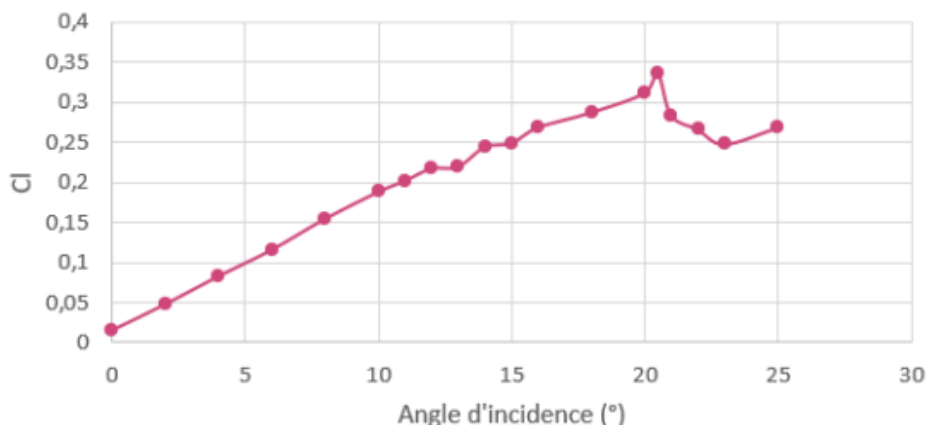


Figure 8 - Détermination de l'angle de décrochage

Le décrochage se produit donc pour un angle $\alpha_c = 20.6 \pm 0.5$ deg et on retrouve la valeur annoncée dans la section 2.1. En revanche, dans la littérature, on retrouve plutôt des valeurs de l'ordre de 11-12°. Une explication peut être la présence de tourbillons en bout d'aile, qui influent sur le phénomène de décrochage. Ceux-ci proviennent de la tridimensionnalité du profil considéré dans l'étude, tandis que la littérature étudie d'avantage des profils 2D.

Une fois l'angle de décrochage trouvé il s'agit d'observer physiquement le phénomène. Pour cela nous allons procéder à une étude PIV dans le but de visualiser l'écoulement moyen associés aux états accroché et décroché. L'idée sera ensuite de visualiser la dynamique de décrochage.

Le protocole est alors le suivant. Connaissant l'angle de décrochage α_c à un nombre de $Re = 300\ 000$, nous allons nous fixer dans ces conditions d'expériences. Pour chaque image PIV obtenue, nous allons alors associer le coefficient de portance C_L correspondant. Lorsque le coefficient chutera brutalement, nous pourrons donc facilement repérer les images intéressantes associées à la transition.

Nous obtenons les résultats suivants :

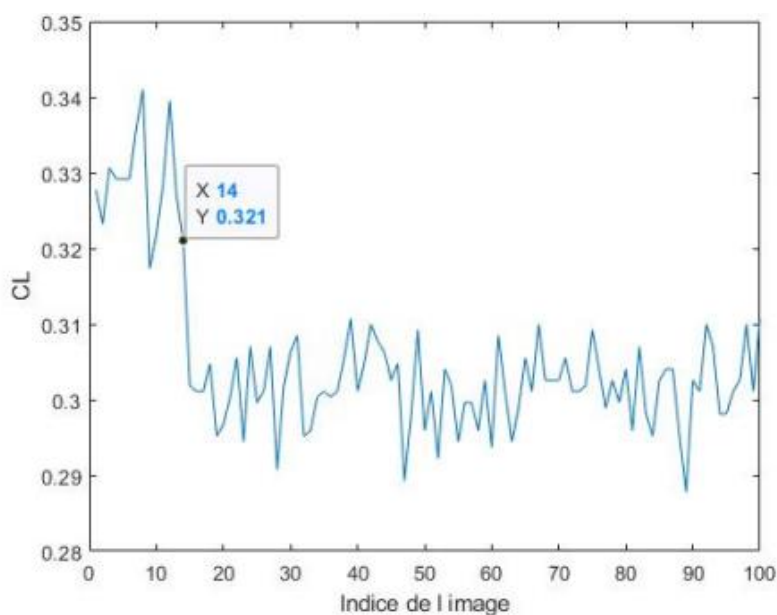


Figure 9 - Corrélation C_L - Images caméra

On remarque alors que le décrochage survient à la 14e image récupérée. Afin de visualiser le phénomène physique, nous nous concentrons alors sur les images 11 à 18, présentées ci-dessous.

