

Modulations d'amplitude du bruit éolien : bruit de décrochage dynamique et effets de propagation

Benjamin Cotté¹ Lisa Sicard¹ David Raus¹ Romain Monchaux¹
Emmanuel Jondeau² Pascal Souchotte² Michel Roger²

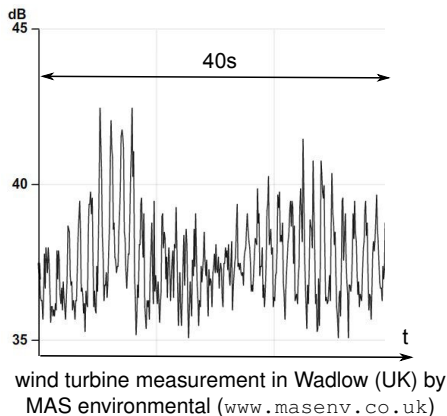
¹IMSIA, ENSTA, IP Paris, France (benjamin.cotte@ensta-paris.fr)

²LMFA, École Centrale de Lyon, France

Journée de restitution publique du projet de recherche PIBÉ
21 janvier 2025

Modulations d'amplitude du bruit éolien

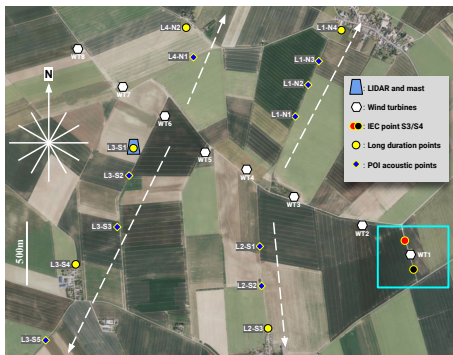
- le bruit éolien est caractérisé par des modulations d'amplitude à la fréquence de passage des pales (période autour de 1 s)
- modulations audibles près de l'éolienne en vent de travers, et parfois à plus grandes distances
⇒ peut être expliqué par les sources aéroacoustiques (Oerlemans [2013]) et par les effets de propagation



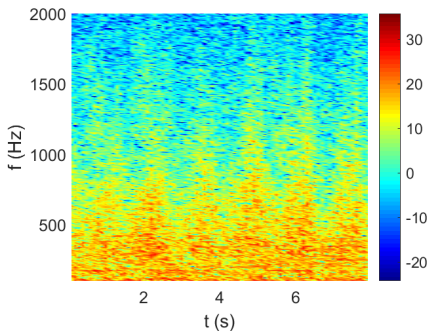
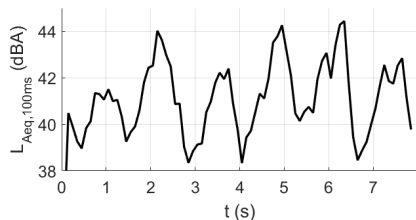
Modulations d'amplitude du bruit éolien

Enregistrement lors de la campagne *in situ* PIBE au point L4-N2

- à 700 m de l'éolienne la plus proche
- récepteur contre le vent (*upwind*)

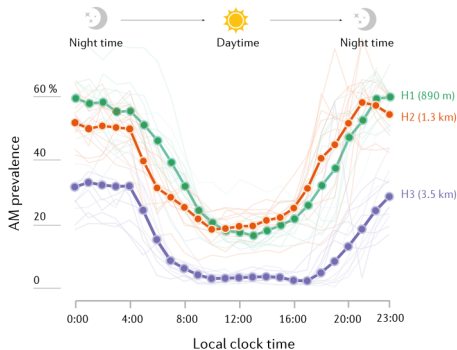


Enregistrement au point L4-N2



Modulations d'amplitude du bruit éolien

Variation diurne de la fréquence
d'apparition des modulations d'amplitude
(AM) : étude [Nguyen et al., \(2021\)](#)

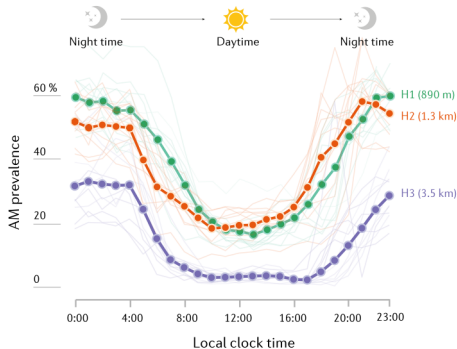


Probabilité de gêne élevée en fonction du
niveau de bruit éolien (WTN) et routier
(RTN) : étude en laboratoire de [Schäffer et al. \(2016\)](#)

AM fréquent la nuit : conditions
atmosphériques stables

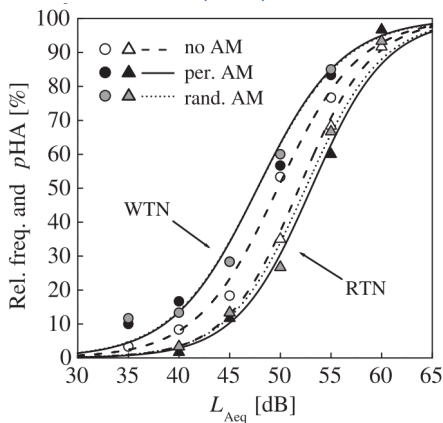
Modulations d'amplitude du bruit éolien

Variation diurne de la fréquence d'apparition des modulations d'amplitude (AM) : étude [Nguyen et al., \(2021\)](#)



