

MF208: Acoustique. Devoir Maison n°2

Gauthier Jary

15 mai 2023

***Remarque :** Pour réaliser ce DM, nous nous servirons et nous appuierons sur les figures de l'article de Raus et coll. [2021], sur le cours dispensé par M. COTTE, et sur le code et les figures issues du programme joint au rendu (programme Matlab).*

Introduction

Nous travaillerons autour d'un article de chercheurs de Centrale Lyon et l'Institut Polytechnique de Paris. Il s'attache à étudier l'impact de la géométrie d'une aile sur la génération acoustique. Les notions du cours de MF208 Aeroacoustique seront donc utiles pour apporter un éclairage sur la compréhension de ce travail, mais aussi pour l'interprétation des données. En effet, le DM s'articule autour des données expérimentales réalisées par les chercheurs. Une démarche de traitement du signal sera donc nécessaire.

L'analyse de signal est primordiale pour bien mettre en valeur des données et en tirer une interprétation correcte. Ce DM est l'occasion d'utiliser plusieurs techniques autour de l'analyse de signaux acoustiques. Nous aurons donc à réaliser des spectrogrammes, des niveaux DSP ou encore des OASPL et les notions de fréquences d'échantillonnage ou encore de fenêtrage seront largement utilisées.

Table des matières

1	Analyse d'article	2
2	Analyse des mesures de bruit de profil réalisées dans la soufflerie anéchoïque de l'Ecole Centrale de Lyon	5
2.1	Analyse des mesures en régime statique (angles d'attaque fixes)	5
2.2	Analyse des mesures en régime dynamique (profil en oscillation de tangage)	6



1 Analyse d'article

1)

Les profils utilisés sont le NACA63₃418 et le NACA0012. Ces profils sont standardisés par le Comité consultatif national pour l'aéronautique des Etats-Unis. Leur notation définit leur forme : le premier chiffre définit ainsi la cambrure maximale en pourcentage de la corde, le deuxième chiffre caractérise le point de cambrure maximale par rapport au bord d'attaque en pourcentage de la corde et les deux derniers chiffres s'attachent à l'épaisseur maximale du profil en pourcentage de la corde. Les deux profils ont donc une géométrie différente qui permet d'obtenir des résultats différents. On retrouve ainsi en Fig.1 un profil NACA63₃418 plus cambré que l'autre aile utilisée.

On peut remarquer que le second profil n'est pas symétrique et présente une légère courbure sur sa partie intrados.

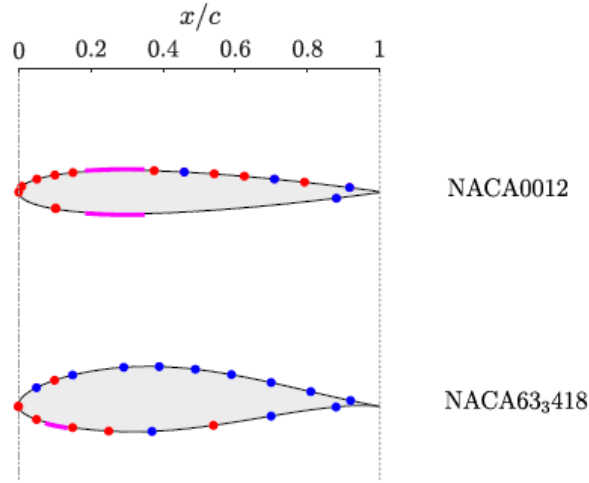


FIGURE 1 – Les deux profils utilisés par les chercheurs dans l'article. On retrouve en haut le profil NACA0012 et en bas le profil NACA63₃418

Les chercheurs ont utilisés deux types différents pour étudier l'impact de la géométrie sur les aspects acoustiques. Le profil NACA0012 est utilisé en tant que témoin car avait déjà été utilisé dans une autre expérience avec le même setup expérimental. L'aile NACA63₃418 est utilisée car sa plus grande cambrure permet d'augmenter plus fortement l'angle d'attaque sans avoir décrochement de la couche limite de manière abrupte. On peut donc étudier le décrochement de la couche limite plus finement car celle-ci se pilote mieux sur ce (c'est d'ailleurs un des buts de l'article). Il est reconnu dans son utilisation dans les éoliennes pour éviter un décrochement brutal qui entraîne normalement des vibrations des pâles, ce qui a justifié son emploi ici par les chercheurs de Centrale Lyon.

