



## Journée de restitution publique du projet de recherche PIBE 21 janvier 2025

### Réduction du bruit éolien par modification du profil de pale

M. Roger\*, École Centrale de Lyon

Contributeurs: E. Jondeau\*, P. Souchette\*, J.C. Vingiano\*  
B. Cotté\*\*

\* LMFA UMR 5509 ECL, Ecully

\*\* UMR 9219 ENSTA Paris, Palaiseau



# RAPPEL DES MECANISMES

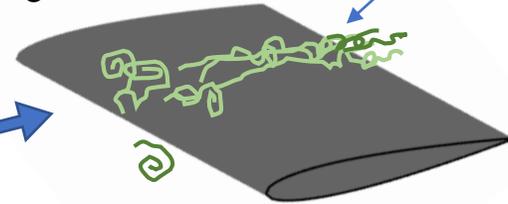
## Régimes d'écoulement impliqués dans le bruit propre

$$\frac{d}{dt}(\nabla \times \mathbf{V}) \rightarrow \text{dB}$$

La dynamique tourbillonnaire comme source de bruit:  
un mécanisme majeur décliné sous différentes formes

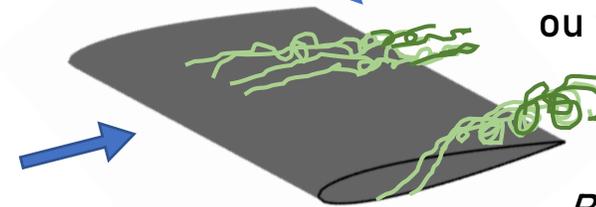
Bruit d'impact de turbulence (large bande)

*Turbulence*



*Couches limites attachées*

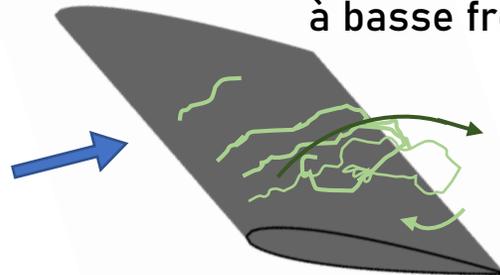
Bruit de bord de fuite (large bande ou tonal)



*Bruit de tourbillon d'extrémité (large bande)*

Bruit de décollement ou de décrochage (large bande avec pics à basse fréquence)

*Décrochage*



Recherche menée sur des sources réparties en envergure et peu cohérentes (turbulence)

## PROBLEMATIQUE DE LA REDUCTION

- Bien que directement lié au dessin des pales et à leur charge aérodynamique, le bruit propre varie beaucoup selon le régime.
- Le bruit d'impact est d'autant plus variable qu'il dépend des conditions extérieures (turbulence atmosphérique)

Variété des conditions accrue en décrochage dynamique



- Double difficulté de définir un dispositif de réduction optimal.
- Chercher à optimiser le dessin des pales est peu prometteur.

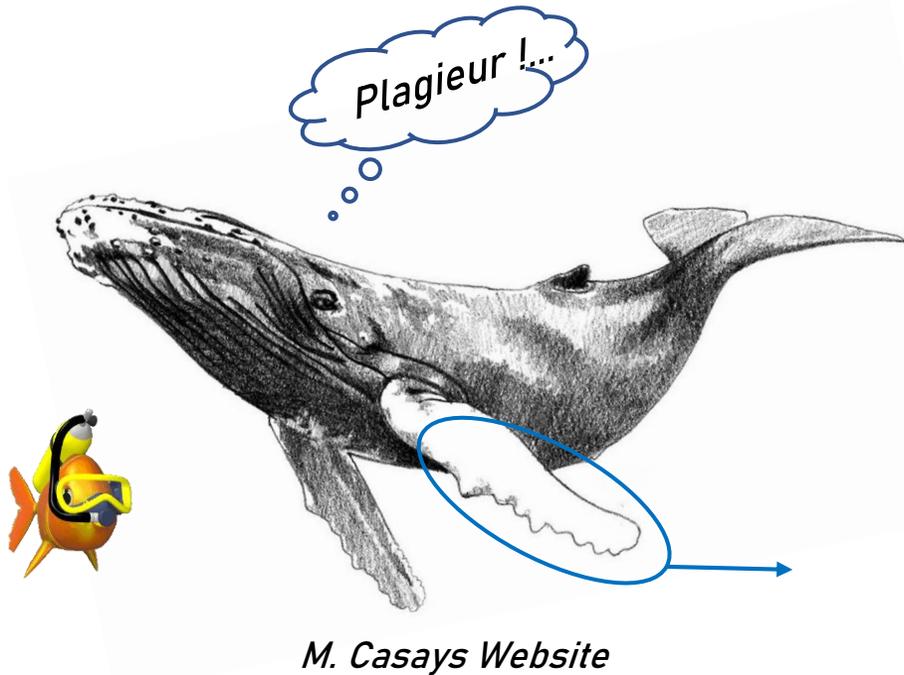
L'intensité locale et la cohérence transversale (même limitée) des phénomènes importent, de même que l'aptitude de la surface à faire rayonner les sources.

*souvent imposée par les conditions*

*actions envisagées*

- Nécessité d'étudier les mécanismes en soufflerie anéchoïde, dans des conditions maîtrisées.
- Difficulté de transposer à échelle 1, en raison des effets du nombre de Reynolds.

# TECHNIQUES DE REDUCTION DU BRUIT Inspirées par le biomimétisme ETAT DE L'ART



## 1 - Tubercules de bord d'attaque

Les tubercules des nageoires de baleines à bosses améliorent les performances hydrodynamiques lors des manoeuvres rapides (prédation). Elles retardent le décrochage et améliorent la portance en post-décrochage.



Ondulations de bord d'attaque sur profils

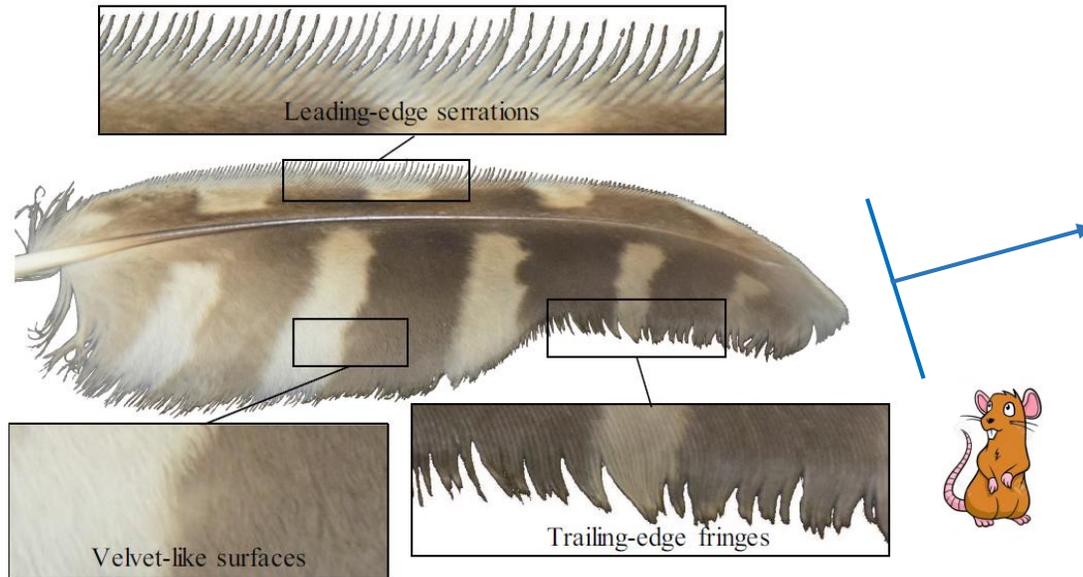
Indépendamment, les ondulations de bord d'attaque réduisent le bruit d'impact de turbulence.



