

# Modulation d'amplitude du bruit éolien

## Matthew Cand

Hoare Lea  
155 Aztec West  
Almondsbury  
Bristol BS32 4UB  
Royaume Uni  
E-mail : matthewcand@hoarelea.com

## Résumé

À proximité d'une éolienne, le bruit produit par la rotation des pales est toujours modulé : ce qui est une caractéristique fondamentale de ce type de source. Cette propriété est bien connue et a fait l'objet de modèles validés avec succès. La situation est plus complexe quand on considère le bruit d'une éolienne isolée ou d'un parc éolien à plus grande distance. Dans certains cas, des modulations de bruit marquées ont été observées, avec certaines propriétés qui n'ont pas été expliquées par les modèles standards, et qui représentent une source potentielle de gêne acoustique. Un vaste projet de recherche initié au Royaume Uni a conclu que le détachement de l'écoulement de l'air autour de la pale durant une partie de la rotation pourrait expliquer certains cas de modulation dite « atypique ». Ceci semble être confirmé par d'autres expériences dans lesquelles le niveau de modulation a été réduit en appliquant des modifications à certaines turbines. Ce projet a aussi identifié l'absence de méthode standard et objective pour quantifier le niveau de modulation observée dans les mesures acoustiques. Certaines techniques furent proposées à cet effet et développées par un groupe créé par l'Institut d'Acoustique (IOA) du Royaume Uni. La méthode finale publiée en 2016 par ce groupe est efficace en pratique, même en présence de sources de bruit parasites. Le débat sur la manière de contrôler ce bruit spécifique se poursuit.

## Summary

Modulation of the noise or 'swish' is always present close to a rotating wind turbine, and represents an inherent and well-understood feature of wind turbine noise. However, on some wind farm sites, higher levels of modulation have sometimes been measured in the far-field, with characteristics which cannot be accounted for by standard models. A large multidisciplinary research project was undertaken in the UK on this subject, comprising theoretical and experimental investigations. A causal mechanism for this atypical or "other" modulation was proposed: the occurrence of stall on the blade only during part of the rotation. Subsequent work demonstrated that implementing mitigation measures resulted in a clear reduction of the far-field AM, providing further confirmation of the source mechanism identified. Research has also identified objective techniques to quantify levels of modulation in field measurements. These techniques were developed by a working group of the UK Institute of Acoustics. A final method published in 2016 was shown to work well in practice, even in the presence of corrupting sources of noise. The debate on how to control this aspect of the noise is still ongoing.



À proximité d'une éolienne<sup>1</sup>, il est clair que le volume du bruit produit varie de manière régulière avec la rotation des pales : c'est ce que nous appelons la modulation d'amplitude (MA) du bruit. Cette modulation a fait l'objet de plusieurs études menées depuis le début du développement de l'éolien, parallèlement à un débat général sur l'acceptabilité du bruit généré par les éoliennes.

Toutefois, certains cas ont été recensés dans lesquels la modulation était citée comme une source de gêne particulière ; de plus, les caractéristiques atypiques du bruit observées ne pouvaient pas être expliquées par les modèles théoriques standards, qui étaient pourtant bien validés en pratique à proximité des éoliennes. Plusieurs projets de recherche concernant les sources et la propagation de ce bruit éolien ont donc été engagés. Ils avaient

pour but, entre autres, d'essayer d'expliquer la différence entre une modulation d'amplitude "normale", bien comprise, et cette "autre" MA. Plusieurs études ont aussi considéré le développement de techniques pour mesurer et quantifier le niveau de modulation, et la réponse subjective à ce caractère du bruit. Dans les deux cas, le niveau des connaissances était moins développé que pour d'autres aspects du bruit éolien, comme la tonalité.

Un vaste projet de recherche au Royaume-Uni sur ce sujet, comprenant des études théoriques et pratiques, a donné lieu à publications en 2013. Par la suite, certaines hypothèses ont été confirmées par d'autres expériences.

<sup>1</sup>-NDLR : En anglais, les éoliennes étant appelées "Wind Turbines", l'auteur utilisera les deux termes indifféremment.