2)

Le taux de tangage réduit a été utilisé par d'autres chercheurs sur une expérience similaire, ce qui amène ici les chercheurs de l'article à procéder de manière analogue pour garder une cohérence et comparer. Ainsi, on peut exprimer le reduce pitch rate comme :

$$k_* = \alpha_1 k = \frac{\pi f_0 c}{U}$$

Où on a la vitesse du jet $U = 50$ m/s, l'amplitude de variation d'angle d'attaque $\alpha_1 = 15^\circ$, la longueur de corde $c = 12$ cm et f_0 la fréquence d'oscillation.

Pour avoir $k_* < 0,01$, cela revient à avoir $f_0 < \frac{0,01U}{\alpha_1 \pi c}$.

Ainsi, on doit avoir comme gamme de fréquences $f_0 \in [0; 0,0884 \text{ Hz}]$.

3)

Les ailes sont munies de plusieurs capteurs, en réalité équipées de trous situés dans le plan médian, le long de la corde des profils. Comme vu en cours, des tubes acoustiques dirigent ensuite le flux vers des capteurs. Cela permet une mesure impactant un minimum l'écoulement étant donné que les appareils de mesure sont délocalisés. Il faut cependant calibrer les mesures. En rouge, les capteurs mesurent la pression de surface à l'état stable, grâce au scanner de pression Kulite KMPS-1-64 à une fréquence d'échantillonnage $f_s = 11$ kHz. En bleu, les capteurs mesurent à la fois la pression de paroi stable, de manière identique aux capteurs rouges (c'est à dire avec le scanner de pression Kulite KMPS-1-64 à une fréquence d'échantillonnage $f_s = 11$ kHz), mais aussi la pression de paroi fluctuante. Un embout en T permet de mettre 2 capteurs en sortie du capillaire acoustique. Cette acquisition est faite à l'aide du capteur Brüel Kjaer 4958 à une fréquence d'échantillonnage $f_s = 512$ kHz. On retrouve une fréquence d'échantillonnage naturellement plus élevée pour les phénomènes qui seront plus oscillants et qui changent rapidement. On peut noter qu'en plus, des bandes de capteurs de pression (violet) ont été disposées.

4)

L'angle de décrochage statique α_{ss} est l'angle qui correspond au maximum du coefficient de portance. On peut lire sur la figure 2 que le maximum du coefficient de portance est atteint pour $\alpha_{s,g} = 15^\circ$. On a donc $\alpha_{ss} = 15^\circ$. Cela est cohérent avec l'interprétation que les chercheurs ont lus de leur données.

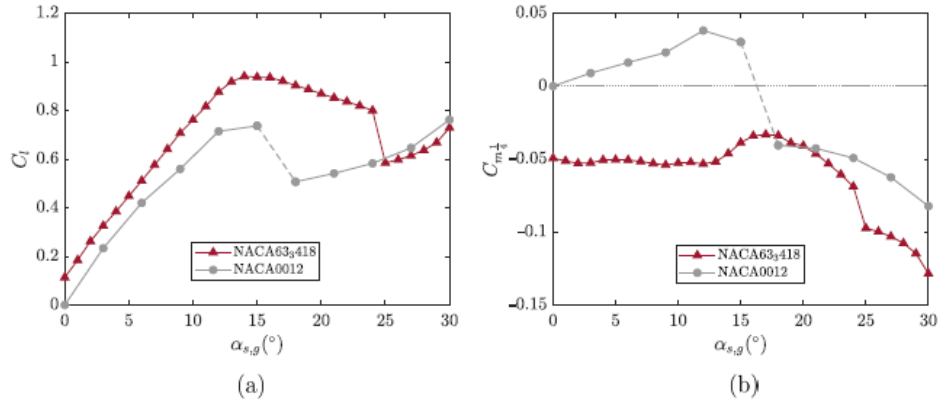


FIGURE 2 – Comparaison des (a) coefficients de portance et (b) coefficients de moment de tangage au quart de la corde entre les deux profils NACA.

Pour le profil NACA0012, le coefficient de moment de tangage $C_{m_{\frac{1}{4}}}$ est positif et augmente avec l'angle d'attaque jusqu'à α_{ss} puis diminue, après un décrochage brutal. Pour le profil NACA633418, le coefficient de moment de tangage $C_{m_{\frac{1}{4}}}$ est négatif et constant avec l'angle d'attaque jusqu'à 15° puis diminue. On peut noter une légère augmentation du moment de tangage à l'approche de la séparation de l'écoulement en α_{ss} .