D. Pierce Website

## 2 - Indentations de bord de fuite

Les franges de bord de fuite minimisent le bruit de bord de fuite des ailes de chouettes, et contribuent, avec d'autres aspects dans la structure du plumage et le duvet des pattes, à rendre leur vol silencieux (prédation)



*Inserts sur pales existantes*



Im. Brunel University London

Liu et al - Unsteady bio-fluid dynamics in flying and swimming, Acta Mech. Sin.



<https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=silent+flight+of+owl+bbc>

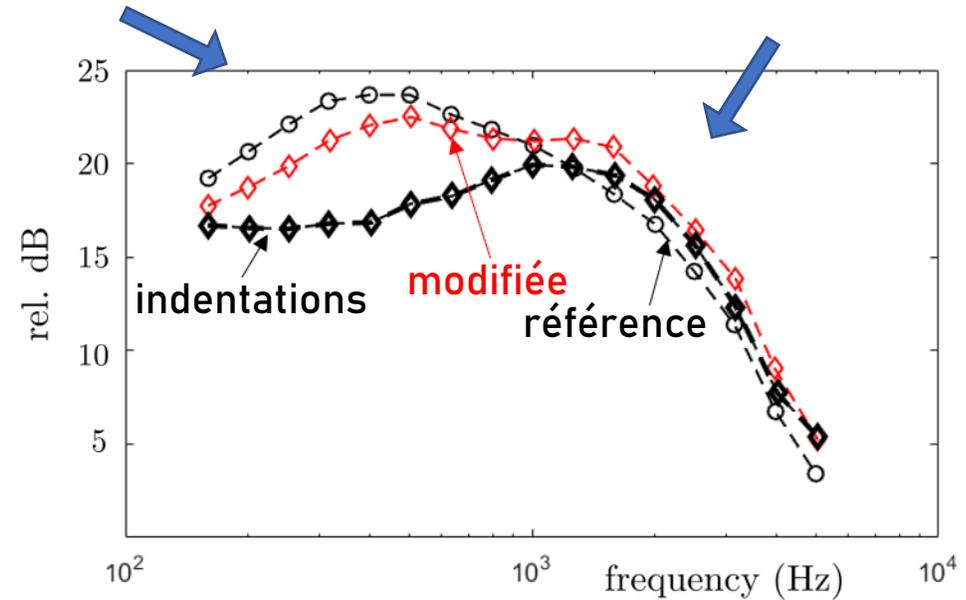


## 2 - Indentations de bord de fuite

*modifiée*: redefinition de la section de pale

Réduction en basses  
et moyennes  
fréquences

Régénération en hautes fréquences,  
moins pénalisante pour les grands  
distances d'écoute.



Oerlemans S., Fisher M., Maeder T. & Kögler K., Reduction of Wind Turbine Noise Using Optimized Airfoils and Trailing-Edge Serrations, AIAA J. 47(6), 2009.



## 2 - Indentations de bord de fuite

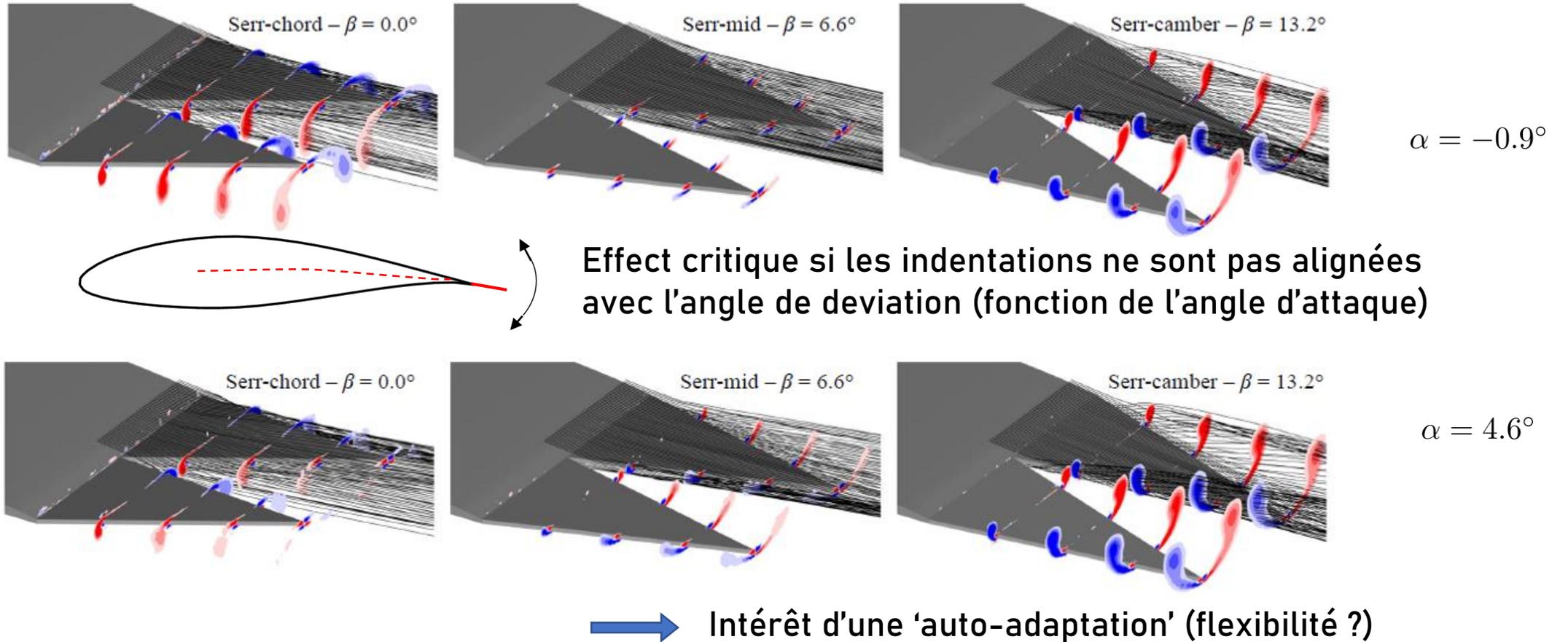
Aspects communs (ondulations/indentations):

- Interactions locales de structures turbulentes avec le profil des pales, signature acoustique modulée par la rotation mais pas cruciallement dépendante de la rotation
- Nécessité d'adapter la géométrie aux échelles de la turbulence pour garantir l'efficacité.
- Régénération de bruit possible en haute fréquence, du fait de la production de structures turbulentes plus fines (planche suivante).
- Solutions rarement étudiées en régime dynamique.