Plus récemment, d'une méthode pour quantifier le niveau de modulation a été développée. Le Gouvernement du Royaume Uni a publié une autre étude faisant la synthèse des effets de la gêne due au bruit de MA. Cet article présente un résumé de ces résultats et de l'état actuel des connaissances à ce sujet.

## Contexte

L'interaction entre le vent et la surface des pales d'une turbine génère un bruit aérodynamique. On dit que ce bruit est modulé en amplitude quand le niveau de bruit varie de manière périodique. Pour un observateur fixe, la période de ces fluctuations correspond à la fréquence avec laquelle les pales passent devant un point fixe (« fréquence de passage de pale »). Cette modulation d'amplitude (MA) est toujours présente à proximité d'une turbine en fonctionnement, produisant un bruit de type « swish » ou « woosh ». Le bruit aérodynamique d'une turbine moderne est dominé par celui généré au bord de fuite : il est produit quand la couche limite turbulente de l'écoulement interagit avec le bord fin des pales. Même dans un cas d'écoulement régulier, la directivité de cette source de bruit combinée avec la rotation de la pale fait que, pour un observateur fixe situé près de l'éolienne, l'amplitude du bruit varie de manière périodique avec le passage de chaque pale. Ceci est une caractéristique inhérente au fonctionnement d'une éolienne, et a été baptisée « modulation normale ». Ce type de modulation a été prédit par des modèles théoriques qui ont été validés avec succès par des mesures expérimentales [1]. Le modèle développé combine la directivité du bruit de bord de fuite et un effet doppler lié au mouvement de la pale. Des fluctuations périodiques du niveau de bruit de l'ordre de 5 ou 6 dB (A) sont estimées à proximité de l'éolienne (champ proche), en travers du vent (à 90 degrés de la direction du vent). Ce même modèle prévoit de faibles modulations, de moins de 3 dB (A), pour un observateur aligné avec la direction du vent : sous le vent ou contre le vent (à 0 ou 180 degrés de la direction du vent). Ces prédictions ont été validées par des mesures à proximité d'une éolienne. Ceci correspond à la « modulation d'amplitude normale » ou MAN. À des distances plus éloignées, typiques des riverains de parcs éoliens, les résultats sont moins clairs mais de nombreuses observations suggèrent que la modulation en champ lointain est généralement limitée. Au Royaume Uni, une campagne de mesures [2] a été lancée suite à des plaintes de ce qui était décrit à l'origine comme du bruit de basses ou très basses fréquences pour certains parcs éoliens. Elles ont montré que c'était en fait la modulation du bruit (large-bande) produit par la turbine, à la fréquence de passage de pale, qui pouvait expliquer les plaintes reçues. Un sondage des autorités locales du Royaume Uni [3] a suggéré par ailleurs qu'il ne s'agissait que de cas isolés plutôt que d'un problème très répandu. À peu près au même moment, on a relevé plusieurs cas de modulation élevée en champ lointain de parcs éoliens en Europe (par exemple [4,5]), dans la direction sous le vent. Dans ces cas, des variations de l'ordre de 5 à 10 dB (A), étaient parfois observées : plus importantes que dans le cas de la MAN. De plus, le caractère du bruit était parfois décrit comme plus sourd ou impulsif (plutôt comme un « whoomp » qu'un « woosh ») avec une plus

forte dominance des fréquences dans la région de 200 à 400 Hz. Ces caractéristiques ne pouvaient pas être expliquées par le modèle standard de la MAN : ceci suggère donc que d'autres mécanismes à la source ou durant la propagation, ou une combinaison des deux, étaient en œuvre pour expliquer ce phénomène, qui fut donc nommé « modulation d'amplitude « autre » » ou MAA.

Autour de 2010, ce phénomène a commencé à être reconnu [6], mais les causes de cette MAA n'étant pas maîtrisées, il n'était pas possible pour les constructeurs de turbines ou les développeurs de parcs éoliens de prévoir son occurrence ou de mettre en place des mesures pour pallier ce phénomène.