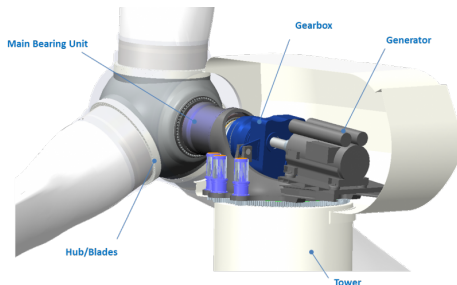
AM fréquent la nuit : conditions atmosphériques stables

Probabilité de gêne élevée en fonction du niveau de bruit éolien (WTN) et routier (RTN) : étude en laboratoire de [Schäffer et al. \(2016\)](#)



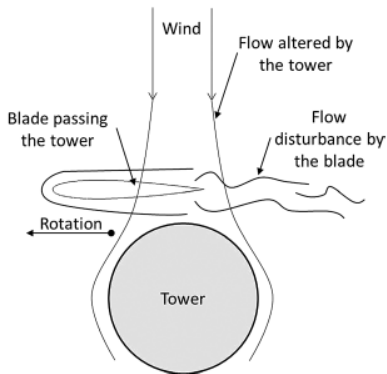
Sources de bruit d'une éolienne

- bruit d'origine mécanique (boîte de vitesse)



www.eolotec.com

- bruit aérodynamique tonal aux harmoniques de la fréquence de passage de pale (bruit d'interaction pale-mat)

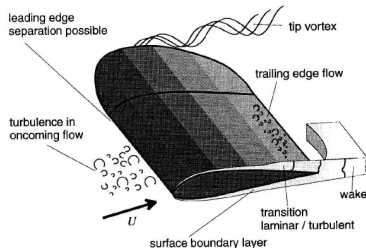


Yauwenas et al. [2017]

Sources de bruit d'une éolienne

- sources aeroacoustiques large bande
 - ▶ bruit d'interaction de turbulence
 - ▶ bruit de bord de fuite pour une couche limite turbulente
 - ▶ bruit de décollement et de décrochage

⇒ peut être à l'origine des modulations d'amplitude
(Oerlemans [2013])



Wagner [1996]

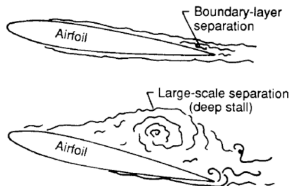
Brooks, Pope and Marcolini (1989)

Bertagnolio *et al.* [2015]

Sources de bruit d'une éolienne

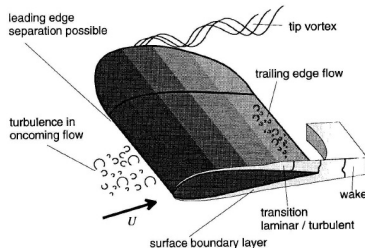
- sources aeroacoustiques large bande
 - ▶ bruit d'interaction de turbulence
 - ▶ bruit de bord de fuite pour une couche limite turbulente
 - ▶ bruit de décollement et de décrochage

⇒ peut être à l'origine des modulations d'amplitude
(Oerlemans [2013])



Separation-stall noise

Brooks, Pope and Marcolini (1989)



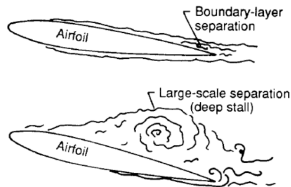
Wagner [1996]

Bertagnolio *et al.* [2015]

Sources de bruit d'une éolienne

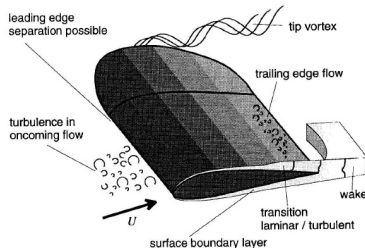
- sources aeroacoustiques large bande
 - ▶ bruit d'interaction de turbulence
 - ▶ bruit de bord de fuite pour une couche limite turbulente
 - ▶ bruit de décollement et de décrochage

⇒ peut être à l'origine des modulations d'amplitude
(Oerlemans [2013])

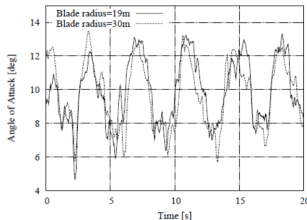


Separation-stall noise

Brooks, Pope and Marcolini (1989)



Wagner [1996]



Bertagnolio *et al.* [2015]

Décrochage dynamique sur une pale d'éolienne

Direction de l'écoulement incident ϕ :

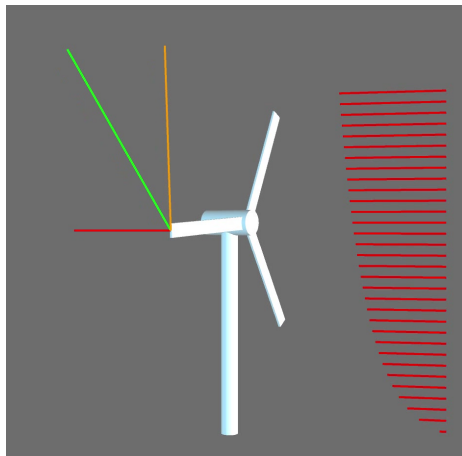
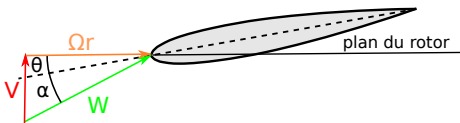
$$\phi = \theta + \alpha = \arctan \left(\frac{V(z)}{\Omega r} \right)$$