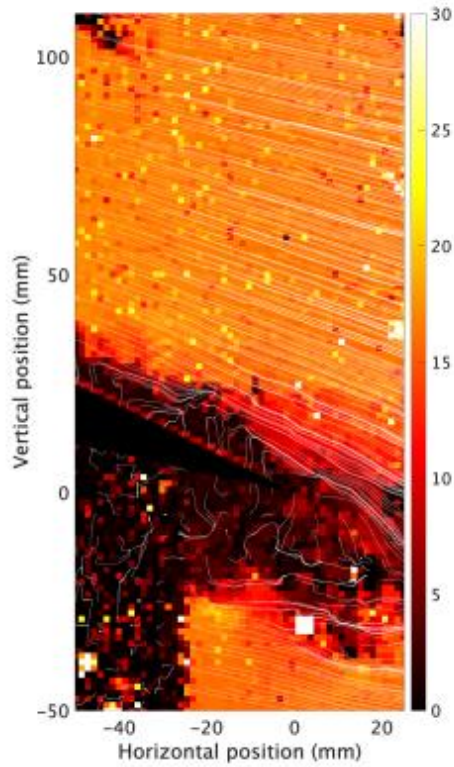


Image 11

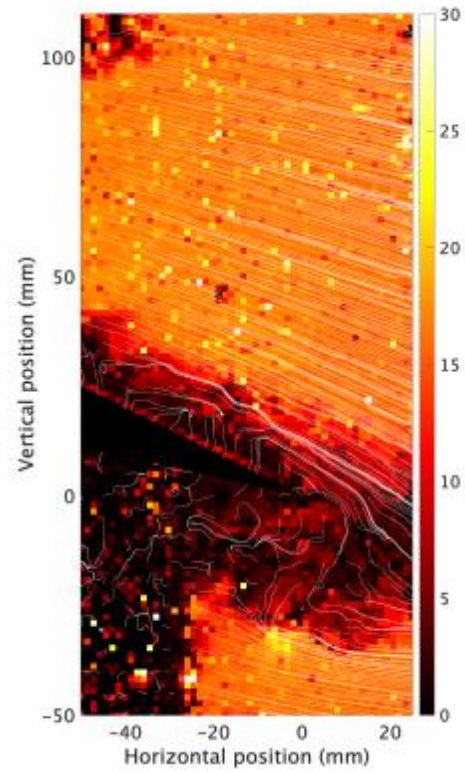


Image 12

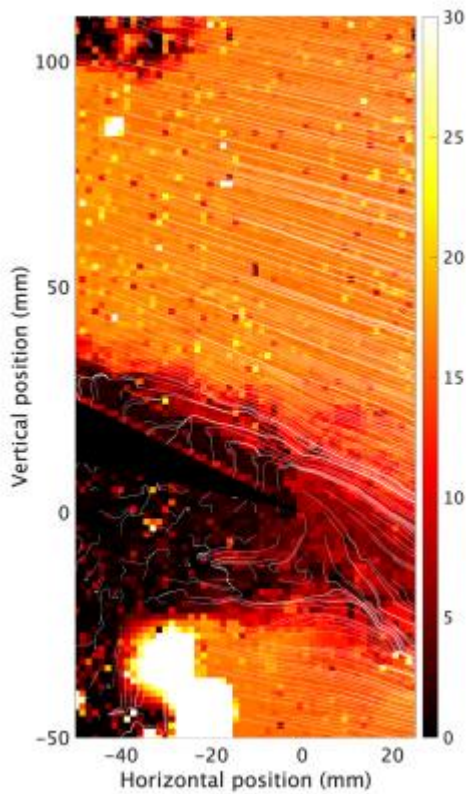


Image 13

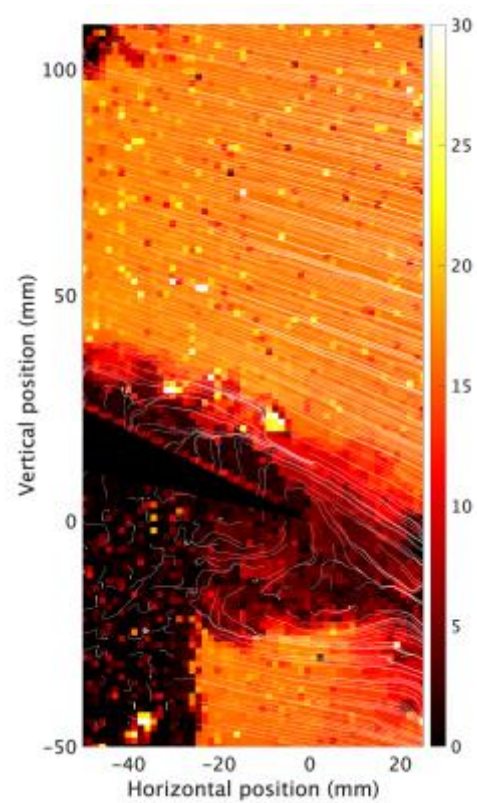


Image 14

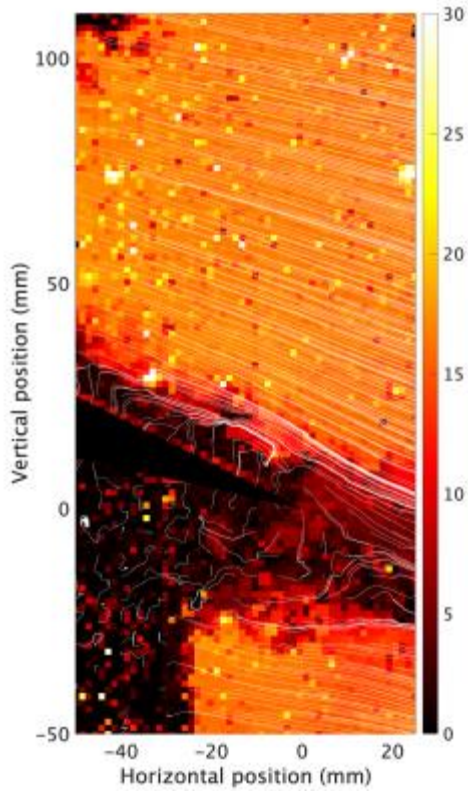


Image 15

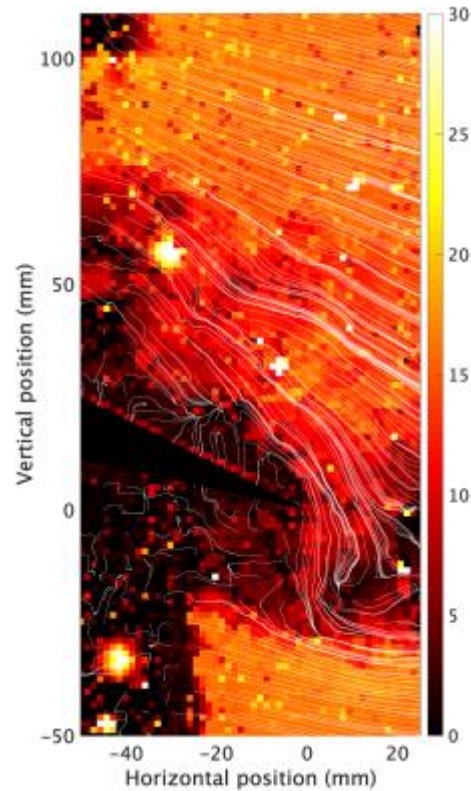


Image 16

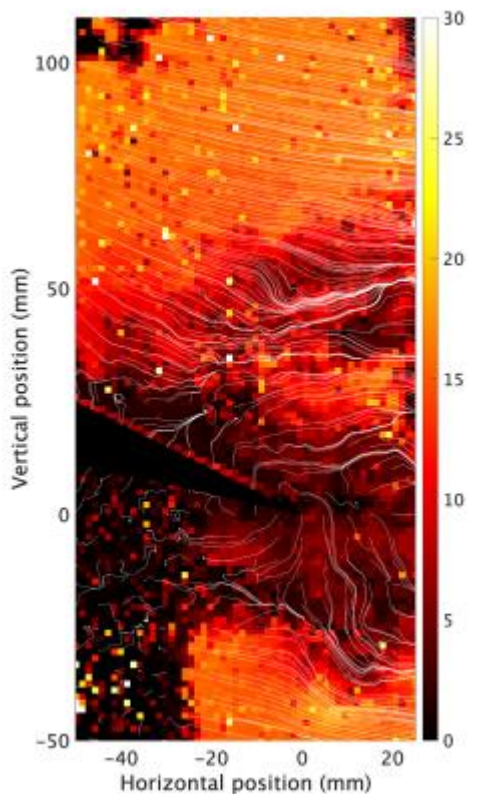


Image 17

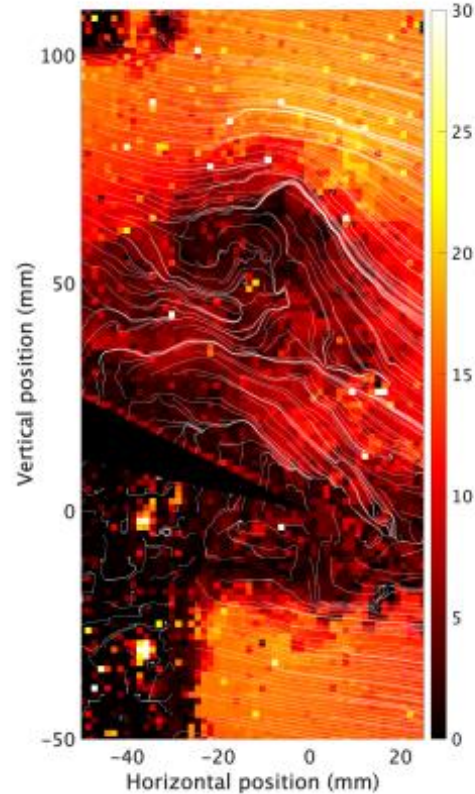


Image 18

Tout d'abord, on remarque bien que la portance est effectivement corrélée avec la nature de l'écoulement. En effet, les images 11 à 15 sont associées à un état accroché. Or, on retrouve bien un écoulement laminaire et effectivement collé au profil. À l'inverse, pour l'état de faible portance, associé aux images 16 à 18, c'est bien un écoulement très turbulent et massivement décollé du profil d'aile qui est observé. En revanche, la transition qui semblait se produire à partir

de l'image 14 sur la Figure 9 semble en réalité se produire à partir de l'image 15. Le décrochage aurait donc lieu entre les images 15 et 16. Une explication peut être une mauvaise concordance d'indice au niveau des images ou encore éventuellement un problème de précision de l'horloge de synchronisation.

Concernant l'étude du champ de vitesse, on remarque que l'écoulement est massivement décéléré au-dessus de l'aile mais également en aval de celle-ci dans l'état décroché. En effet, la forte intensité de turbulence présente dans un tel état parvient à ralentir fortement l'écoulement. L'étude des lignes de courant montre alors que des tourbillons se dessinent (image 18 notamment). Cette même image montre clairement qu'un tourbillon se produit quasiment 5 cm au-dessus du bord de fuite de l'aile. À l'inverse, pour l'état accroché, le régime est effectivement beaucoup plus laminaire. La vitesse est bien plus uniforme (exceptée proche de la paroi à cause des phénomènes de couche limite), les lignes de courant sont alignées et aucun tourbillon ou autres singularités ne sont observés.