## Un mécanisme pour la MAA

Un vaste projet de recherche a été commandé en 2011 par RenewableUK, l'association du secteur éolien au Royaume-Uni dont les résultats ont été publiés en 2013. Après des études préliminaires, le modèle de MAN décrit ci-dessus [1] a d'abord été développé en incluant un vent entrant avec une distribution non-uniforme [8]. La première conclusion de ce modèle était que même avec un fort gradient vertical de vent (cisaillement), cela ne suffisait pas pour prédire un grand changement dans la modulation produite et ses caractéristiques. Ceci confirmait d'autres résultats de chercheurs indépendants [9].

Ce modèle a donc été développé en ajoutant la possibilité que l'écoulement sur les pales puisse se décrocher pour une partie de la rotation. Dans ce modèle, l'augmentation de la vitesse du vent entrant causée par le cisaillement du vent, et perçue par la pale de la turbine en rotation, correspond à une augmentation de l'angle d'attaque du vent sur la pale. Dans certaines conditions, cet effet peut causer un décrochage de l'écoulement sur une portion limitée de la pale, durant une courte partie de la rotation, comme illustré par exemple dans la figure 1. Un fort gradient vertical de vent est un exemple simple de condition non-homogène mais d'autres situations plus complexes pourraient aussi générer des effets de décrochage intermittent similaires.

Quelle que soit la cause de ce décrochage localisé, celui-ci génère un bruit avec des caractéristiques différentes du bruit classique de bord de fuite, comme une amplitude plus forte avec plus de basses fréquences et une directivité différente, normale à la pale (Figure 1). Le modèle développé prédit que ceci engendrerait une modulation avec des propriétés très différentes de celles de la MAN. En particulier, le changement de la directivité de la source fait que la modulation est générée sous le vent et contre le vent, au contraire de la MAN qui est dominante en vent de travers : voir Figure 2.

Comme la propagation du bruit est en général plus favorable sous le vent, c'est dans cette direction que le niveau général du bruit est le plus élevé en champ lointain. Comme cette « autre » modulation prédite avec un décrochage intermittent est présente sous le vent, sa propagation serait aussi favorable. Ceci pourrait expliquer les observations faites en pratique pour la MAA. Une modulation forte a également été observée en pratique contre le vent en champ lointain dans certains cas, cependant plus rares, et ceci serait aussi compatible avec ce modèle.

Cette combinaison d'un décrochage transitoire sur les pales, correspondant à un changement radical de la directivité à la source, avec des effets de propagation classiques, a donc été retenue comme un mécanisme pouvant potentiellement expliquer les caractéristiques de la MAA. Cela voudrait dire que des effets à la source seraient principalement en cause. Une hypothèse portant uniquement sur des effets de propagation particuliers a été également proposée, mais elle ne pouvait pas expliquer toutes les caractéristiques de la MAA.

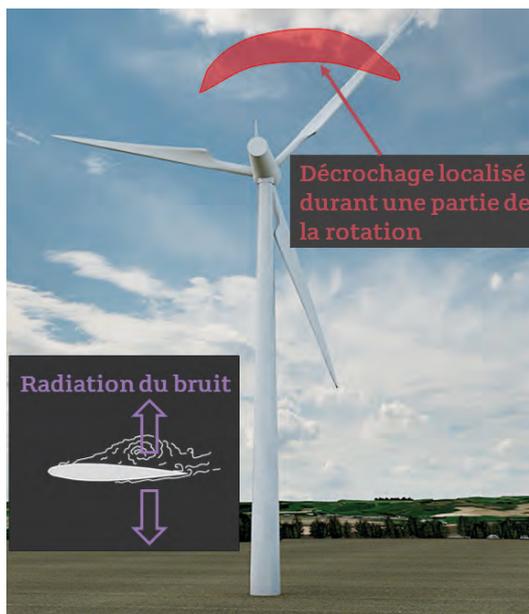


Fig. 1 : Représentation schématique d'un décrochage localisé de l'écoulement et du rayonnement acoustique (radiation du bruit) de la pale correspondant à un décrochage  
*Illustration of detached flow over part of the rotation (partial stall)*

## Validation

### Mesures sur sites éoliens

Des mesures détaillées sur plusieurs sites éoliens ont aussi été mises en place pour le projet de recherche de RenewableUK [10], en particulier sur un site où la MAA était présente. Le but était d'étudier précisément les caractéristiques et la directivité de ce bruit. La modulation a été mesurée en détails à différentes distances des éoliennes, en champs proche et lointain soit environ 1,3 et 10 fois le diamètre du rotor de l'éolienne la plus proche. Des mesures fines du bruit ont été effectuées (10 fois par seconde), ainsi que des mesures des paramètres de fonctionnement des turbines et du profil du vent à un intervalle de 1 ou 3 secondes.