# Régénération en hautes fréquences

Profil NACA 64-618 airfoil, simulations LBM [1]

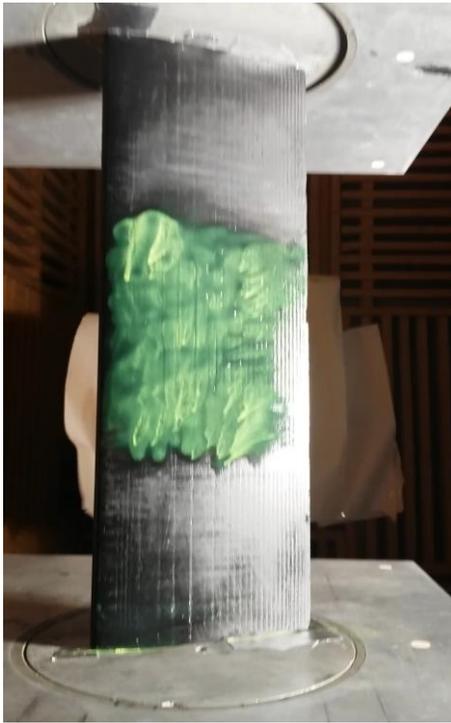


[1] Romani G., Computational aeroacoustics of rotor noise in novel aircraft configurations, PhD dissertation TUD, 2022.

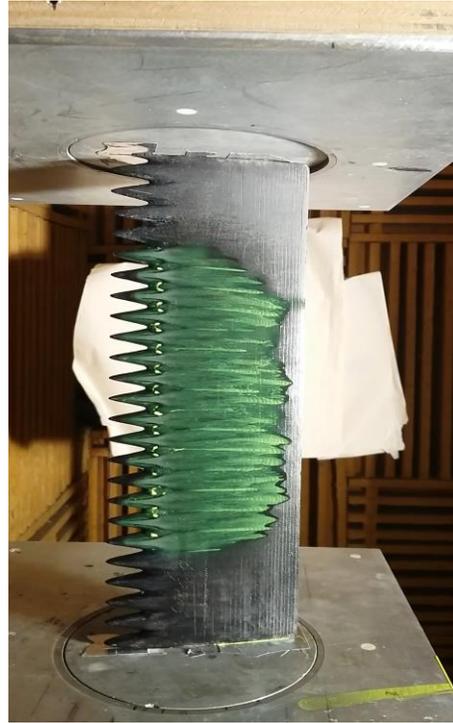
## Bruit de profils en décrochage (NACA-0012)

Effet des indentations de bord d'attaque, écoulement de la gauche vers la droite

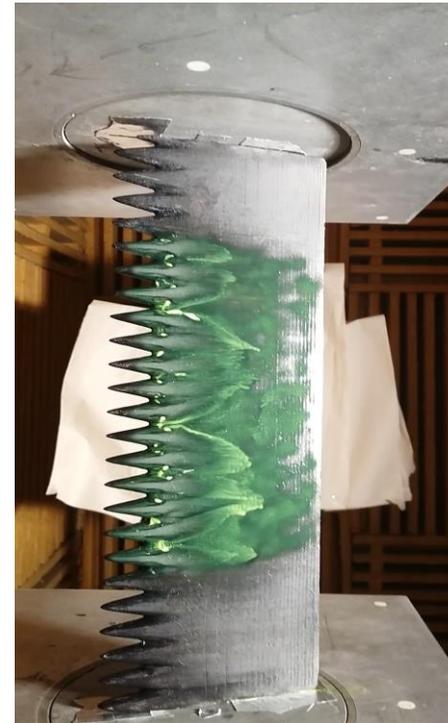
*Profil de référence en écoulement sain*



*Ondulations, écoulement sain, régime attaché*



*Ondulations, écoulement sain, régime de décrochage*



*Ondulations, écoulement turbulent, régime de décrochage*



*Source : Projet SmartAnswer*

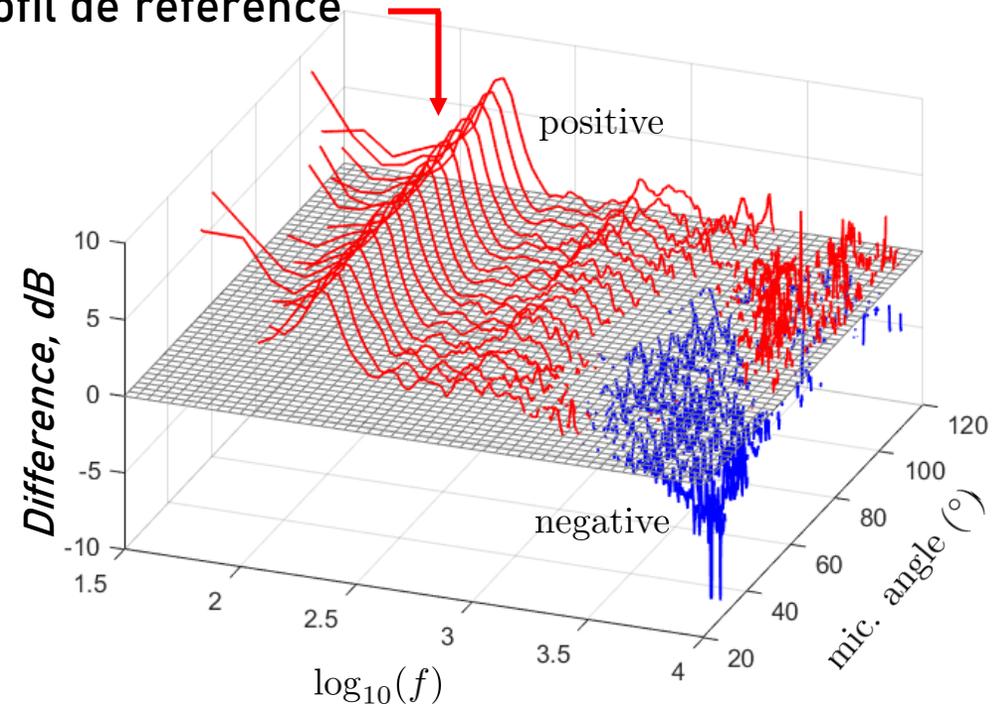
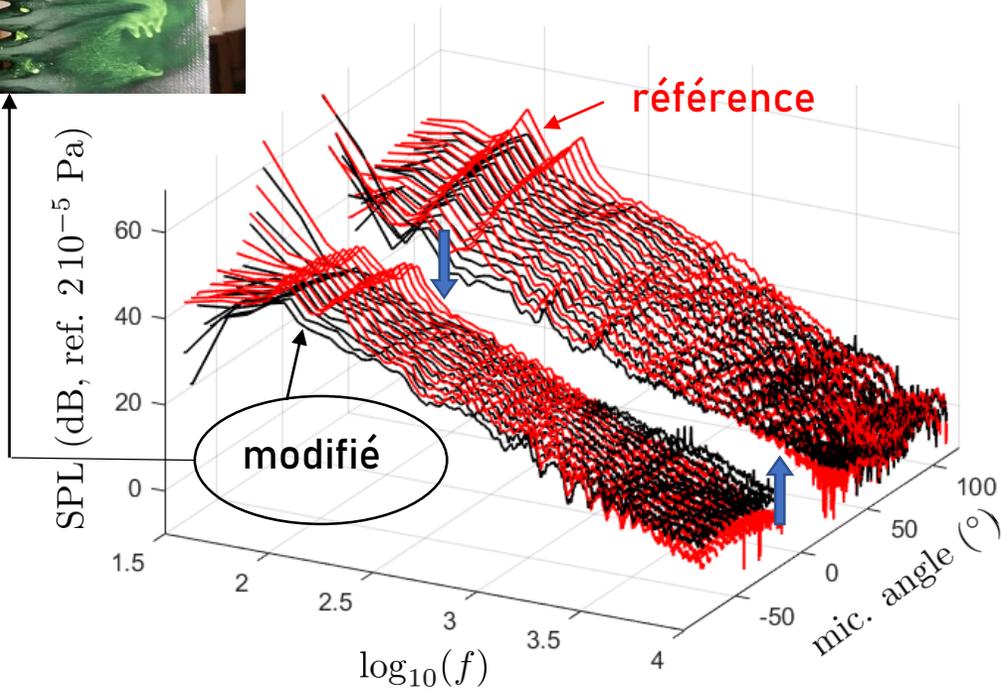
# Effet des ondulations de bord d'attaque sur le bruit de décrochage