En ce qui concerne la dynamique mise en jeu au moment où le phénomène de décrochage apparaît, il est beaucoup plus compliqué de tirer des conclusions. En effet, celle-ci semble se produire entre les images 15 et 16, et donc nous n'avons que les images associées aux instants précédant et suivant ce phénomène. De plus, l'étude ici ne se fonde que sur une seule mesure, il faudrait donc confirmer les conclusions sur un nombre de mesure plus important. Néanmoins, il est quand même possible de faire un postulat. Comme expliqué précédemment, dans les instants précédant le décrochage, l'écoulement semble laminaire mais nous pouvons néanmoins remarquer, par l'étude du champ de vitesse, que l'écoulement apparaît décroché sur une petite longueur remontant le bord de fuite. Un gradient de pression adverse existe donc déjà au bord de fuite de l'aile. Lorsque celui-ci devient assez puissant, il renverse totalement l'écoulement et le profil décroche. En effet, entre les images 15 et 16 l'écoulement semble se renverser vers la gauche avant d'être rabattu vers la droite sur l'image 17. La dynamique de décrochage semble donc être un renversement de l'écoulement du bord de fuite jusqu'au bord d'attaque, grâce à un gradient de pression suffisamment important. Afin de confirmer cette hypothèse, de futurs travaux pourraient consister à l'utilisation d'une caméra ultra rapide, prenant un grand nombre d'images par seconde, pour capter plus en détail toute la dynamique, et notamment détecter l'élément qui pourrait être l'amorce du phénomène de décrochage.