Une analyse détaillée de la modulation permet d'identifier certaines périodes où la MAA était présente quand une éolienne fonctionnait et les éoliennes adjacentes étaient arrêtées : ceci semblait donc exclure que l'interaction entre les éoliennes puisse être une cause principale de ce phénomène. Pendant des périodes de modulation marquée, le niveau de turbulence du vent n'était pas forcément élevé : ceci semblait donc aussi exclure la turbulence comme une cause probable.

Les niveaux élevés de modulation ont été relevés quand la distance séparant les éoliennes augmentait. De plus, la directivité de la MAA en champ lointain était forte sous le vent et limitée en vent de travers, contrairement à la situation en champ proche. La figure 3 montre un exemple de mesures simultanées dans des directions différentes. Ces résultats sont compatibles avec les prédictions du modèle théorique qui inclue un décrochage partiel, et qui est dû à la directivité spécifique de cette source sur la pale. En même temps, en champ proche, le phénomène inverse a été observé : une modulation ne dépassant pas 6 dB (A) et qui était surtout présente en vent de travers mais peu sous le vent, ce qui est typique de la MAN.

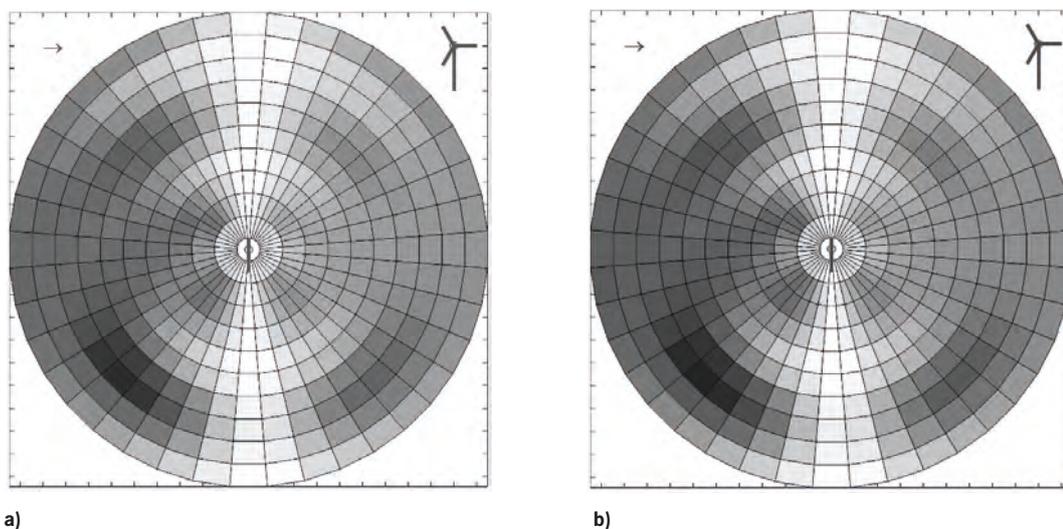


Fig. 2 : Grille de bruit calculée dans [8] pour des conditions de cisaillement modérées et pour a) écoulement laminaire sur la pale et b) écoulement détaché. Cette figure montre une vue aérienne de l'éolienne, avec le vent soufflant de gauche à droite. Ceci illustre que la modulation est dominante en conditions de vent de travers pour a) et sous/contre le vent pour b).  
*Sample predicted noise footprints calculated for moderate wind shear for a) attached flow and b) partially detached flow. This shows an aerial view of the turbine, with wind blowing from left to right, variations in noise levels from black to white illustrate the presence of modulation. The pattern illustrates that modulation is mainly present in the cross-wind in a) (no stall) and up and down-wind for b) (stall case). Figures from [8].*

La MAA n'était donc pas présente en champ proche des éoliennes même durant des périodes où elle était observée en champ lointain : ceci est probablement dû à des effets de directivité de cette source élevée. Ceci représente un défi majeur pour cette source de bruit, qui la différentie des autres aspects du bruit éolien qui peuvent être évalués en champ proche.