décrochage



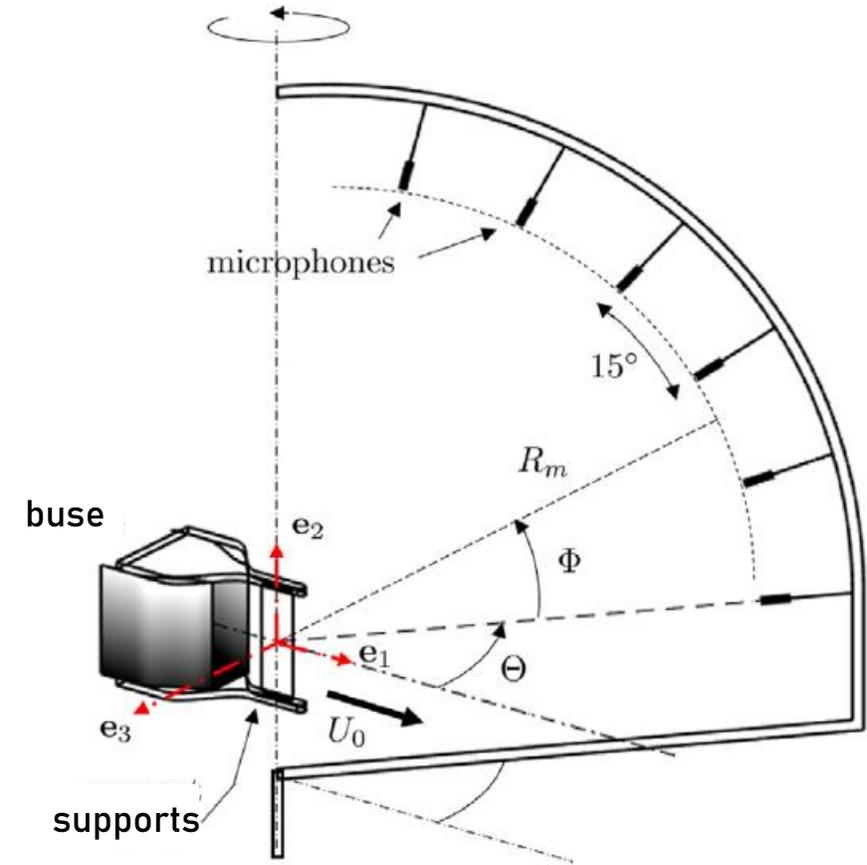
(NACA-0012, essais statiques en soufflerie)

Origine: bosse en basse fréquence avec le profil de référence



## Réduction du bruit d'impact de turbulence

Intérêt (indépendamment du régime) :  
interactions de sillages dans les parcs éoliens.