5)

On s'intéresse désormais au coefficient de pression C_p . Sur la Fig.3 de l'article, on observe les plateaux du coefficient de pression C_p pour un angle $\alpha_{s,g} = 15^\circ$ pour le profil NACA0012 et pour $\alpha_{s,g} = 25^\circ$ pour l'autre profil. Les deux plateaux sont identiques. On retrouve là l'effet du décollement de la couche limite. Celle-ci intervient avec l'augmentation de l'angle d'attaque. Il n'y a plus d'écoulement le long du profil de l'aile : c'est le décollement. Dès lors, le coefficient de portance chute, et ce car le coefficient de pression atteint un palier. On peut d'ailleurs remarquer que ce palier arrive effectivement au même moment que la crise de trainée au niveau du coefficient de la portance, sur la Fig2 : respectivement à 15° et 25° .

6)

Le bruit de fond est généré par la soufflerie, mesuré en champ lointain. Les sources de bruit de fond sont le bruit du jet, bruit du bord de fuite des plaques horizontales. On suppose que ce bruit est identique lorsque le profil d'aile est ajouté dans la veine d'essai. Cependant, comme le précisent les chercheurs, il faut prendre des précautions à basses fréquences. En effet, on ne peut plus considérer un régime permanent linéaire quand la fréquence est faible face à une grande amplitude de variation de l'angle d'attaque. Cela peut s'intuiter par le fait que lorsque la fréquence des événements est élevée, l'obstacle a peu d'impact. Ainsi, si les comportements sont semblables au background noise pour des fréquences élevées, ce que l'on peut observer sur la Fig5b) de l'article, et ce quel que soit l'angle, ils diffèrent largement à faible fréquence à cause de cet effet. Les courbes en couleurs ne sont plus identiques à celle grise.

D'autre part, on peut commenter les PSD. On remarque qu'une augmentation de l'angle d'attaque amène généralement à l'augmentation du niveau en décibel, ce qui s'explique par l'augmentation de la turbulence et la perturbation générée, qui est une source acoustique. On retrouve ainsi l'ordre croissant bleu - violet - vert - rouge pour une gamme entre 1 et 10 de fréquence réduite. On remarque que la courbe verte associée à l'angle de décrochage est celle qui a le plus haut PSD à faible fréquence. Ce décrochement semblerait donc générer un bruit acoustique.

7)

Les auteurs procèdent à un moyennage de phase. Cette technique est justifiée lorsque les phénomènes étudiés et les signaux acquis sont périodiques. Cela permet de mettre en valeur des motifs communs à cette périodicité et d'obtenir une mesure de meilleure qualité. Ici, les oscillations de l'aile sont sinusoïdales. On peut donc justifier de la périodicité des phénomènes étudiés. D'autre part, les mesures montrent cette périodicité, c'est à dire que la fréquence de variation de l'angle d'attaque, est suffisamment importante pour que le système ait le temps de réagir et de sortir une réponse. Le cas échéant, il n'aurait pas été possible de procéder ainsi.

On retrouve ainsi un spectrogramme plus propre, voir même lissé face au bruit de mesure, et aux défauts inhérent à chaque prise de mesure, ce qui permet de sortir une tendance, que nous étudierons sur la question suivante.

8)

Les tirets blancs sur la figure 9 de l'article correspondent aux fréquences associées à un nombre de Strouhal constant égal à 0.2. Ici, on a ce nombre qui vaut : $St = \frac{f c \sin(\alpha)}{U}$.

Le nombre de Strouhal est un nombre sans dimension décrivant les mécanismes de circulation oscillante. On peut le relier au phénomène de décollement de la couche limite ou au phénomène d'allée de Von Karman, issu du décollement de cette dernière (notamment vu en cours de Lattice Boltzman Method MF210).

Le phénomène observé est que le maximum des spectrogrammes est associé aux fréquences à nombre de Strouhal constant. Ce phénomène est également visible en statique. On observe que la courbe verte et la courbe rouge sont bien celles ayant une DSP maximum. La courbe verte est celle associée à l'angle de décrochage. La courbe rouge quand à elle est celle une fois la crise de trainée passée (voir question précédente avec explications). Ces deux courbes encadrent le phénomène de décrochage. Ce sont bien les maxima statiques qu'on retrouve de manière continue en dynamique.

9)

On observe sur la Fig.10 de l'article que les maxima de bruit total OASPL correspondent aux maxima du coefficient de portance. Cela correspond physiquement au décrochage et raccrochage de la portance. Ainsi, les valeurs maximales correspondent aux instants de décollement/recollement de la couche limite. Quand k augmente, l'amplitude des pics augmente, de même que leur largeur. Les pics se décalent vers la droite (c'est à dire sont retardés) avec l'augmentation de k .