Le niveau de modulation pour la MAA observée en champ lointain est manifestement très variable, ce qui suggère l'influence des effets de propagation. Les paramètres fonctionnels et météo ont été étudiés pour des périodes de modulation importantes : dans certains cas, la relation avec le taux de gradient vertical du profil de vent pouvait être claire mais dans d'autres cas, elle était limitée voire négative. Dans un autre cas, une période de modulation forte a été observée alors que le gradient vertical du vent diminuait rapidement, et que l'angle effectif du vent sur les pales semblait changer rapidement.

Ces résultats, bien que non définitifs au vu de la complexité du phénomène, semblent compatibles avec le modèle de source proposé pour la MAA.

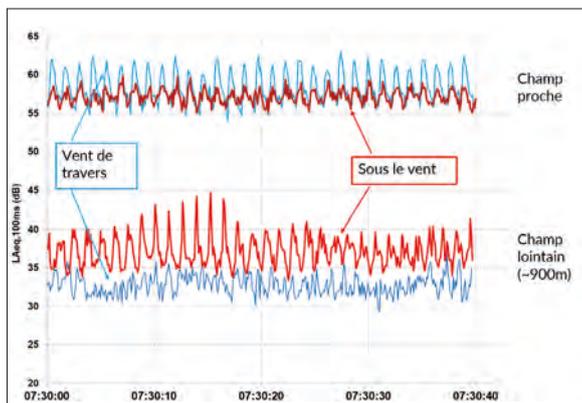


Fig. 3 : Évolution simultanée des niveaux  $L_{Aeq, 100ms}$  mesurés sur un site éolien pour une période de modulation atypique, à deux distances (champ proche et champ lointain), sous le vent et contre le vent

*Simultaneous time history of measured  $L_{Aeq, 100ms}$  levels for a sample OAM period showing: two far-field (downwind and cross-wind) and two near-field locations (cross- and down-wind)*

### Études complémentaires

Il n'était pas possible, dans les campagnes expérimentales sur sites éoliens décrites ci-dessus [10], de faire des mesures sur les pales et donc d'identifier directement un décrochage de l'écoulement. Mais parallèlement à ce travail, Madsen et son équipe [11] avaient fait des expériences avec des turbines dont les pales étaient instrumentées, avec des mesures de pression sur la surface et de l'angle d'attaque du vent. Leur analyse a montré une variation cyclique de cet angle d'attaque, qui, quand elle est importante (pour des cas de gradient de vent élevé), est associée à un décrochage périodique de l'écoulement en évidence sur la pale. Madsen a également présenté des résultats théoriques dont furent déduits des éléments de design des pales et des éoliennes associés à un risque plus élevé de décrochage. Il indiquait des solutions qui, en théorie, pourraient réduire ce risque et donc potentiellement l'incidence de la MAA.

### Études d'atténuation

Des études expérimentales d'atténuation de la modulation entreprises sur deux sites différents où la MAA était parfois présente, ont été publiées en 2015 [12]. La prévalence de la modulation a été analysée avant et après avoir mis en œuvre certains aménagements qui visaient à la réduire. Dans les deux cas, des réductions importantes ont été observées.

La figure 4 montre les résultats de l'analyse pour un des deux sites, qui compte plus de cinq éoliennes d'une capacité de plus de deux mégawatts chacune, dans un terrain relativement plat. Des mesures acoustiques ont été faites à une distance d'environ un kilomètre des éoliennes les plus proches, après que certains résidents aient porté plainte à cause du bruit. À certaines périodes, surtout en conditions de cisaillement élevé du vent, des occurrences de MAA ont été observées à ces positions.