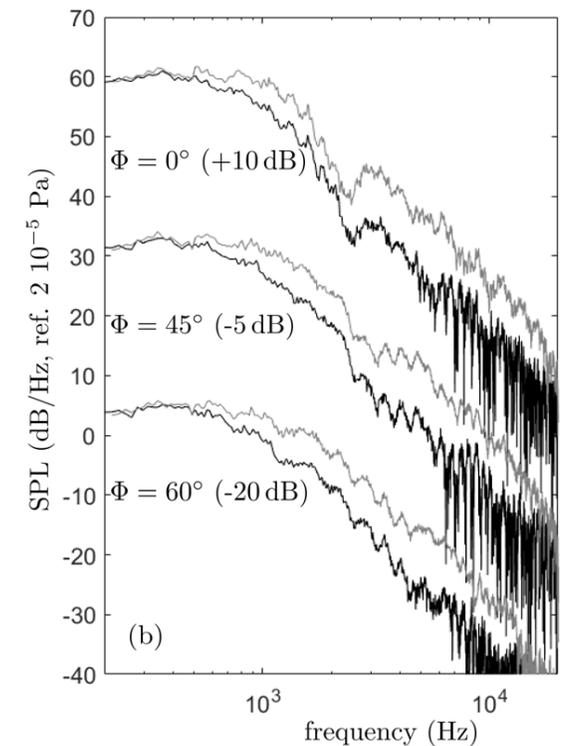
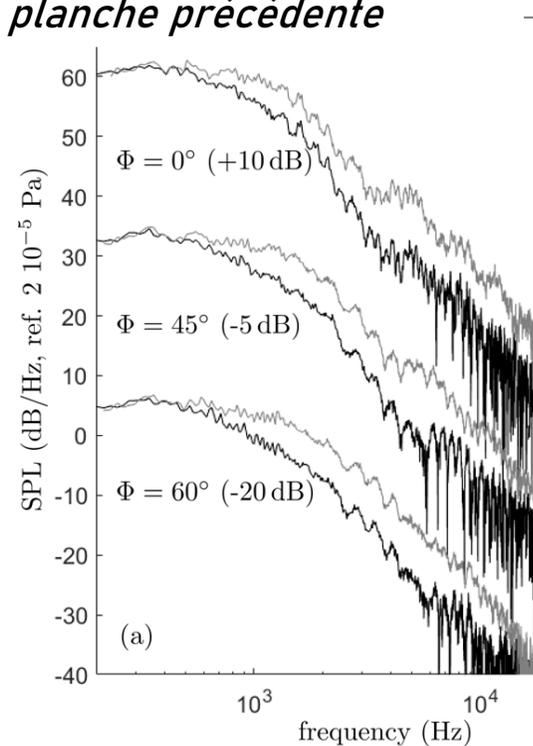
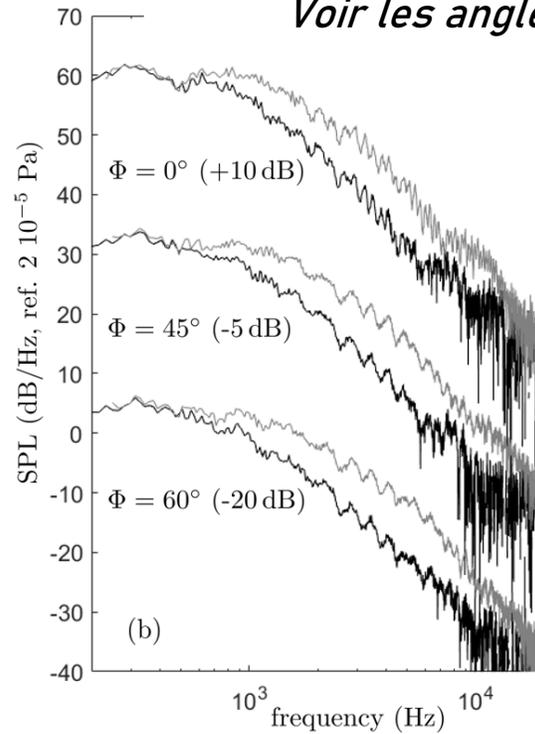
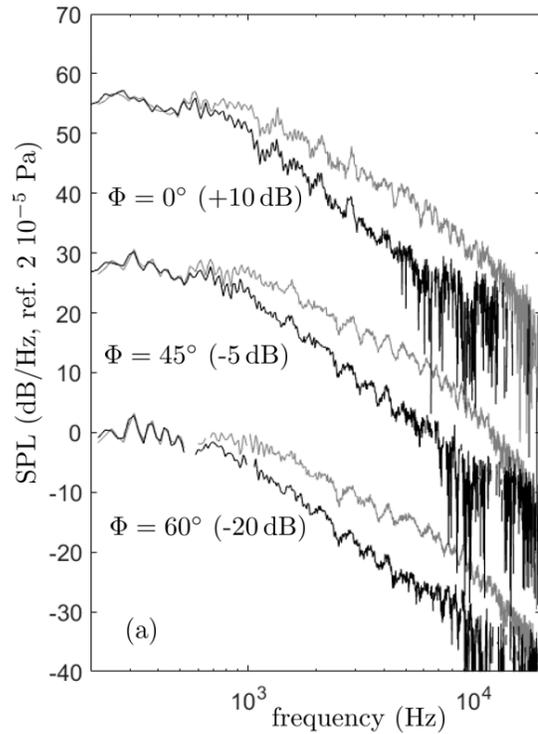


Montage pour l'étude du bruit d'impact [1]

[1] Bampanis et al, On a three-dimensional investigation of airfoil turbulence-impingement noise and its reduction by leading-edge tubercles, JSV 520, 2022.

## Réduction du bruit d'impact de turbulence

*Voir les angles planche précédente*



La réduction est d'autant plus efficace que la fréquence augmente (masquage en HF par le bruit de bord de fuite). Des modèles analytiques récents existent [1].

[1] Lyu & Ayton, Serrated leading-edge and trailing-edge noise prediction models for realistic wavenumber frequency spectra. 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics, paper 2019-2674, 2019.

## PROGRAMME DE RECHERCHE DU PROJET PIBE, AXE 3

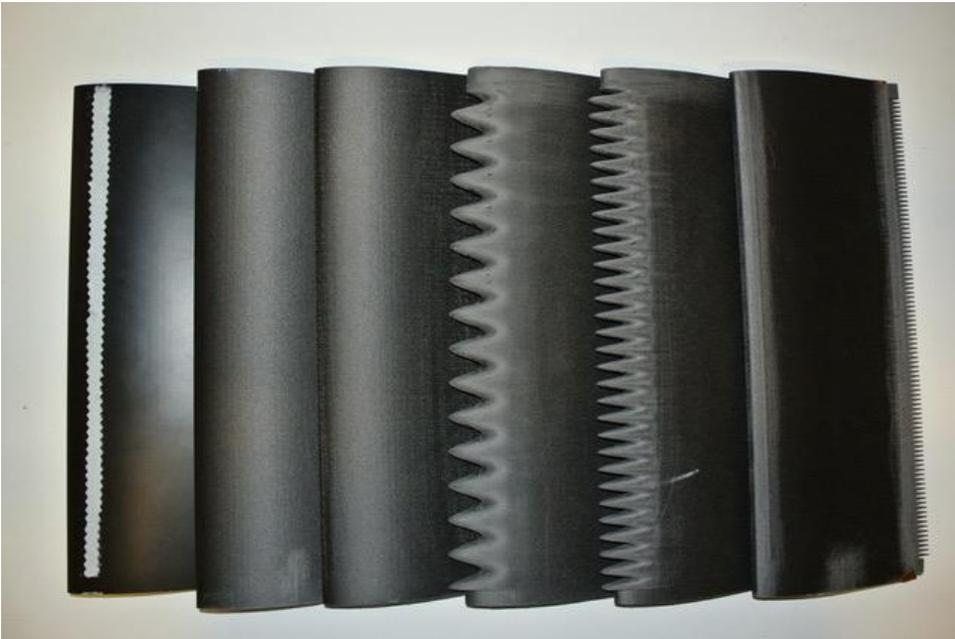
**But : évaluer certains dispositifs passifs (ondulations au bord d'attaque et peignes de bord de fuite), et constituer une base de données ouverte.**

- Essais réalisés à 25 et 50 m/s, à différents angles d'attaque, avec différentes versions du profil 63(3)-418 modifié par indentations de bord de fuite et/ou ondulations de bord d'attaque.
- Régimes statique et dynamique, mesures aérodynamiques (balance d'efforts) et acoustiques.