3.2 - Mise en évidence du phénomène de décrochage dynamique

L'idée à présent est de mettre en évidence un phénomène nouveau qui n'avait pas été observé jusqu'alors : la dynamique bi-stable (basse-fréquence) de la portance. Pour cela, l'approche, va légèrement changer par rapport à ce qui a été fait précédemment.

Protocole

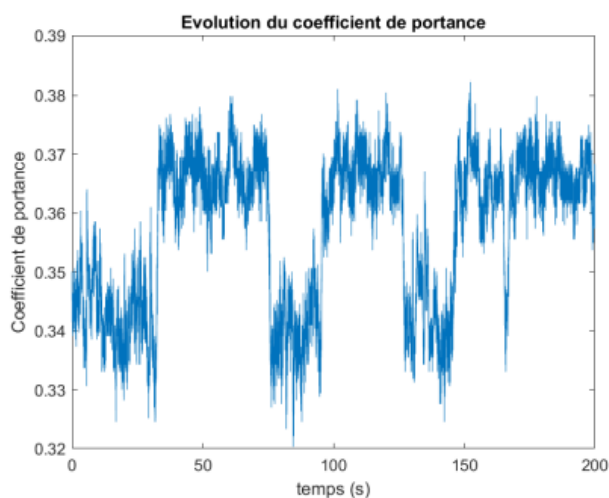
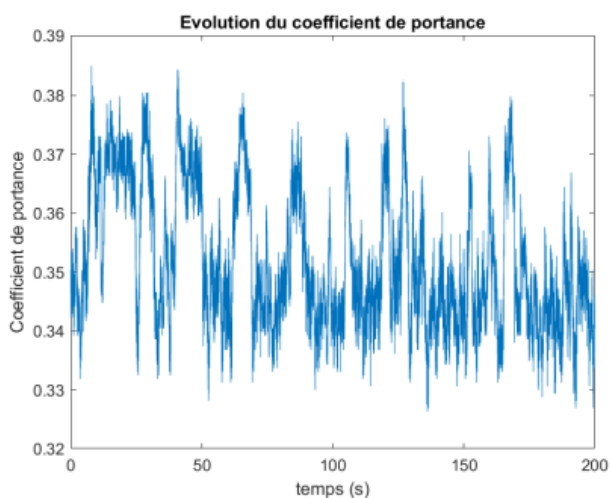
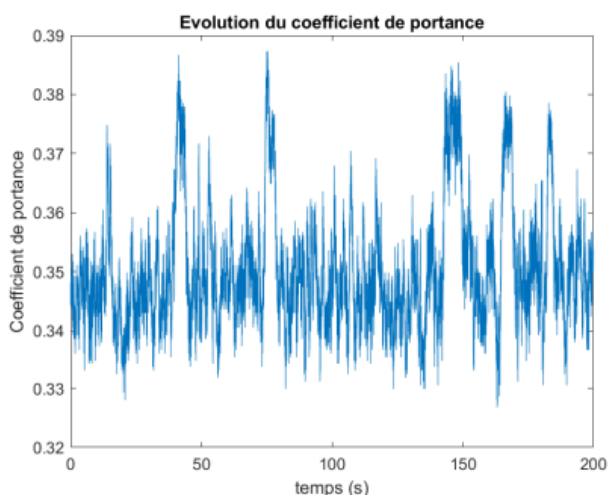
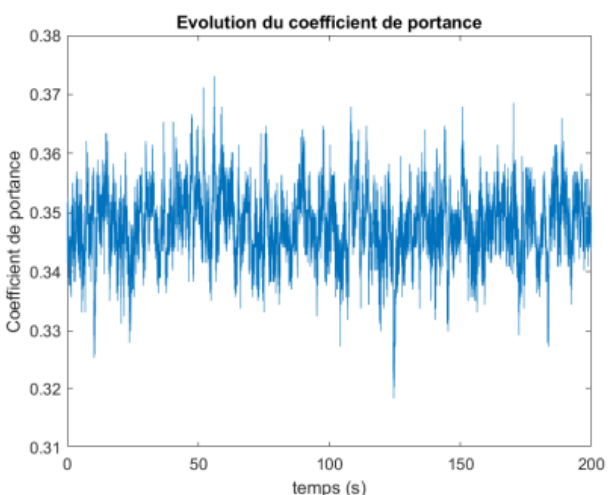
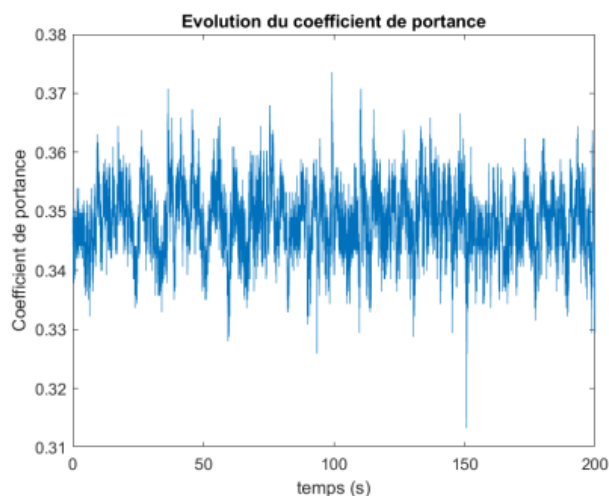
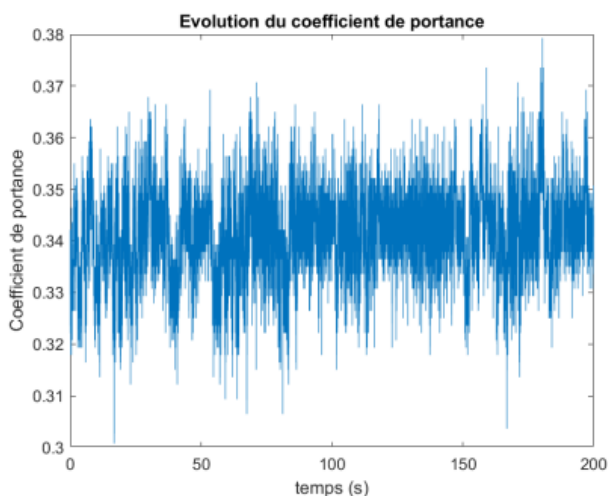
Comme nous l'avons vu, il apparaît que l'angle de décrochage se situe à environ $20,5^\circ$. En effet, des études amont ont montré que pour des Re allant de 300 000 à 430 000 l'angle de décrochage ne varie quasiment pas, restant égal à $20,5^\circ$ (notons ici néanmoins que ce résultat est intrigant, et une explication pourrait provenir du caractère 3D de l'écoulement, dominé par les 2 tourbillons de bout d'aile). Même pour $Re = 160\ 000$, celui-ci se situe à environ $19,5^\circ$ ce qui reste très proche de cette valeur. L'idée retenue est alors de conserver l'angle fixé à $20,5^\circ$ et d'essayer de capter des décrochages mais cette fois en faisant varier le nombre de Reynolds (à travers la vitesse de rotation de la soufflerie).