Pour ce site, le fonctionnement des turbines implémenté dans le programme de contrôle, a été modifié. L'algorithme régulant l'angle de calage des pales de la turbine qui décrit leur rotation autour de leur axe, a été ajusté afin de réduire l'angle d'attaque du vent de plusieurs degrés. Ceci a été mis en œuvre dans une plage de vitesse de vent pour laquelle la plus forte présence de MAA a été détectée.

Une métrique qui représente la magnitude de la modulation (en décibels) a été déterminée toutes les 10 secondes, à partir du spectre en 1/3 d'octaves mesuré à avec une durée d'intégration de 100 millisecondes. La figure 4 montre une forte réduction du niveau de modulation typique pour la plage de vitesse de vent dans laquelle les mesures d'atténuation ont été mises en place (4 à 7 m/s). Les riverains ont noté une nette réduction du bruit gênant après les modifications.

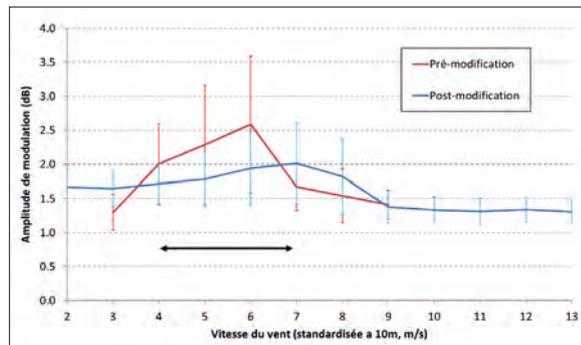


Fig. 4 : Étude statistique des valeurs de modulation détectées en champ lointain avant et après la mise en œuvre de mesures visant à atténuer la MA [12]. Les barres d'erreur représentent une déviation standard autour de la moyenne (ligne épaisse). Ces mesures ont été mises en place dans l'intervalle de 4 à 7 m/s (flèche horizontale) *Statistical analysis of rated AM magnitude for the periods analysed both pre- and post-mitigation, as a function of wind speed. Mitigation was applied in the range of 4 to 7 m/s. Error bars represent one standard deviation (average + 1 deviation noted by thinner line). Results at one site and one location from [12]*

Un autre site éolien a été étudié pour lequel les mesures d'atténuation mises en place ont consisté en des modifications physiques des pales, qui visaient à réduire la probabilité de décrochage de l'écoulement. Une réduction importante du niveau de modulation a également été observée.

Ces résultats renforcent donc l'hypothèse du mécanisme de MAA proposé ci-dessus, car dans les deux cas, les mesures mises en place à la source avaient pour but de réduire ce décrochage intermittent identifié comme la cause la plus probable de la gêne.

## Mesurer et évaluer la modulation

### Définir l'amplitude de la modulation

La « profondeur » ou amplitude de la modulation peut être définie par la différence entre les « bosses » et les « creux » du niveau instantané du bruit avec une résolution de moins d'une seconde. Dans certains cas, la modulation est clairement visible dans le graphe des niveaux  $L_{Aeq, 100\text{ ms}}$  que mesurent les instruments modernes (moyenne énergétique du bruit chaque 100 millisecondes, soit 10 fois par seconde). Mais définir la magnitude de cette modulation de manière objective et robuste, reproductible et capable d'être appliquée à des mesures dans des conditions réelles, représente un problème plus difficile qu'il n'y paraît à première vue.

La modulation du bruit éolien a une caractéristique qui aide à sa détection : son caractère périodique. La fréquence de cette modulation est liée à la vitesse de rotation de l'éolienne et au nombre de pales. L'analyse de Fourier de l'enveloppe de magnitude du signal (par exemple le  $L_{Aeq, 100\text{ ms}}$ ) permet donc d'identifier cette modulation de manière objective.

White [13] montre que ceci représente une manière optimale de déterminer les paramètres de la modulation dans un sens statistique précis, particulièrement pour un signal à bande fréquentielle limitée. Plusieurs publications ([14], [15] par exemple) ont utilisé cette approche, mais avec des paramètres d'analyse et une normalisation des résultats qui varient selon les auteurs. Un défi important en pratique est d'appliquer ces techniques non pas seulement à de simples signaux artificiels mais aussi à des mesures réelles sur le terrain, qui sont souvent corrompues par un nombre de sources de bruit non liées aux éoliennes.