# 1 - Résumé des observations en régime statique

Mesures à 90° par rapport au flux incident

N1 N2 N3 N4 N5 N6



*Maquettes à surface totale constante.*

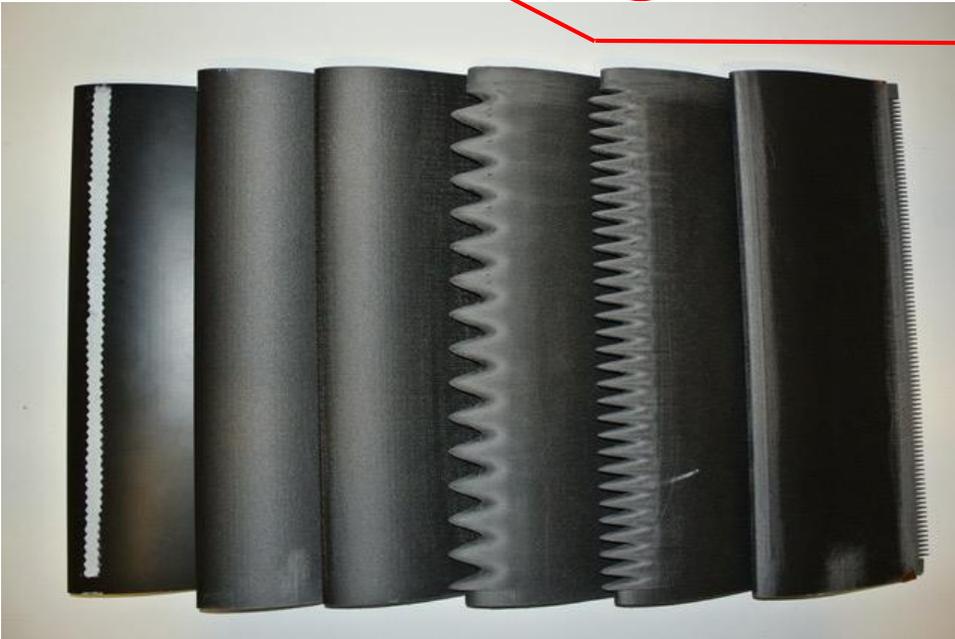
Angles testés: 6°, 10°, 15°, 18°, 22°, 27°

- Les peignes (dents de scies) au bord de fuite (N6) apportent une réduction du bruit aux hautes et moyennes fréquences (et la suppression des sifflements liés aux instabilités laminaires) aux angles d'attaque modérés.
- Le bénéfice est perdu aux grands angles, avec augmentation aux basses et moyennes fréquences.

# 1 - Résumé des observations en régime statique

Mesures à 90° par rapport au flux incident

N1 N2 N3 N4 N5 N6



*Maquettes à surface totale constante.*

Angles testés: 6°, 10°, 15°, 18°, 22°, 27°

- Sauf aux très basses fréquences (suspectes) et à 18°, les petites ondulations réduisent le bruit à large bande.
- Le pic du bruit de décrochage en basse fréquence (22°) est supprimé.
- Les grandes ondulations entraînent une augmentation du bruit dans quasiment tous les cas, et de façon dramatique à partir de 22°.

*Lien avec la taille des cellules de décrochage ?*

# RAPPEL

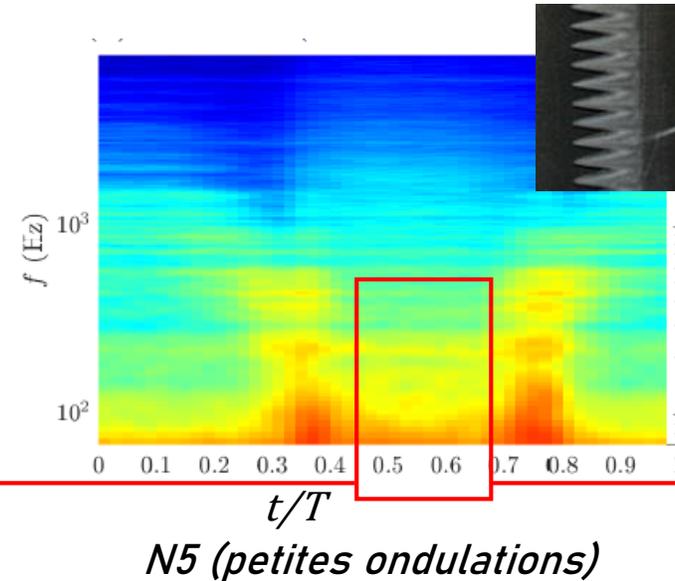
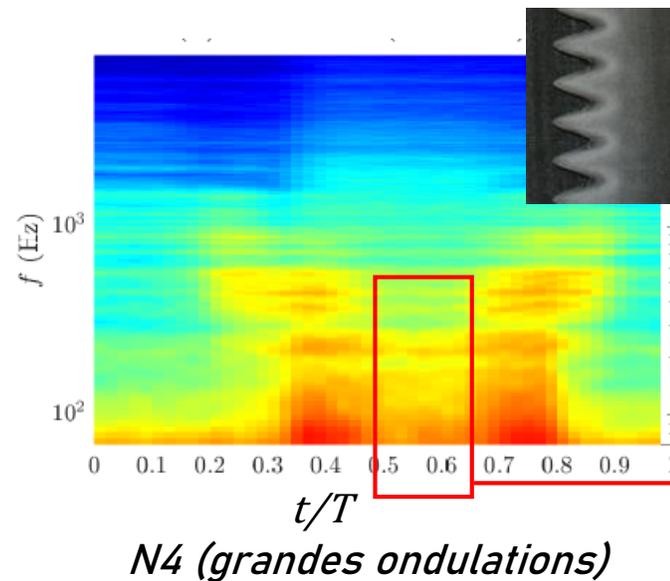
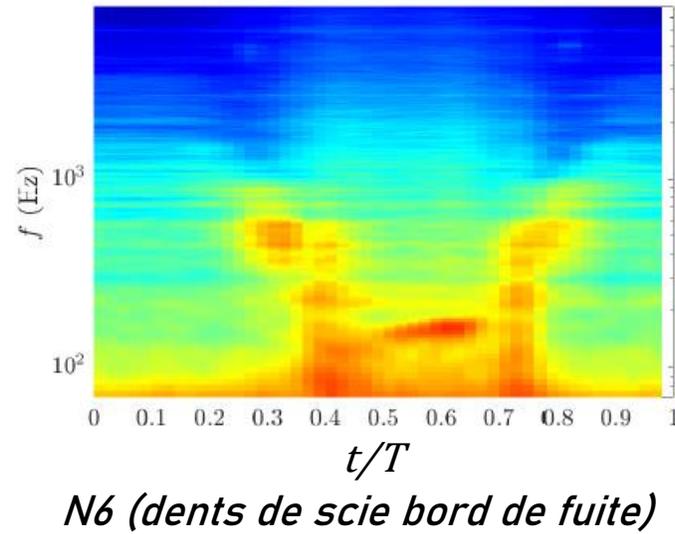
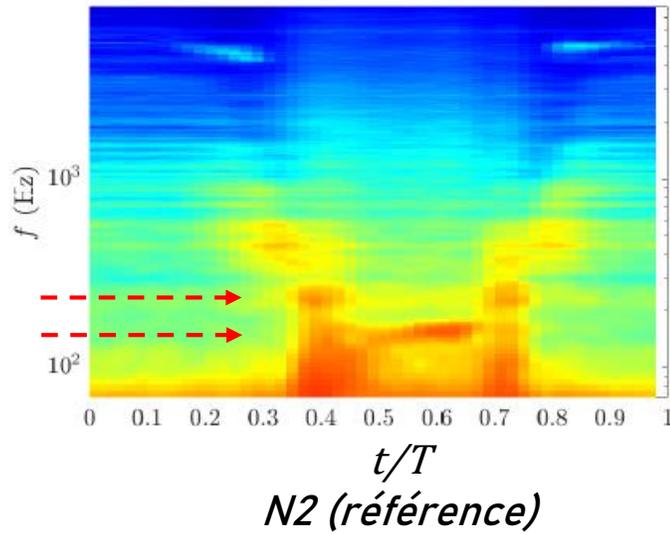
## Installation en chambre anéchoïde de l'ECL