10)

D'après notre observation de la Fig.11 de l'article, on peut noter que la tendance est la même sur les deux OASPL : des maxima sont au niveau du décollement et recollement et encadrent la courbe, en symétrie par rapport à l'axe $x=0.5$. On remarque cependant que les pics sont plus grands pour le profil NACA0012 et qu'un pic central apparaît même pour $f_0 t = 0.5$. D'autre part, le profil très cambré du NACA63₃418 retarde le décollement (et donc l'apparition du pic d'OASPL) et accélère le recollement (et donc un nouveau pic), ce qui amène à des maxima plus condensés et centrés. La durée où la couche limite est décollée est donc plus faible pour ce profil que l'aile NACA0012.

2 Analyse des mesures de bruit de profil réalisées dans la soufflerie anéchoïque de l'Ecole Centrale de Lyon

Cet exercice utilise les codes `SSP ray moving`, `equations rays moving` et `DM1 exercice 1 raytracing`. Les codes sont disponibles en annexe du rendu.

2.1 Analyse des mesures en régime statique (angles d'attaque fixes)

1)

On s'intéresse aux densités spectrales de puissance S_{pp} en dB/Hz. On récupère les mêmes paramètres que dans l'article, avec les mêmes limites d'axes. On utilise les paramètres de l'article pour le calcul de la densité spectrale de puissance : fenêtre de Hamming de largeur 6400 points, 50% de chevauchement/overlapping et résolution fréquentielle égale à 8Hz. D'après la documentation sur la routine `pwelsh` de matlab, celle-ci utilise directement une fenêtre de Hamming. Il suffit donc de lui donner la plage sur laquelle on veut le fenêtrage. On compare finalement nos résultats à la figure 5 b) de l'article. On obtient la figure suivante en Fig.3 :

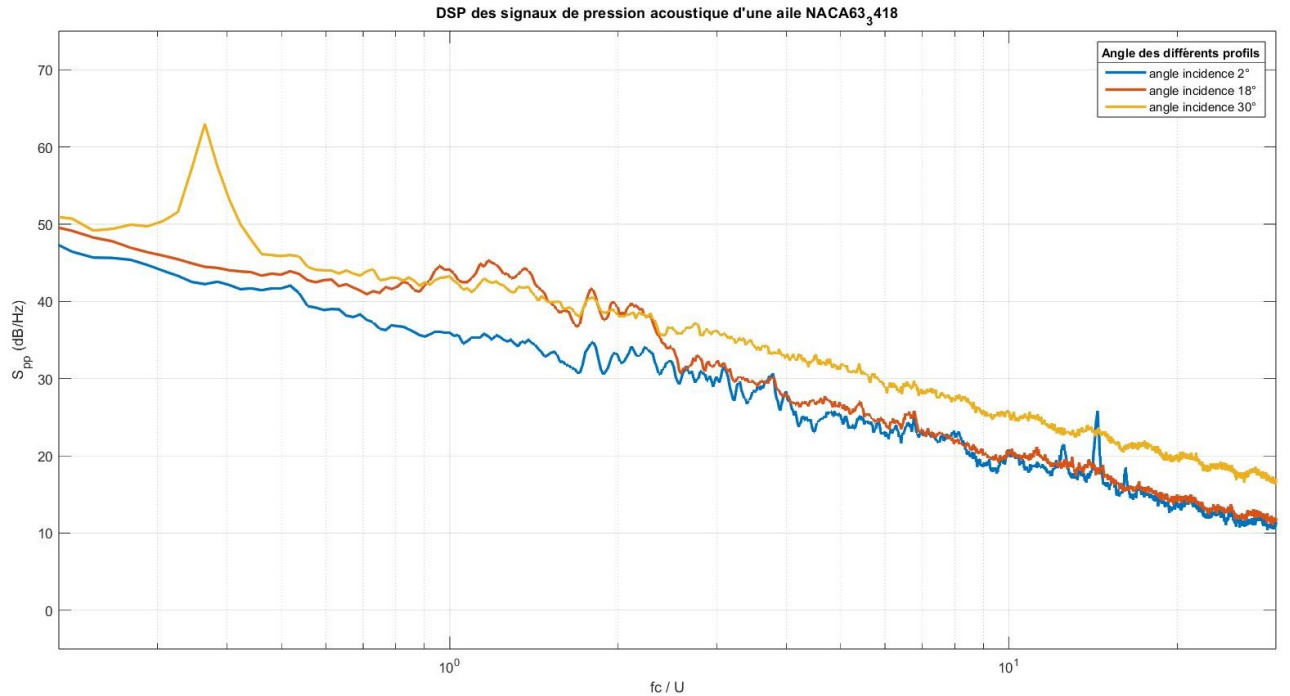


FIGURE 3 – DSP pour différents angles d'attaques, à comparer avec la figure 5 b) de l'article.