### Méthode de l'IOA

L'Institut d'Acoustique du Royaume Uni (« Institute of Acoustics » ou IOA) a créé en 2014 un groupe de travail dédié à la recherche d'une méthode adaptée à l'analyse de la modulation du bruit éolien. Après un rapport préliminaire et une période de consultation, le résultat de ce travail a été publié en 2016 [16]. Le document publié par l'IOA ne donne pas de critère ou de limite pour le niveau de modulation.

Le rapport final comprend une méthode de référence détaillée ainsi qu'une méthode indicative. Cette dernière, basée sur [17], est plus simple car elle utilise directement des indices standards mesurés par des sonomètres modernes, mais est moins robuste que la méthode de référence car plus sensible aux sources qui ne sont pas liées aux turbines éoliennes.

La méthode de référence détermine un niveau de modulation (en décibels) par périodes de dix minutes. Elle est basée sur une transformée de Fourier du signal  $L_{Aeq, 100\text{ ms}}$ , à partir de laquelle la fréquence fondamentale de modulation, liée à la vitesse de rotation des pales de la turbine, est isolée. Ceci permet ensuite d'identifier d'éventuelles deuxième et troisième harmoniques du pic fondamental. Ces composantes principales du signal sont isolées et reconstituées dans le domaine temporel en utilisant une transformée de Fourier inverse. Une simple analyse statistique (comme dans [17]) est ensuite utilisée pour détermi-

ner la profondeur de la modulation : des études montrent des résultats équivalents à ce que donnerait une analyse plus détaillée de chaque pic et creux de la modulation. Le signal d'entrée, après pondération A, est aussi limité en trois bandes fréquentielles : 50-200 Hz, 100-400 Hz et 200-800 Hz. Ceci permet de tenir compte des variations dans les fréquences qui dominent la modulation suivant les caractéristiques de différents sites et/ou différents modèles de éoliennes.

L'expérience montre qu'en pratique, la MA des turbines est sujette à des variations temporelles souvent très importantes et peut parfois n'apparaître que pendant de très courtes périodes isolées. C'est pour cela que le signal est séparé en périodes de dix secondes qui sont analysées indépendamment. Par période de dix minutes, le résultat est basé sur les 10 % les plus élevés de chaque bloc individuel de dix secondes. Ce résultat représente donc un niveau élevé pour cette période.

Certaines sources de bruit dans l'environnement, comme les chants d'oiseaux, ont des variations qui peuvent être identifiées comme des sources de modulation et donc corrompre l'analyse, même après application du filtrage en fréquence. Toutefois, il est possible de tenir en compte du caractère relativement constant du bruit éolien. La méthode proposée inclut un test qui vérifie que chaque pic de modulation identifié soit suffisamment clair ou proéminent. Ce pic doit aussi être situé dans une bande de fréquence de modulation qui correspond aux caractéristiques de la turbine. Un autre test mis en place vérifie que la majorité des périodes étudiées toutes les dix minutes ait un pic qui soit proéminent de la même manière. Le groupe de travail a constaté que ce test est en pratique très efficace pour exclure la majorité des périodes corrompues et de faux résultats [16]. La méthode est même capable de détecter la présence de modulation durant la journée, malgré la présence de sources comme l'activité humaine ou le bruit d'oiseaux, qui font que, souvent, l'analyse de bruit éolien en champ lointain est restreinte aux périodes nocturnes. Un exemple de code en langage Python qui met en œuvre la routine de base de la méthode de référence a été publié [18]. D'autres équipes de recherche ont aussi exploré l'application de cette méthode avec succès [19].

### Vers une pénalisation de la MA ?

Plusieurs études ont été publiées sur la gêne subjective causée par le bruit éolien modulé : voir par exemple [14,20,21]. Ces résultats suggèrent que, si la présence de modulation semble influencer la gêne occasionnée, le niveau global du bruit (indiqué par l'indice  $L_{Aeq}$  ou similaire) est un facteur plus important.