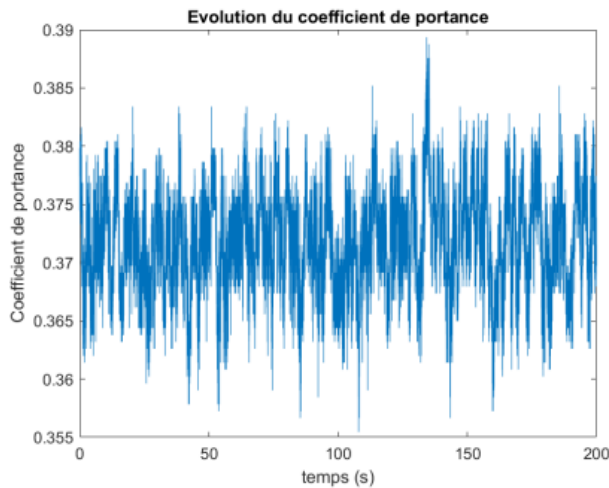
Le protocole est donc le suivant : pour des nombres de Reynolds allant de 175 000 (équivalent à une vitesse de rotation de la soufflerie de 441 tr/min) à 300 000 (680 tr/min), on mesure pour chaque

Reynolds retenu, la valeur de la portance sur un temps long (200 s). On rappelle qu'au cours de ces différentes mesures, l'angle d'incidence ne change pas et reste fixé à $20,5^\circ$.

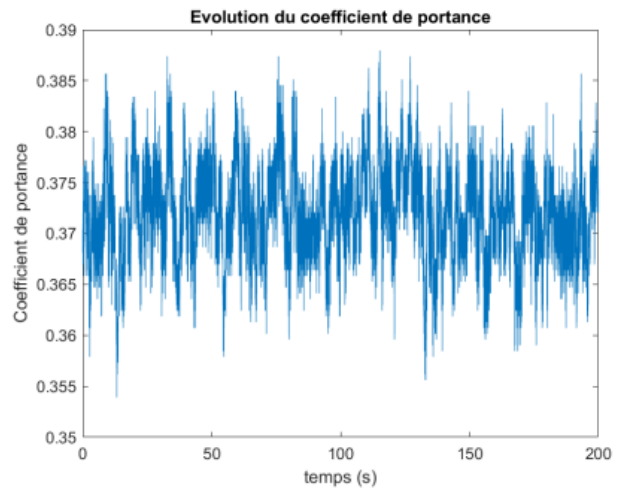
Courbes

Les courbes obtenues sont alors les suivantes :





Re = 272 955 (665 tr/min)



Re = 279 435 (680 tr/min)

On remarque alors que lorsqu'on s'approche de 658 tr/min (soit $Re = 269\,931$), il apparaît sur les courbes des pics bien distincts, de plus en plus nombreux et de moins en moins brefs. Ces pics traduisent des variations de portances au cours du temps. On arrive alors petit à petit à discerner deux états bien distincts de valeur de portances hautes et basses. Les valeurs basses correspondent au moment où l'écoulement est décroché du profil tandis que les valeurs hautes correspondent à un écoulement attaché. Entre ces deux états, on distingue alors des variations soudaines de portance. Le passage d'un état bas à un état haut correspond à un phénomène de raccrochage de l'écoulement tandis que le passage d'un état haut à un état bas est synonyme de décrochage. Notons d'ailleurs ici que ces événements sont assez fréquents et pas forcément brefs. Toujours pour $Re = 269\,931$, nous pouvons également remarquer que le décrochage semble toujours soudain tandis que le raccrochage peut parfois être plus long et s'étendre sur quelques secondes, comme le montre le raccrochage se situant entre 140s et 160s.