On peut remarquer que les valeurs sont les mêmes que celles de l'article. On observe par exemple le même pic caractéristique pour l'angle d'incidence de 30° autour de la valeur de 0,36. On est donc

satisfait de l'analyse des mesure effectuée de par sa cohérence avec les travaux des chercheurs de l'Ecole Centrale de Lyon.

2)

On calcule le bruit total. On utilise la formule suivante :

$$OAPSL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{p_{ref}^2} \int_{f_1}^{f_2} S_{pp} df \right)$$

On calcule pour f variant de 70 à 100 Hz. Pour cela, on a initialement codé avec l'approximation des intégrales de rectangles, puis on est passé sur la méthode des trapèzes, plus précise, et qui donne des résultats plus cohérent avec ceux attendus. On s'attend en effet à un bruit total autour de 70 dB d'après ce qui est indiqué dans l'article. Les valeurs des intégrales rectangles sont nettement en dessous. Les nombreuses variations et pics ne doivent donc pas être correctement prises en compte dans cette approximation géométrique. On note que l'on aurait pu utiliser d'autres méthodes afin de comparer, notamment les intégrales de Simpson mais c'est le compromis avec la simplicité des trapèzes et la cohérence des ordres de grandeurs qui a été retenue.

On obtient alors les résultats suivant en tableau 1 pour la valeurs des différentes OASPL :

type intégrale/angles attaque	OASPL _{AOA2} (dB)	OASPL _{AOA18} (dB)	OASPL _{AOA30} (dB)
rectangle	40,3	43,6	44,8
trapèze	68	72,3	76,7

TABLE 1 – tableau exhaustif des résultats des calculs de la valeur du OASPL pour les différents angles d'attaques, respectivement 2°, 18° et 30°

On remarque que le bruit total augmente avec l'augmentation de l'angle d'attaque. On peut supposer que cela s'explique par le fait qu'un faible angle d'attaque perturbe peu l'écoulement. La turbulence générée par cet aile d'avion dans l'écoulement, source acoustique, est plus faible que lorsque l'angle est important. D'autre part, un angle d'attaque important augmente le risque de décollement de la couche limite. Une couche limite décollée est elle aussi source de bruit acoustique.

2.2 Analyse des mesures en régime dynamique (profil en oscillation de tangage)

3)

On trace le signal acoustique et l'évolution de l'angle d'attaque au cours du temps en Fig.4 et Fig.5.

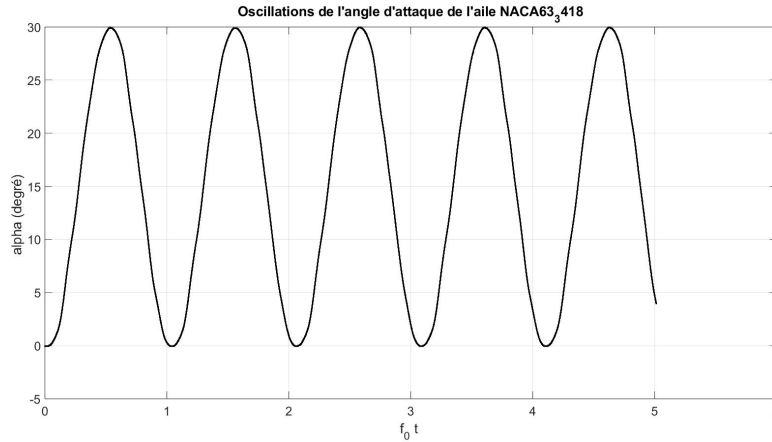


FIGURE 4 – Oscillations du profil

On remarque que l'enregistrement a été effectué sur 5 périodes d'oscillations du profil, qui varie d'un angle de 0 à 30° pour l'angle d'attaque. Ce sont exactement les paramètres stipulés dans l'article. Les oscillations semblent bien sinusoïdales, conformément au pilotage effectué par les chercheurs.