$V(z)$: profil de vent

Ω : vitesse de rotation

θ : angle de calage + vrillage

α : angle d'attaque



Décrochage dynamique sur une pale d'éolienne

Direction de l'écoulement incident ϕ :

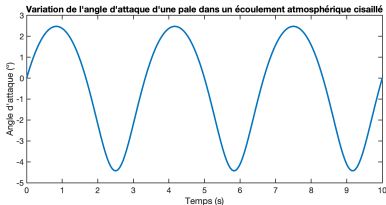
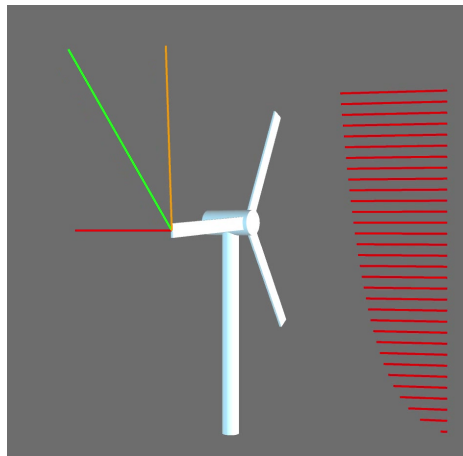
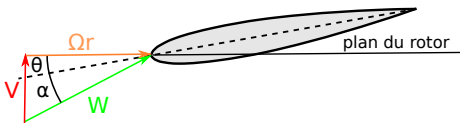
$$\phi = \theta + \alpha = \arctan \left(\frac{V(z)}{\Omega r} \right)$$

$V(z)$: profil de vent

Ω : vitesse de rotation

θ : angle de calage + vrillage

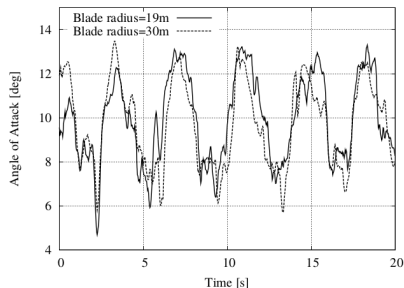
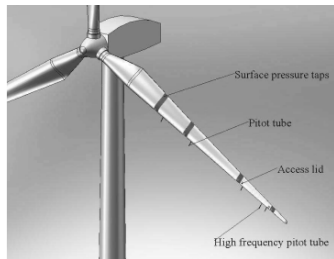
α : angle d'attaque



Bruit de décrochage dynamique

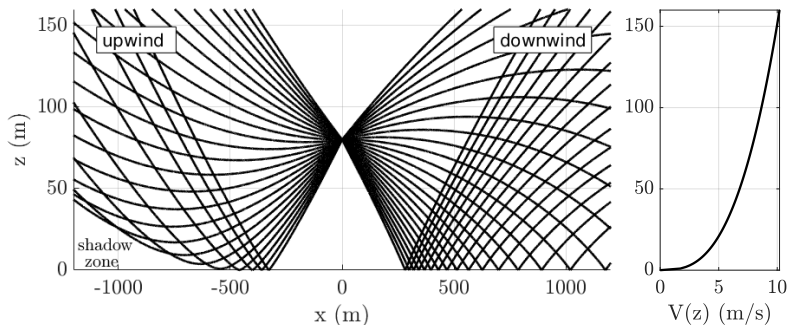
- Le décrochage dynamique peut se produire sur des pales d'éoliennes (Bertagnolio *et al.* [2015])
- Peu d'études sur cette source de bruit dans la littérature

Objectif de l'axe 1 du projet ANR PIBE (*Prédire l'Impact du Bruit des Éoliennes*, www.anr-pibe.fr) :
Caractériser le bruit de décrochage dynamique en environnement contrôlé



Modulations d'amplitude associées aux effets de propagation

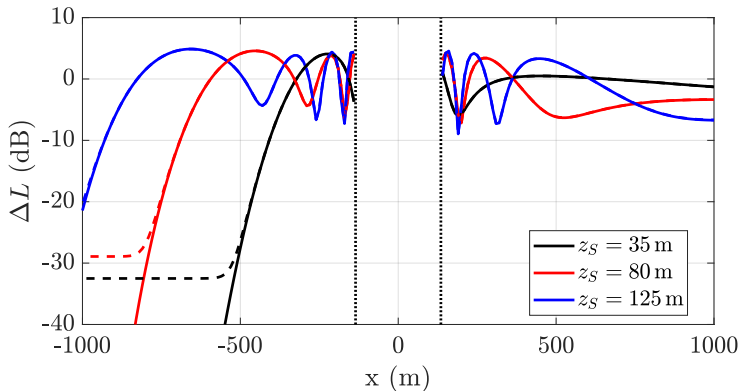
① effets de réfraction



Tracé de rayons pour une source à une hauteur de 80 m

Modulations d'amplitude associées aux effets de propagation

- 1 effets de réfraction : plus la source est haute plus la zone d'ombre s'éloigne
- 2 effet de sol : interférences dépendent de la hauteur de la source