Ces variations soudaines d'augmentation et de diminution de portance témoignent alors d'une véritable dynamique de l'écoulement, même si le système est dans un état statique. En effet, lorsque l'écoulement est décroché, sa dynamique peut le faire raccrocher au profil et réciproquement. Pour les vitesses de rotation comprises entre 441 tr/min et 654 tr/min, on remarque que l'état le plus stable, c'est à dire celui dans lequel le système va rester le plus longtemps, est l'état décroché. En effet, sur les courbes $C_L = f(\alpha)$ obtenues dans la partie précédente, nous avons vu que l'angle de décrochage était de l'ordre de $19,5^\circ$ pour des Reynolds inférieur à 300 000. Ainsi, dans notre cas, l'angle retenu de $20,5^\circ$ est supérieur à $19,5^\circ$ l'écoulement est donc censé être décroché dans cette configuration, ce qui conforte bien nos observations. En revanche, pour 658 tr/min, la courbe semble alors parfaitement bistable, avec des temps d'états quasi égaux. Enfin, on remarque que passé la valeur de 658 tr/min, on ne distingue plus aucun événement distinctif, l'écoulement est alors massivement accroché au profil et la dynamique semble alors parfaitement stable. Il en va de même pour les faibles vitesses de rotation, il n'y a pas de variations soudaines de portance. Celle-ci reste proche de sa valeur moyenne avec néanmoins certaines fluctuations, parfois de plus grandes amplitudes que l'état accroché. En revanche, pour ces faibles valeurs de rotation l'état parfaitement stable est l'état décroché.

Approche statistique et probabiliste

À partir des courbes obtenues dans la section précédente, il est alors possible de mener des études statistiques et probabilistes autour du décrochage, afin de visualiser les tendances de l'écoulement.

L'objectif de cette étude est de connaître, avec le plus de précision possible, le nombre de Reynolds où les fluctuations, et donc la dynamique de décrochage, est la plus riche.

Dans un premier temps, on se concentre sur une étude statistique. En effet, au vu des graphes précédents, nous pouvons relever la portance moyenne ainsi que l'écart type associé, et ce pour chacune des vitesses de rotation. On trace alors la courbe suivante :

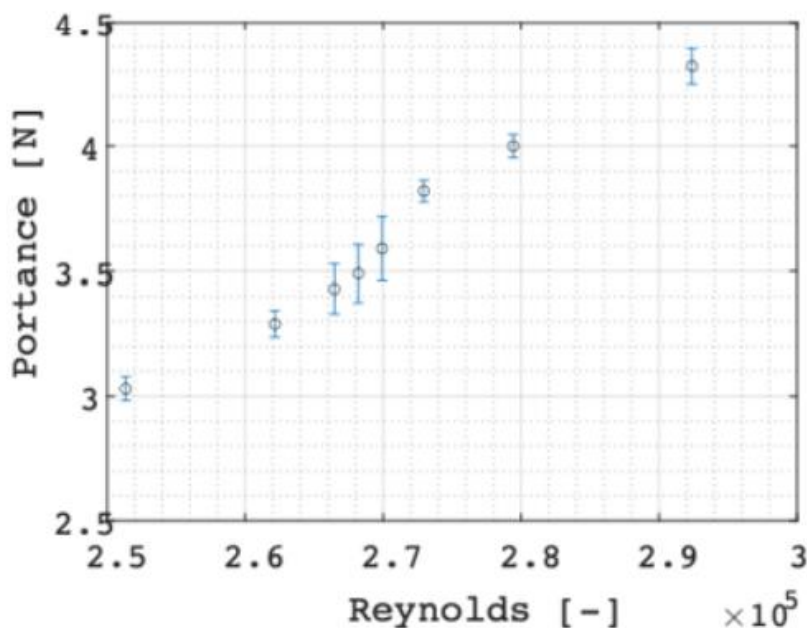
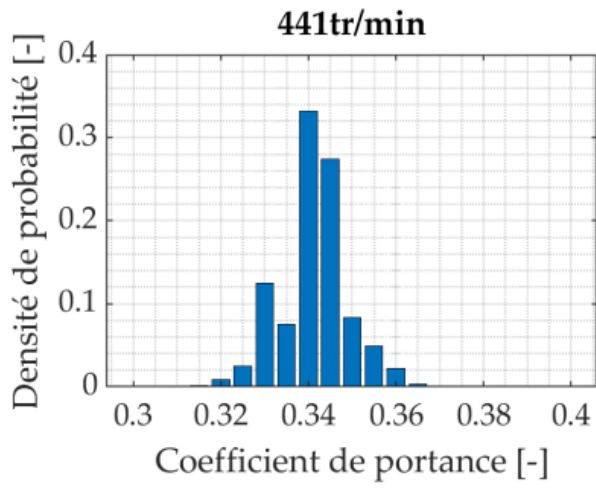


Figure 10 - Évolution de la portance moyenne en fonction du Re

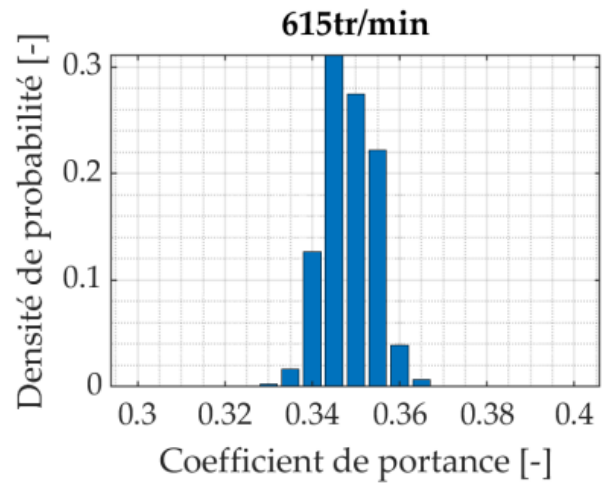
On remarque alors que la portance moyenne a tendance à croître, de manière quasiment linéaire, lorsque le nombre de Reynolds augmente. En effet, on rappelle que pour de petits nombres de Reynolds, l'écoulement est massivement décroché au vu de l'angle fixé de $20,5^\circ$. Pour ces petits Re, l'écoulement n'est pas assez fort pour vaincre le gradient de pression adverse élevé, généré par cet angle d'attaque important. La portance est alors assez faible. Au fur et à mesure que le Reynolds augmente, l'écoulement gagne en vitesse (et donc en force) pour arriver petit à petit à vaincre le gradient de pression adverse, et ce dans une certaine dynamique (cf. pics sur les courbes précédentes). La force de portance augmente donc alors le Re. Enfin, pour de grandes valeurs du nombre de Reynolds, l'écoulement est alors suffisamment rapide pour vaincre totalement le gradient de pression adverse et recoller complètement au profil d'aile (absence de pics dans les dernières courbes). La force de portance continue alors d'augmenter avec le Re.