Arcs de microphones, angles par rapport à direction du flux incident



Micro 14  
90° intrados,  
rive droite

Micro 1  
90° extrados



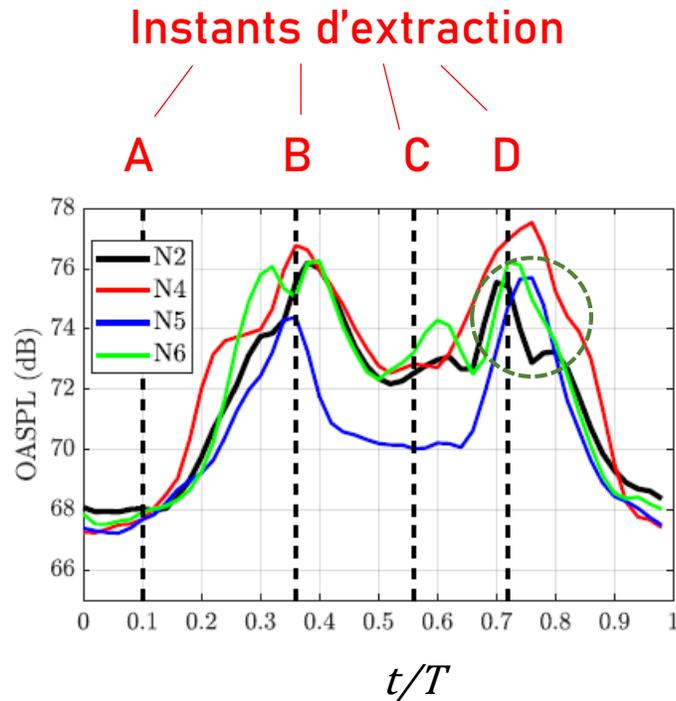
## 2 - Observations en régime de décrochage dynamique (spectrogrammes)

Angle moyen  $15^\circ$ ,  
 amplitude  $15^\circ$ , vitesse 50  
 m/s, fréquence  
 adimensionnelle  $k = 0.01$ .

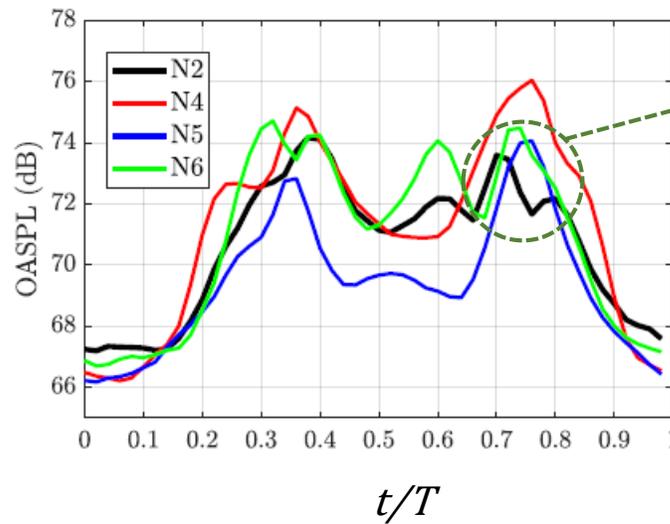
Phase décrochée (voir  
 diapo suivante): disparition  
 du pic en basse fréquence

## Traitement des données des spectrogrammes

Niveau global entre 75 Hz et 1000 Hz



M14, 90° rive droite

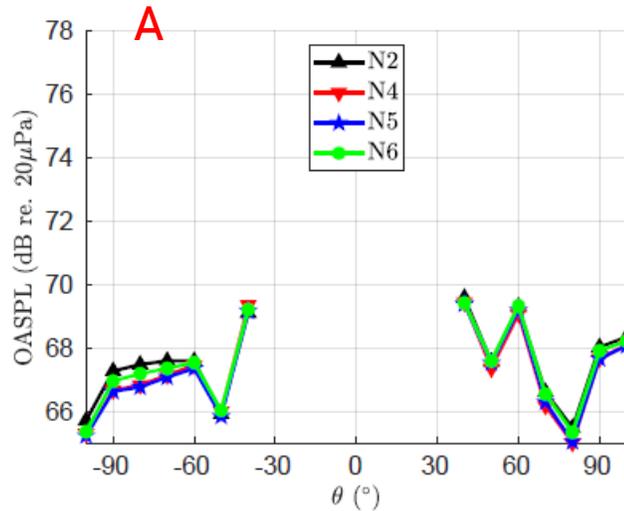


M1, 90° rive gauche

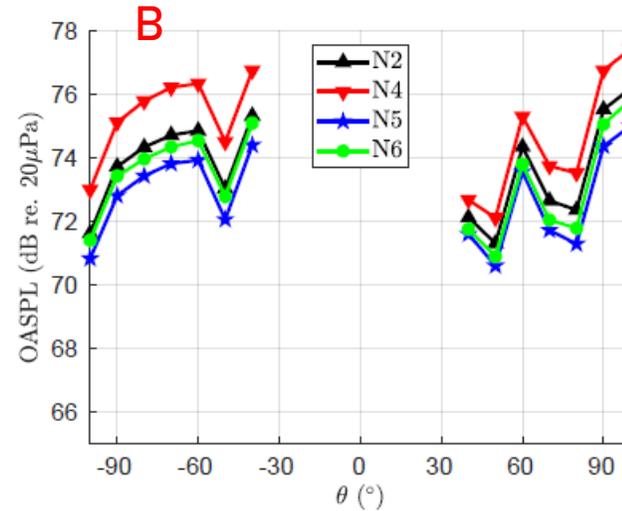
Seule phase  
d'augmentation du bruit  
avec le profil N5 (petites  
ondulations)