Niveau de pression par rapport au champ libre ΔL calculé à 500 Hz pour un récepteur à une hauteur de 2 m

Synthèse sonore en présence d'une zone d'ombre

Outil d'auralisation issu de la thèse de David Mascarenhas (ITN VRACE) : voir article Acta Acustica (2023) en accès libre

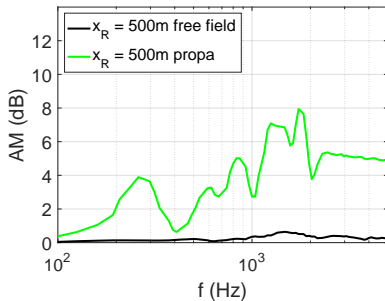
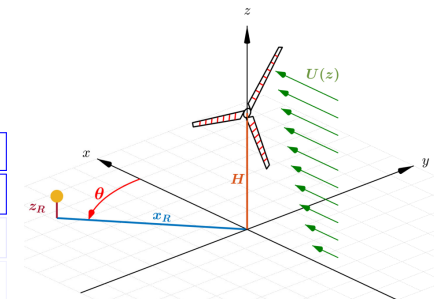
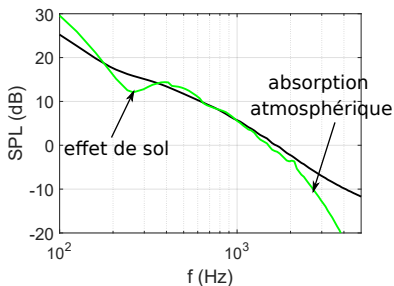
$\theta = 180^\circ$, moderate turbulence

$x_R = 500$ m in free field

$x_R = 500$ m with propagation effects

$x_R = 800$ m with propagation effects

$x_R = 1000$ m with propagation effects



Synthèse sonore en présence d'une zone d'ombre

Outil d'auralisation issu de la thèse de David Mascarenhas (ITN VRACE) : voir article Acta Acustica (2023) en accès libre

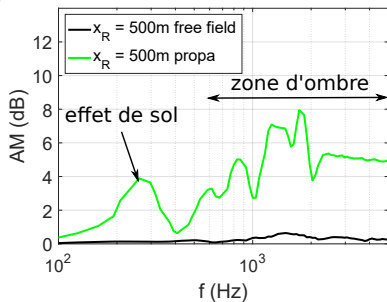
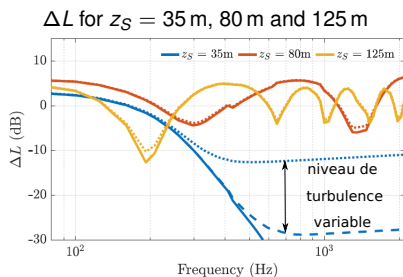
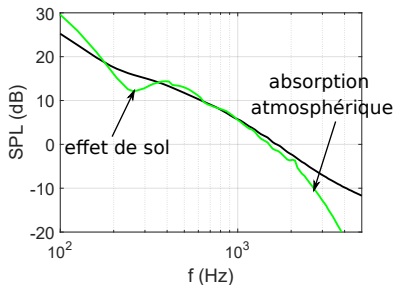
$\theta = 180^\circ$, moderate turbulence

$x_R = 500$ m in free field

$x_R = 500$ m with propagation effects

$x_R = 800$ m with propagation effects

$x_R = 1000$ m with propagation effects



Synthèse sonore en présence d'une zone d'ombre

Outil d'auralisation issu de la thèse de David Mascarenhas (ITN VRACE) : voir article Acta Acustica (2023) en accès libre

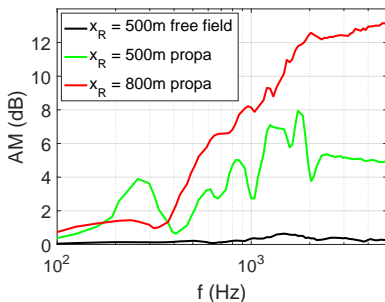
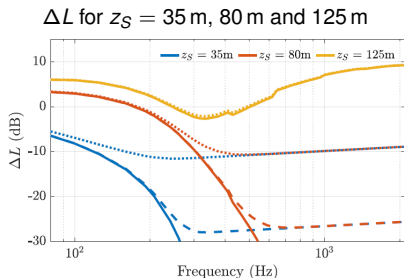
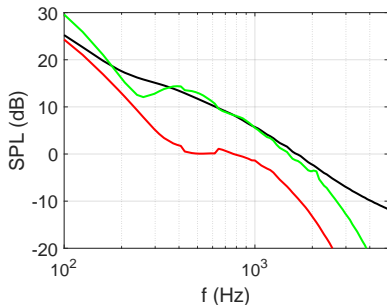
$\theta = 180^\circ$, moderate turbulence

$x_R = 500$ m in free field

$x_R = 500$ m with propagation effects

$x_R = 800$ m with propagation effects

$x_R = 1000$ m with propagation effects



Synthèse sonore en présence d'une zone d'ombre

Outil d'auralisation issu de la thèse de David Mascarenhas (ITN VRACE) : voir article Acta Acustica (2023) en accès libre