En ce qui concerne l'écart type, on remarque que celui-ci augmente avec le nombre de Reynolds jusqu'à atteindre un maximum puis diminue. La variable écart type mesurant la dispersion des valeurs d'un échantillon statistique, il apparaît alors clairement qu'un grand écart type témoigne de grandes fluctuations de portance. Le phénomène de décrochage se produit donc en majorité pour un nombre de Reynolds $Re = 2,7 \cdot 10^5$, soit 658 tr/min.

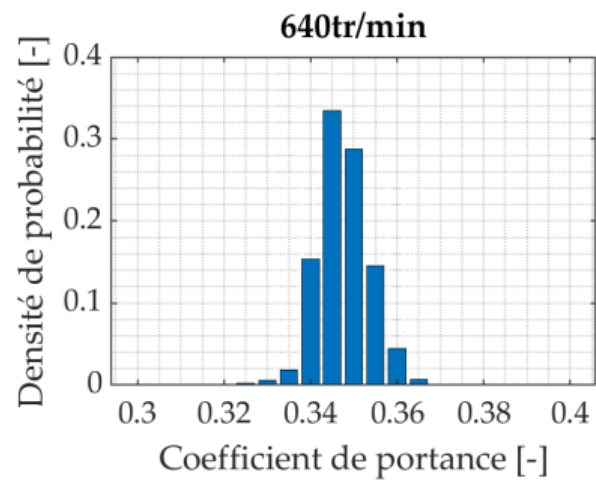
En complément de cette étude statistique, nous pouvons mener une étude probabiliste afin de mesurer la probabilité de se trouver dans un état accroché ou décroché selon le nombre de Reynolds considéré. Pour cela, on trace la densité de probabilité du coefficient de portance pour chacun des Re considéré. On obtient alors les courbes suivantes :



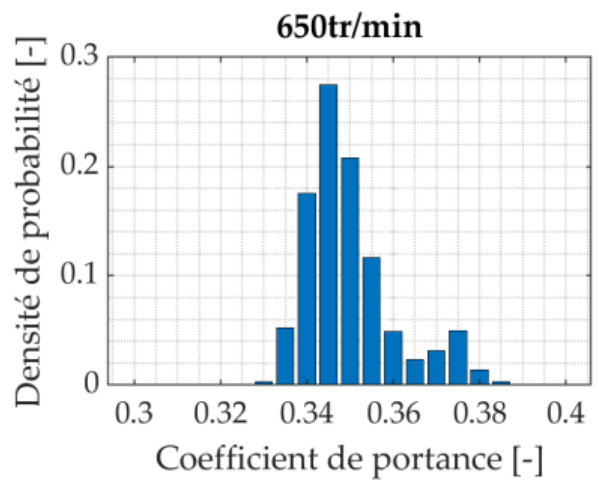
(a)



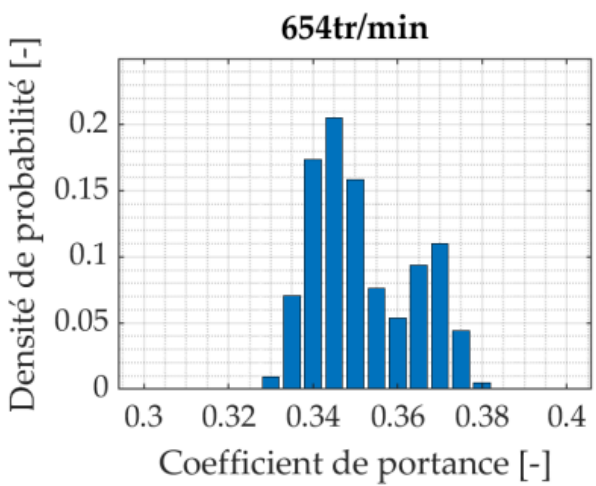
(b)



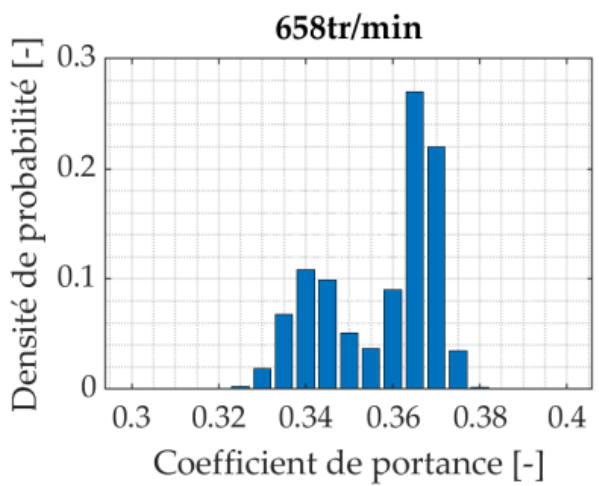
(c)