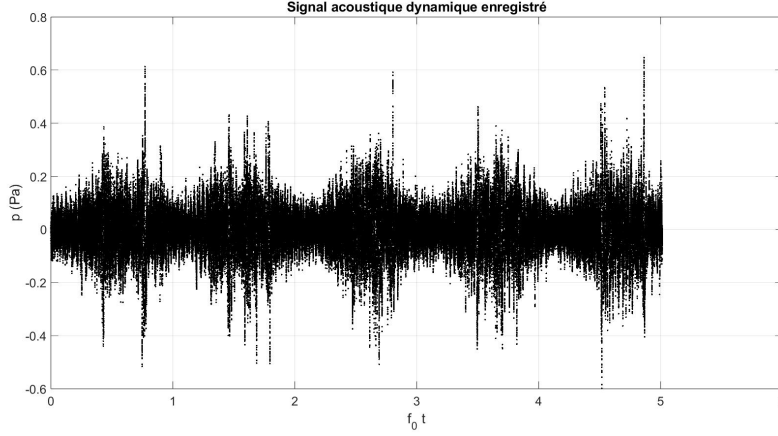


FIGURE 5 – Signal acoustique en fonction des périodes d'oscillations du profil

A l'aide de la commande *sound(micro-dynamique,fs)* de Matlab on peut écouter l'enregistrement. Ce dernier donne la même interprétation que le graphique. On entend et on observe des variations périodiques d'amplitudes qui correspondent aux variations d'angles de l'aile profilée. On remarque nettement la même périodicité que l'angle d'attaque. On dénombre ainsi 5 périodes liées aux 5 périodes d'oscillations de l'aile. on remarque que les maximums de pression acoustiques sont reliés au maximums d'angles d'attaque. De nouveau, cela peut s'expliquer par la turbulence plus importante générée lorsque l'angle d'attaque est très important. Les minimums de pression acoustiques correspondent quant à eux à des minimums d'angles d'attaque.

4)

On calcule le spectrogramme du signal sans recouvrement, avec la taille de la fenetre L égale au nombre de points de calcul de la transformée de Fourier discrète N : $L = N = 8192$. Un spectrogramme est une représentation visuelle des fréquences d'un signal dans le temps. Il est obtenu en appliquant une transformation de Fourier à des segments temporels du signal.

La résolution fréquentielle est donnée par :

$$\Delta f = \frac{\text{fréquence échantillonnage } f_s}{\text{nombre de points de la transformée de Fourier discrète } N_{fft}}$$

et la résolution temporelle par :

$$\Delta t = \frac{\text{taille de la fenetre } L_{window} \times (1 - \text{pourcentage d'overlapping})}{\text{fréquence échantillonnage } f_s}$$

Ainsi, elles sont respectivement égales à $\Delta f = 6,25$ Hz et $\Delta t = 160$ ms.

On trace alors le spectrogramme obtenu en figure 6.

5)

On trace désormais le spectrogramme avec les nouveaux paramètres en figure 7. On utilise maintenant le zero-padding. c'est une technique classique du traitement du signal.

Dans notre cas d'analyse de spectrogramme, le zero padding est très utile pour améliorer la qualité. En effet, lors de la création d'un spectrogramme, chaque segment temporel est fenêtré (ici avec L_{window}). Cependant, cette opération introduit des distorsions aux bords des segments (en lien avec le peigne de Dirac et le sinus cardinal dont les pieds perturbent la qualité de la transformation de Fourier), et ce qui altère donc la résolution fréquentielle de notre spectrogramme.

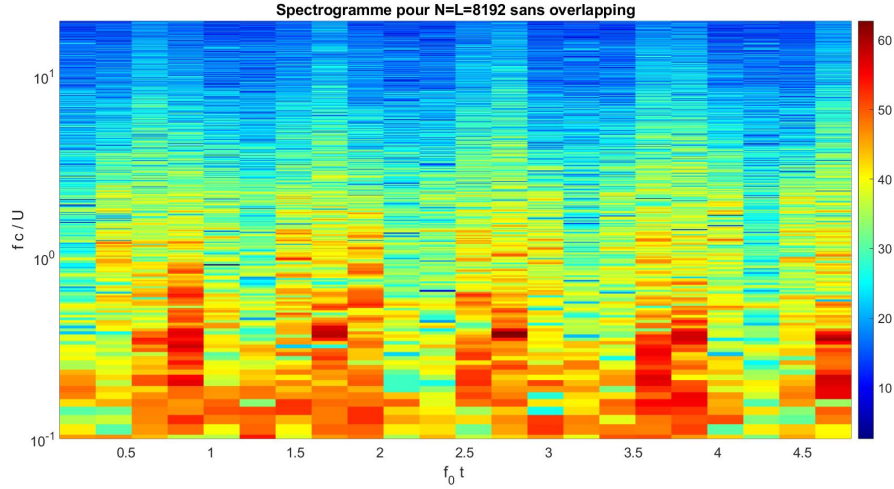


FIGURE 6 – Spectrogramme du signal acoustique enregistré sur 5 périodes

La technique du zero padding consiste ajouter des zéros à la fin de chaque segment de notre signal temporel, ce qui augmente sa longueur "artificiellement", avant de calculer la transformation de Fourier sur chaque segment. En ajoutant des zéros, on augmente la qualité au niveau fréquentiel du spectrogramme créé car cela revient à interpoler davantage de points entre les fréquences discrètes calculées. Cependant, la résolution reste identique car les longueurs de segments sont les mêmes. On n'augmente donc pas la résolution mais cependant cela permet de mieux différencier les pics et maximums lors de la transformation de Fourier discrète.