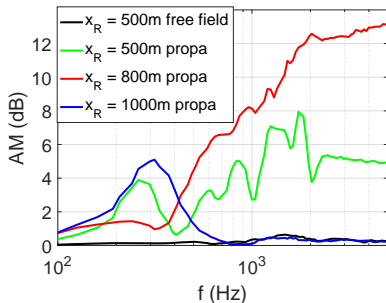
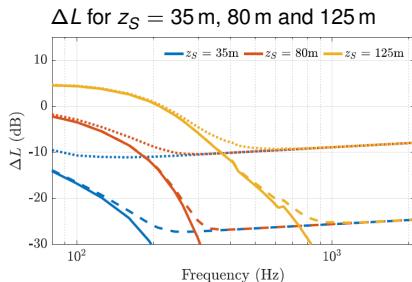
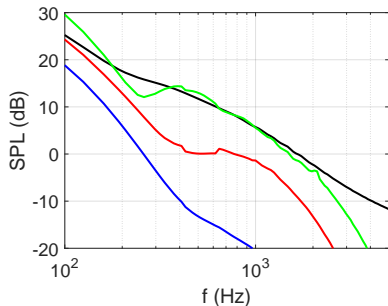
$\theta = 180^\circ$, moderate turbulence

$x_R = 500$ m in free field

$x_R = 500$ m with propagation effects

$x_R = 800$ m with propagation effects

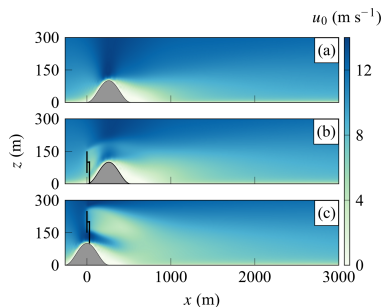
$x_R = 1000$ m with propagation effects



Modulations d'amplitude associées aux effets de propagation

- 1 effets de réfraction
- 2 effet de sol
- 3 effets de sillage
- 4 effets de topographie

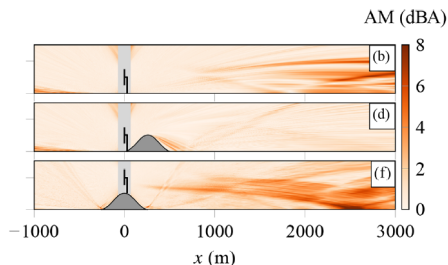
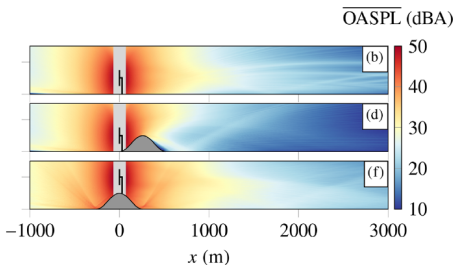
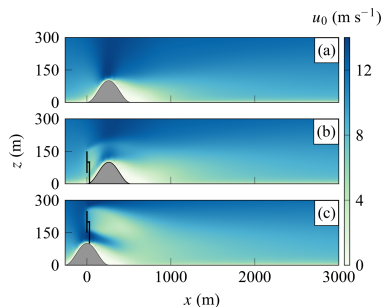
Résultats numériques de Colas *et coll.* (2024)



Modulations d'amplitude associées aux effets de propagation

- 1 effets de réfraction
- 2 effet de sol
- 3 effets de sillage
- 4 effets de topographie

Résultats numériques de Colas *et coll.* (2024)



Plan de la présentation

Objectifs

Caractériser le bruit de décrochage dynamique en régime statique et dynamique à échelle réduite dans une soufflerie anéchoïque :

- identifier les régimes acoustiques en fonction des variations d'angle d'attaque
- étudier l'influence du nombre de Reynolds, de la turbulence amont et de la fréquence d'oscillation

Plan de la présentation

- 1 Dispositif expérimental
- 2 Bruit d'un profil d'aile statique (angle d'attaque fixe)
- 3 Bruit d'un profil d'aile en oscillation de tangage
- 4 Conclusions et perspectives

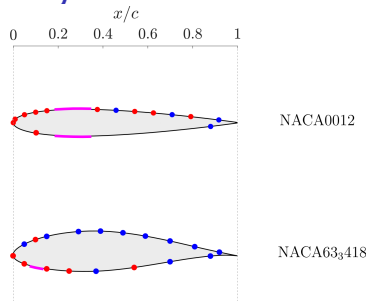
Campagnes expérimentales dans la soufflerie anéchoïque de l'École Centrale de Lyon

3 main experimental campaigns :

① instrumented NACA 0012 airfoil
More details in [Raus *et al.* \(JSV 2022\)](#)

② instrumented NACA 63₃418 airfoil
③ flow and acoustic measurements on NACA 63₃418 airfoil

More details in [Sicard *et al.* \(AIAA-CEAS conference 2024\)](#)



Campagnes expérimentales dans la soufflerie anéchoïque de l'École Centrale de Lyon

3 main experimental campaigns :

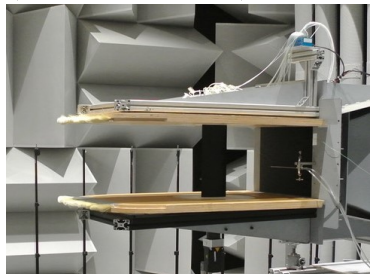
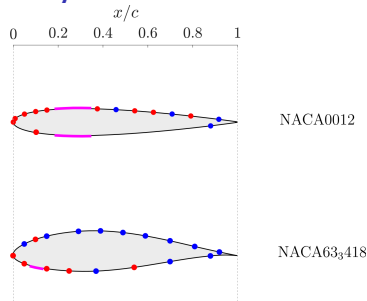
① instrumented NACA 0012 airfoil