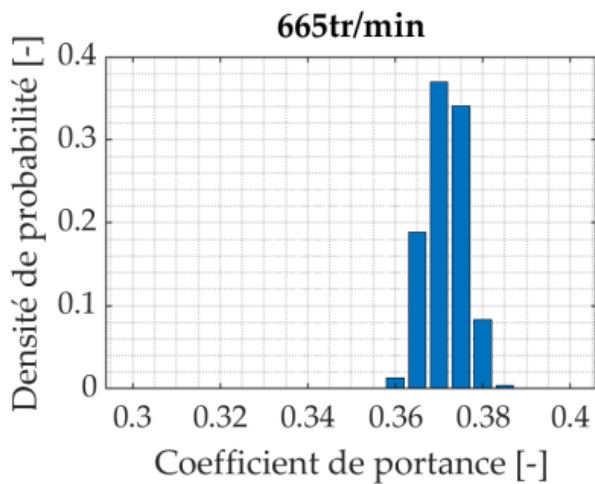
(d)



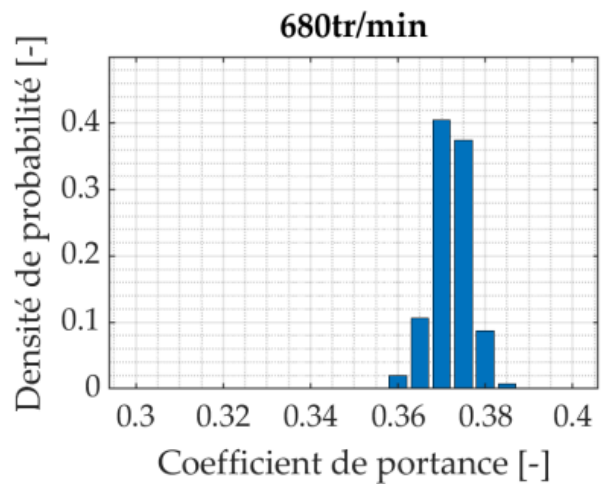
(e)



(f)



(g)



(h)

On remarque alors que pour de petits nombres de Reynolds (Figures (a), (b) et (c)), la densité de probabilité prend la forme d'une distribution mono-modale, avec comme valeur centrale la moyenne du coefficient de portance. L'état décroché est donc l'état le plus probable, et même le seul état dans lequel le profil d'aile peut se trouver pour ces valeurs de Re . Lorsque Re augmente, on constate alors l'apparition d'une seconde bosse, qui vient se juxtaposer à la première. Cette seconde distribution mono-modale marque l'apparition d'un second état, l'état accroché. Néanmoins, la probabilité de se trouver dans ce second état reste faible et l'état le plus probable reste bien l'état décroché. Cette tendance s'inverse entre $Re = 268\,203$ et $Re = 269\,931$ (soit entre 654 tr/min et 658 tr/min - Figures (e) et (f)), et l'état le plus probable devient alors l'état accroché. Notons alors qu'entre ces deux Re , il existe un état où les situations d'écoulement accroché et décroché sont équiprobables. Enfin, lorsque Re continue d'augmenter, on ne se retrouve plus qu'avec une seule gaussienne correspondant à celle de l'état accroché, qui est alors le seul état dans lequel peut se trouver le profil d'aile (Figures (g) et (h)).

Cette étude probabiliste confirme bien toutes les observations exposées jusqu'à présent, notamment en termes de stabilité d'un état par rapport à l'autre. En effet, cette stabilité est directement corrélée avec la probabilité du système de se trouver dans tel ou tel état. Par exemple, si la probabilité de se trouver dans l'état décroché est faible, cela signifie que le système ne parvient pas rester dans cet état et donc que celui-ci n'est pas stable.

3.3 - Ouverture

L'étude de thèse en cours sur un profil bi-dimensionnel sur lequel le tourbillon de bout d'aile a un impact mineur, avec une précision sur l'angle d'attaque de 0.01° , confirme les résultats présentés dans cette ressource, à savoir qu'il existe un régime dynamique bi-stable au-delà d'un Re critique. Les angles critiques sont plutôt autour de 10° , comme attendu pour des profils 2D. L'étude à EM2C démontre que le phénomène est robuste au passage d'une configuration 2D à 3D.

4 – Conclusion

Cette ressource présente une étude expérimentale de la dynamique du décrochage d'un profil NACA0012. Dans un premier temps, grâce à une méthode PIV, nous avons pu observer physiquement ce qu'il se passe au moment du décrochage en visualisant directement l'écoulement. Dans un second temps, nous avons pu mettre en évidence le phénomène de décrochage dynamique. Cette étude montre comment l'écoulement peut subir une succession de raccrochages et décrochages. L'étude probabiliste et statistique menée a permis de montrer qu'il existe un état bistable ou les

probabilités d'être accroché ou décroché sont équivalentes. Ces travaux peuvent alors servir de base pour des études futures de ce phénomène. Une thèse est d'ailleurs en cours à l'ENSTA Paris pour approfondir ce phénomène et développer une meilleure compréhension de celui-ci.

Références :

[1]: Denis Busquet, Study of a high Reynolds number flowaround a two dimensional airfoil at stall; an approach coupling a RANS framework and bifurcation theory, Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique Paris préparée à l'École Polytechnique.

[2]: P. Chassaing. Turbulence en mécanique des fluides. Cepadues-Editions, 2000

[3]: Portance (aérodynamique), consulté en mai 2022, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Portance_\(a%C3%A9rodynamique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Portance_(a%C3%A9rodynamique))

[4]: Vol Air France 447, consulté en mai 2022, https://fr.wikipedia.org/wiki/Vol_Air_France_447