Ici on a $\Delta f = 6,25$ Hz et $\Delta t = 68,4$ ms.

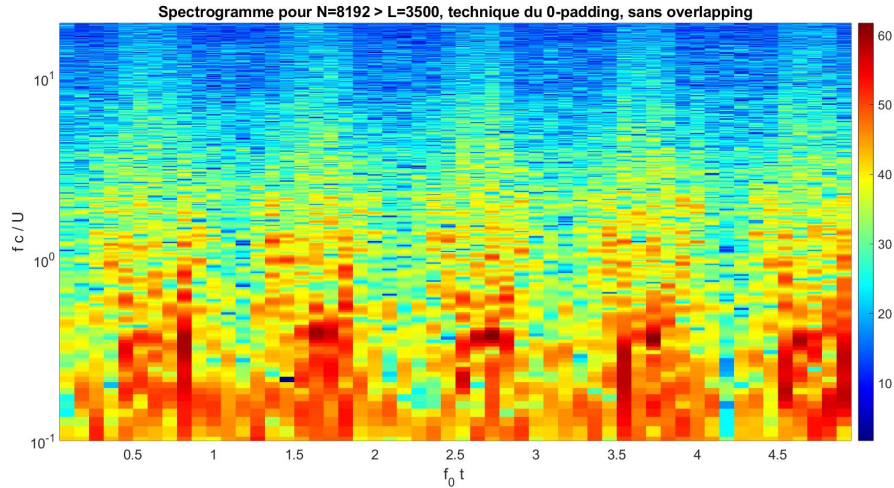


FIGURE 7 – Spectrogramme du signal acoustique enregistré sur 5 périodes

6)

On trace alors le spectrogramme avec les mêmes paramètres que l'article en figure 8.

Ils utilisent 80% d'overlap avec une fenêtre de 3500 échantillons pour $f_0 = 1.33$ Hz et ce afin d'avoir le même nombre de fenêtre par cycle.

On utilise de nouveau la technique du zero-padding, mais on ajoute aussi la technique de l'overlapping, à hauteur de 80%. Cela permet de réduire les effets du fenêtrage et d'augmenter la résolution temporelle du signal. Le spectrogramme est donc plus fin.

Ici on a $\Delta f = 6,25$ Hz et $\Delta t = 13,7$ ms. La résolution temporelle des chercheurs est identique : 14 ms, de même que la résolution fréquentielle.

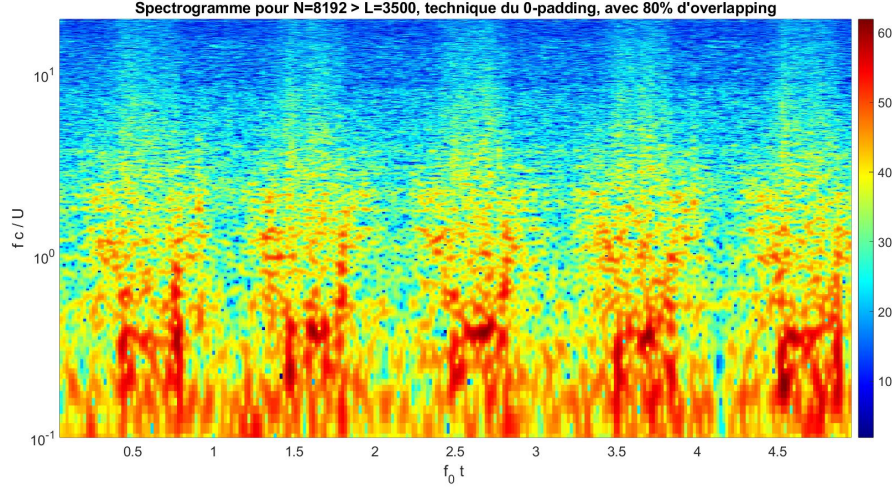


FIGURE 8 – Spectrogramme du signal acoustique enregistré sur 5 périodes

Le résultat final est proche de celui étudié par les chercheurs de l'article. Cependant, on peut noter que notre spectrogramme est moins précis. En effet, les chercheurs ont utilisé une moyenne de phase sur l'ensemble de leur acquisition de 100 périodes pour récupérer un tracé sur 8 périodes. On peut cependant noter que l'on observe des maxima fréquentiels à chaque maximum d'angle d'attaque, puis un minimum fréquentiel quand l'angle d'attaque vaut 0. La périodicité est facilement identifiable.