More details in [Raus *et al.* \(JSV 2022\)](#)

② instrumented NACA 63₃418 airfoil

③ flow and acoustic measurements on NACA 63₃418 airfoil

More details in [Sicard *et al.* \(AIAA-CEAS conference 2024\)](#)

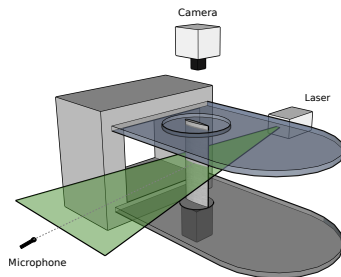
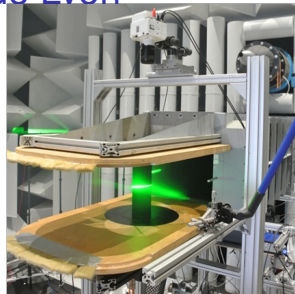


Campagnes expérimentales dans la soufflerie anéchoïque de l'École Centrale de Lyon

3 main experimental campaigns :

- 1 instrumented NACA 0012 airfoil
More details in [Raus *et al.* \(JSV 2022\)](#)
- 2 instrumented NACA 63₃418 airfoil
- 3 flow and acoustic measurements on NACA 63₃418 airfoil

More details in [Sicard *et al.* \(AIAA-CEAS conference 2024\)](#)



Campagnes expérimentales dans la soufflerie anéchoïque de l'École Centrale de Lyon

3 main experimental campaigns :

- 1 instrumented NACA 0012 airfoil

More details in [Raus *et al.* \(JSV 2022\)](#)

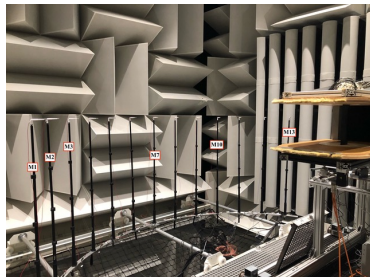
- 2 **instrumented NACA 63₃418 airfoil**

- 3 flow and acoustic measurements on NACA 63₃418 airfoil

More details in [Sicard *et al.* \(AIAA-CEAS conference 2024\)](#)

Dispositif expérimental durant la deuxième campagne

- Airfoil of chord $c = 12$ cm and span $L = 30$ cm
- Inflow velocity $U \in [25, 75]$ m/s :
 - ▶ $Re_c = Uc/\nu \in [2, 6] \times 10^5$
 - ▶ $M = U/c_0 \in [0.07, 0.22]$
- Tripping device or turbulence grid to prevent laminar boundary layer noise
- Directivity with 13-microphone array



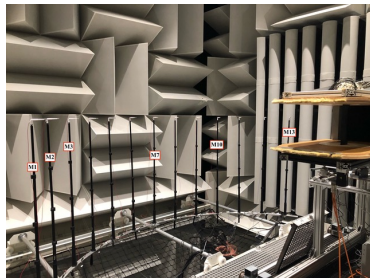
Dispositif expérimental durant la deuxième campagne

- Airfoil of chord $c = 12$ cm and span $L = 30$ cm
- Inflow velocity $U \in [25, 75]$ m/s :
 - ▶ $Re_c = Uc/\nu \in [2, 6] \times 10^5$
 - ▶ $M = U/c_0 \in [0.07, 0.22]$
- Tripping device or turbulence grid to prevent laminar boundary layer noise
- Directivity with 13-microphone array

Static airfoil

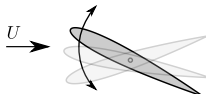
Geometric angle of attack $\alpha_g \in [0, 30^\circ]$

Effective angle of attack α_e can be calculated using Garner correction



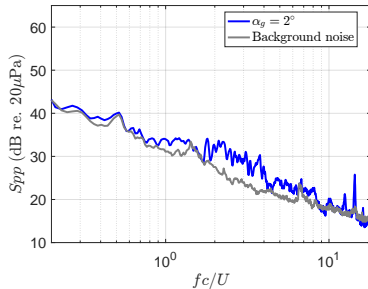
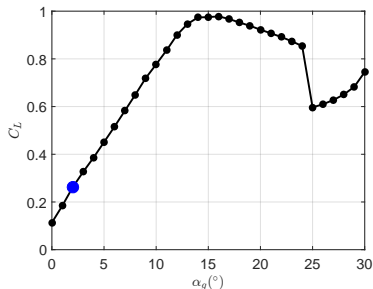
Oscillating airfoil

- $\alpha_g = \alpha_0 + \alpha_A \sin(2\pi f_0 t)$ with $\alpha_0 = \alpha_A = 15^\circ$
- Reduced frequency $k = \pi f_0 c / U \in [0.005, 0.05]$