**Attention:** les conclusions  
peuvent varier beaucoup  
selon l'instant d'extraction

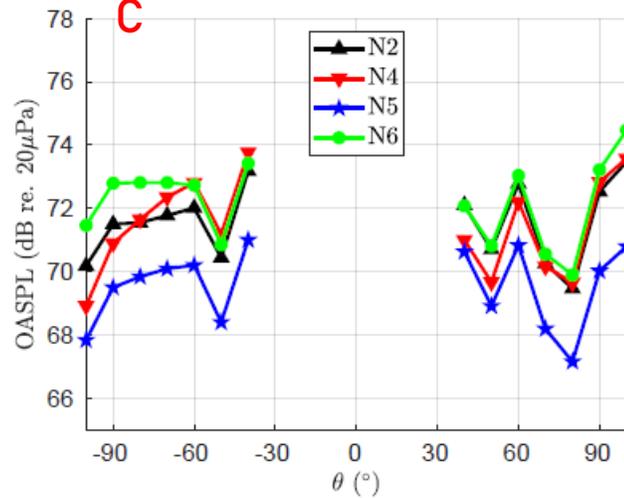
## Directivités intégrées de 75 Hz à 1000 Hz



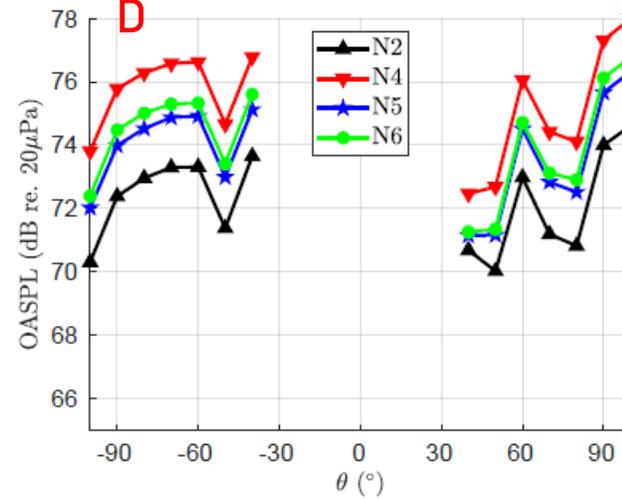
$t/t_c = 0.10$  phase attachée



$t/t_c = 0.36$  décollement



$t/t_c = 0.56$  décrochage



$t/t_c = 0.72$  recollement

- La mauvaise performance du profil N4 est confirmée.

- Les dispositifs n'ont pratiquement aucun effet dans la phase attachée.

- Le profil N5 réduit notablement le bruit dans la phase décrochée, le réduit un peu au premier pic mais l'augmente au second pic (recollement).

## QUELQUES CONCLUSIONS

1 - Les peignes au bord de fuite sont inefficaces lorsque l'angle d'attaque augmente, ce qui est attribué au fait que les dents devraient être 'orientables' en fonction de la déviation au bord de fuite. Ils n'apportent pas de bénéfice concluant en régime dynamique.

2 - Les ondulations trop larges au bord d'attaque engendrent une augmentation de bruit pénalisante.

3 - Des ondulations étroites semblent, au contraire, très prometteuses comme dispositif de réduction du bruit de décrochage, en statique et en dynamique:

4 - Les résultats sont très sensibles aux paramètres géométriques, ce qui rend la transposition d'autant plus risquée que cette dernière se doit de compenser les effets du nombre de Reynolds.

un effet des  
cellules de  
décrochage ?

# COMPLEMENTS

## Considérations liées à la transposition

1 - Le nombre de Reynolds (bâti sur la corde) typique des grandes éoliennes est au-delà de  $5 \cdot 10^6$ , les essais étant réalisés à  $10^5 - 5 \cdot 10^5$ . Un nombre de Reynolds 10 fois trop petit donne des couches limites notablement plus épaisses, rapportées à la corde.

- Pour les peignes de bord de fuite, le rapport d'échelle entre longueur d'onde et corde doit être multiplié par 0.6 pour la transposition à échelle 1.

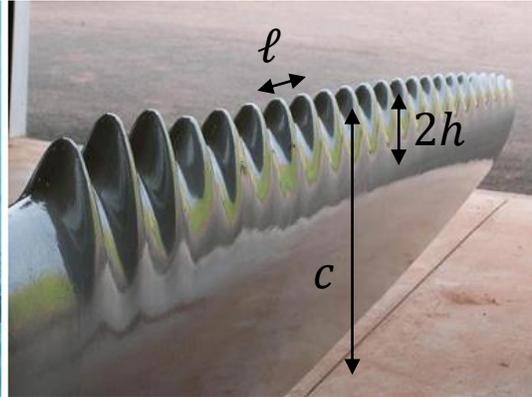
2 - Les effets du nombre de Reynolds sur le décrochage, statique ou dynamique, pour des profils à bord droit et à bord ondulé, restent à évaluer.

3 - Les essais en soufflerie sont faits sur profils rectangulaires, avec des échelles des zones décollées du même ordre que la corde et/ou l'envergure. Des effets d'installation sont attendus. Le décrochage sur portion de pale de grand allongement en rotation peut être différent.

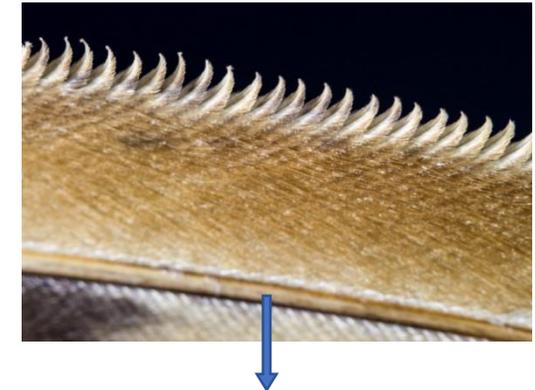
4 - Les fréquences réduites sont estimées autour de  $k^* \approx 1.1 \cdot 10^{-3}$  à échelle 1; elles sont typiques du régime quasi-stationnaire, sur la base des variations lentes liées à la rotation. Les essais de PIBE correspondent à ce régime. Mais doit-on attendre des fréquences caractéristiques plus élevées en cas de bouffées rapides ou lors du passage devant le mât ?

## Générateurs de tourbillons

L'effet de réduction du bruit d'impact de turbulence par ondulations du bord d'attaque est avéré, pour des échelles intégrales de turbulence  $\Lambda$  comparables à celles des ondulations (longueur d'onde  $\ell$ ). Des tests ont montré le manque d'efficacité si  $\ell \ll \Lambda$ .



$$\frac{2h}{c} \sim 0,15$$

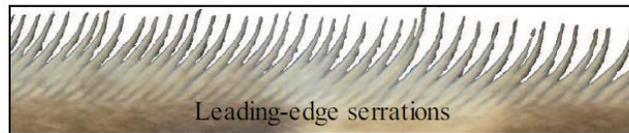


(à distinguer des peignes de bord d'attaque des ailes de chouettes, qui agissent à très petite échelle sur la couche limite)

*Davantage similaire à l'effet des générateurs de tourbillons du point de vue des échelles*

## Générateurs de tourbillons

Solution non étudiée dans PIBE



Génération de petits filaments tourbillonnaires agissant sur les écoulement de proche paroi; réduction des décollements.