7)

On calcule enfin le niveau de bruit total OASPL(t) à partir de la densité spectrale de puissance calculée à la question précédente en utilisant exactement les mêmes paramètres que dans l'article de Raus et coll. (2021). On obtient la Fig.9

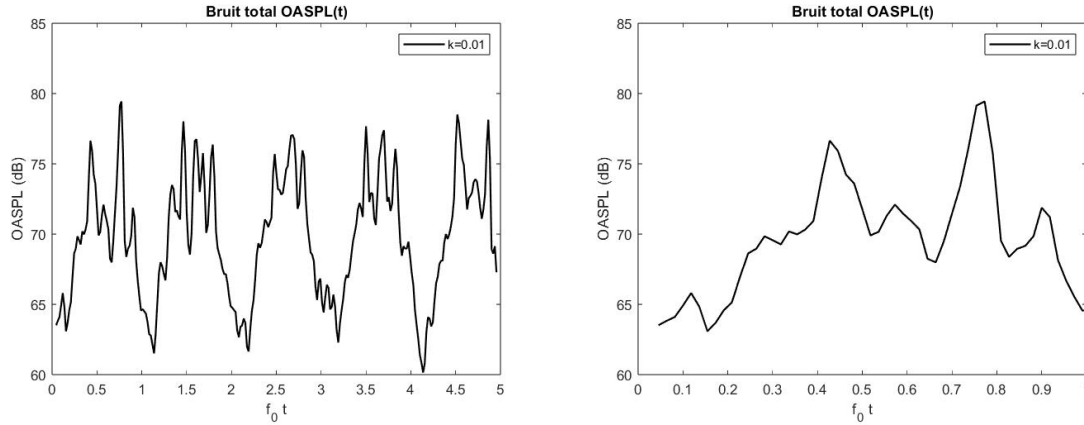


FIGURE 9 – Bruit total sur les 5 périodes et zoom sur une période

On essaye nous aussi de moyenner sur 5 périodes. Le résultat présenté en Fig.10 n'est malheureusement pas comparable avec le moyennage effectué sur un bien plus grand nombre de période de la part des chercheurs.

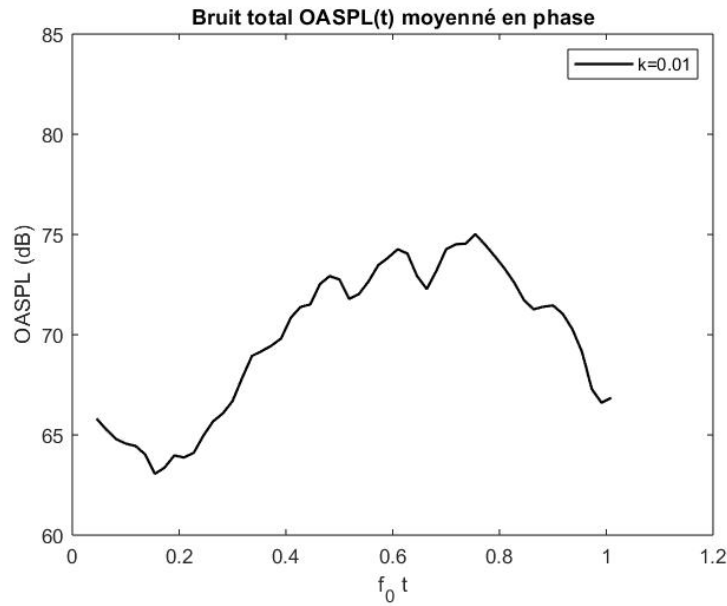


FIGURE 10 – Bruit total sur 1 période après moyennage de phase

Conclusion

En conclusion, nous avons désormais un aperçu suffisant pour comprendre le phénomène de décollement de la couche limite et son impact sur l'aspect acoustique.

Ensuite, ce DM a été bénéfique pour la compréhension générale du cours de MF208. Loin des équations parfois difficiles et de l'approximation de Lighthill, ce projet nous a permis d'exploiter des données et des graphes à la lumière de l'enseignement reçu. D'autre part, si le traitement du signal est quelque chose de connu et déjà abordé en Modex avec la bille chaotique ou dans le cours ES101 Signaux Numériques, il était intéressant de l'utiliser sous un nouveau jour, celui du signal acoustique. Par ailleurs, cela facilitait aussi la compréhension physique.

Enfin, d'un point de vue personnel, souhaitant m'orienter dans le secteur aéronautique j'ai particulièrement apprécié le lien constant avec la mécanique des fluides (couche limite, portance).