Rayonnement acoustique d'un profil d'aile NACA63₄18 statique

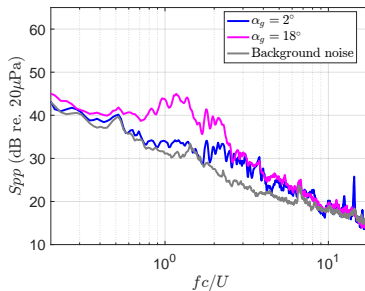
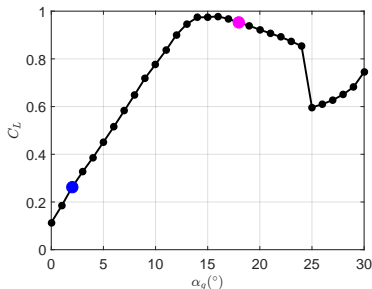
Results with tripping at $U = 50$ m/s



- At low angles of attack : low amplitude turbulent boundary layer trailing edge noise.
- For $15^\circ < \alpha_g < 27^\circ$: partially separated boundary layer
 \Rightarrow broadband low frequency noise (**separation noise**)
- $\alpha_g \geq 27^\circ$: Large scale vortex shedding \rightarrow Low frequency narrow-band peak (**deep-stall noise**)

Rayonnement acoustique d'un profil d'aile NACA63₄18 statique

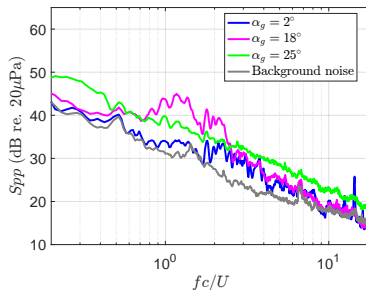
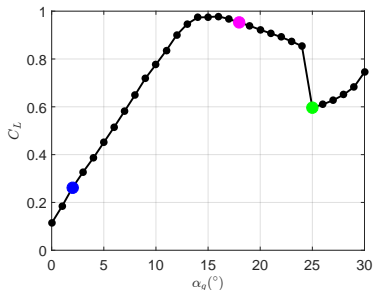
Results with tripping at $U = 50$ m/s



- At low angles of attack : low amplitude turbulent boundary layer trailing edge noise.
- For $15^\circ < \alpha_g < 27^\circ$: partially separated boundary layer
 \Rightarrow broadband low frequency noise (**separation noise**)
- $\alpha_g \geq 27^\circ$: Large scale vortex shedding \rightarrow Low frequency narrow-band peak (**deep-stall noise**)

Rayonnement acoustique d'un profil d'aile NACA63₃418 statique

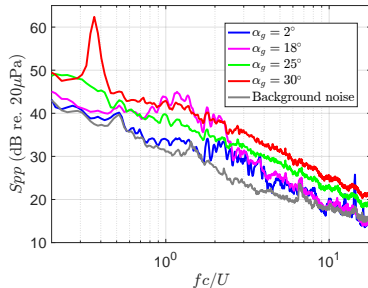
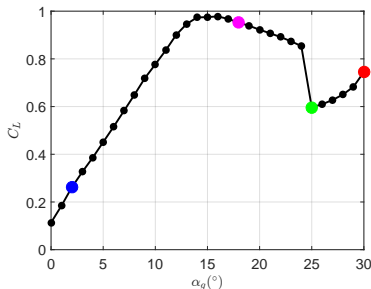
Results with tripping at $U = 50$ m/s



- At low angles of attack : low amplitude turbulent boundary layer trailing edge noise.
- For $15^\circ < \alpha_g < 27^\circ$: partially separated boundary layer
 \Rightarrow broadband low frequency noise (**separation noise**)
- $\alpha_g \geq 27^\circ$: Large scale vortex shedding \rightarrow Low frequency narrow-band peak (**deep-stall noise**)

Rayonnement acoustique d'un profil d'aile NACA63₃418 statique

Results with tripping at $U = 50$ m/s

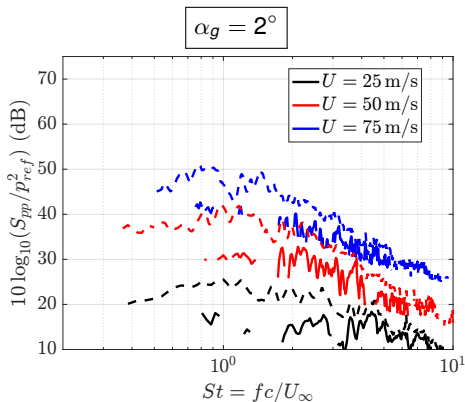


- At low angles of attack : low amplitude turbulent boundary layer trailing edge noise.
- For $15^\circ < \alpha_g < 27^\circ$: partially separated boundary layer
 \Rightarrow broadband low frequency noise (**separation noise**)
- $\alpha_g \geq 27^\circ$: Large scale vortex shedding \rightarrow Low frequency narrow-band peak (**deep-stall noise**)

Effet du nombre de Reynolds et de la turbulence amont

PSD of acoustic pressure corrected by background noise :

- solid lines : with tripping
- dashed lines : with turbulence grid



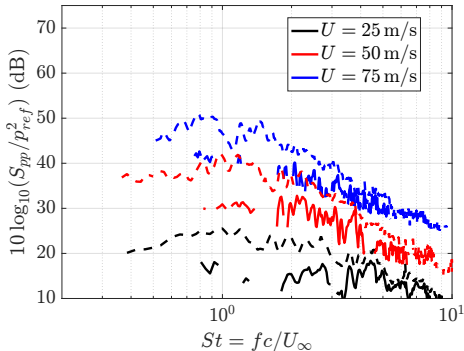
- With turbulence grid : significant noise increase at mid-frequencies for $\alpha_g = 2^\circ$ (**turbulence interaction noise**)
- small influence of the turbulence grid in the deep stall regime ($\alpha_g = 30^\circ$)

Effet du nombre de Reynolds et de la turbulence amont

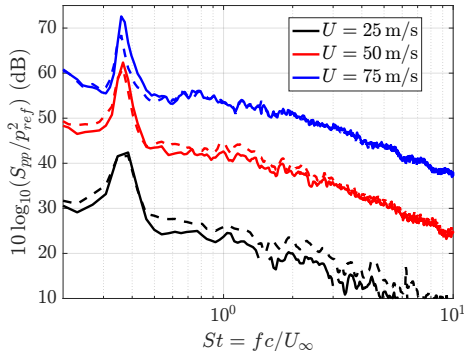
PSD of acoustic pressure corrected by background noise :

- solid lines : with tripping
- dashed lines : with turbulence grid

$\alpha_g = 2^\circ$



$\alpha_g = 30^\circ$



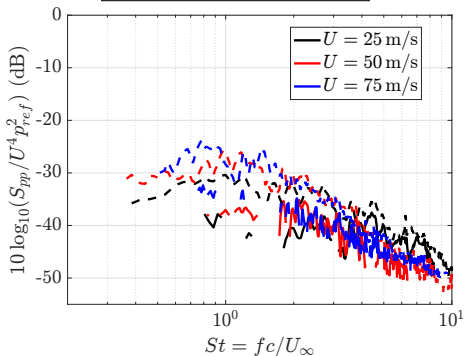
- With turbulence grid : significant noise increase at mid-frequencies for $\alpha_g = 2^\circ$ (**turbulence interaction noise**)
- small influence of the turbulence grid in the deep stall regime ($\alpha_g = 30^\circ$)

Effet du nombre de Reynolds et de la turbulence amont

PSD of acoustic pressure corrected by background noise :

- solid lines : with tripping
- dashed lines : with turbulence grid

$\alpha_g = 2^\circ$ with U^4 scaling



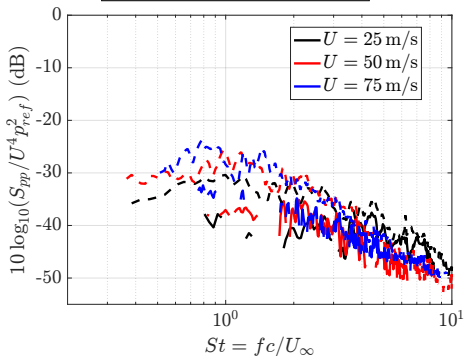
- $\alpha_g = 2^\circ$: good collapse at high frequencies with U^4 scaling (**trailing edge noise**)
- $\alpha_g = 30^\circ$: good collapse at low frequencies with U^5 scaling (**compact dipole**)

Effet du nombre de Reynolds et de la turbulence amont

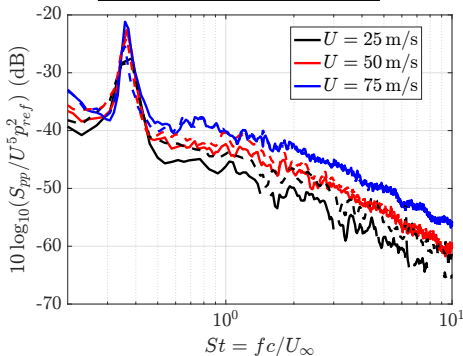
PSD of acoustic pressure corrected by background noise :

- solid lines : with tripping
- dashed lines : with turbulence grid

$\alpha_g = 2^\circ$ with U^4 scaling



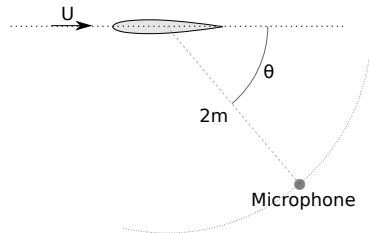
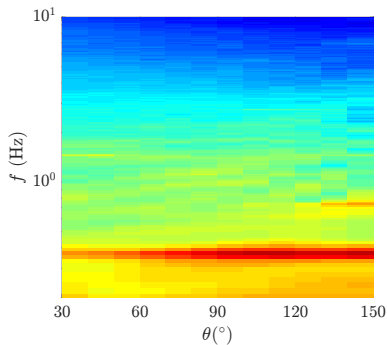
$\alpha_g = 30^\circ$ with U^5 scaling



- $\alpha_g = 2^\circ$: good collapse at high frequencies with U^4 scaling (**trailing edge noise**)
- $\alpha_g = 30^\circ$: good collapse at low frequencies with U^5 scaling (**compact dipole**)

Directivity of noise in the regime of dicrochage

Results with turbulence grid at $U = 50$ m/s for $\alpha_g = 30^\circ$



Stronger radiation in the upwind direction

Exemple de profil en oscillation

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{NACA63}_3\text{418} \\ \alpha_{d,g} = 15^\circ + 15^\circ \sin(2\pi f t) \\ U = 50 \text{ m/s} \\ f = 1.3 \text{ Hz} - k = 0.01 \end{array} \right.$$