Le Gouvernement du Royaume Uni a commandé une étude sur le sujet, afin de recommander la manière selon laquelle cette composante du bruit éolien doit être évaluée et contrôlée. Le résultat de cette étude a été publié [22] en octobre 2016. Ce rapport recommande en particulier qu'une pénalité de 3 à 5 décibels (Figure 5) soit appliquée au niveau global du bruit pour tenir compte de la présence de MA élevée dans le signal. Cette majoration dépend du niveau de modulation calculé avec la méthode de l'IOA décrite ci-dessus. Mais elle ne serait appliquée que pour l'évaluation du niveau de bruit dans le cadre du régime appliqué au Royaume Uni, et seulement pour de nouveaux parcs éoliens. Les auteurs de ce rapport [22] font plusieurs recommandations mais expliquent que le niveau des connaissances

dans ce domaine est limité et que les conséquences du régime qu'ils ont proposé devraient continuer d'être testées et examinées dans les prochaines années.

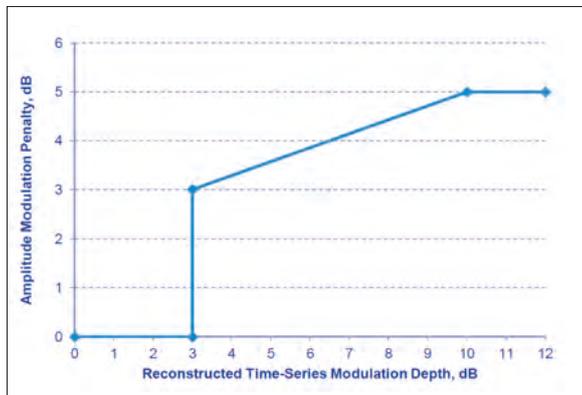


Fig. 5 : Niveau de majoration recommandé dans [22] en fonction du niveau de modulation calculé suivant la méthode de référence dans [16]  
Proposed AM level penalty regime proposed in [22], based on the output of the reference metric of [16]

## Conclusions

Il y a déjà plus de 13 ans, plusieurs mesures avaient démontré la présence d'une modulation d'amplitude du bruit produit par certains parcs éoliens qui était atypique et inexplicable. Certains de ces cas représentaient une gêne pour les riverains de ces éoliennes. Depuis, il y a eu beaucoup de progrès dans le niveau des connaissances à ce sujet. Il y a de bonnes raisons de penser que certains des cas de modulation élevée sont causés par un phénomène à la source : un détachement intermittent de l'écoulement sur la pale. Ceci a permis d'orienter le développement de mesures d'atténuation de ce phénomène. Le succès de certaines de ces stratégies a été démontré sur des parcs éoliens en fonctionnement dans des conditions réelles. Ces connaissances peuvent aussi aider les constructeurs de turbines et de pales à optimiser leur design pour minimiser le risque de cet aspect du bruit éolien.

Les techniques de détection et de mesure de la profondeur de modulation ont aussi fait d'énormes progrès. Il est donc probable qu'une approche standard internationale à ce sujet soit développée dans un futur proche. Le Gouvernement du Royaume Uni a produit des recommandations pour évaluer et pénaliser cette modulation, et qui pourraient donc faire partie du contrôle routinier de parcs éoliens construits à partir de maintenant, d'une manière similaire aux majorations pour la présence de tonalité qui sont mis en place au Royaume Uni et ailleurs. Mais les détails de ces procédures et de leur application font encore le sujet de nombreux débats.

Il faut aussi reconnaître que ce sujet reste très complexe, si on considère la relation avec les phénomènes aéro-acoustiques sur la pale ainsi que l'interaction avec les paramètres de fonctionnement et de contrôle de la turbine, les conditions atmosphériques sur la totalité du rotor, la propagation du bruit ainsi que les interactions potentielles entre les éoliennes [23]. L'auteur considère que cet aspect du bruit éolien devrait être le sujet de plus de recherches en Europe et ailleurs.

## Remerciements

Cet article résume une partie d'un projet de recherche qui a été financé par RenewableUK. De nombreux auteurs ont contribué à ce projet, y compris : Malcolm Smith et Paul White (Institute of Sound & Vibration Research, Southampton), Robert Davis (Robert Davis Associates) et Stefan Oerlemans (NLR/Siemens).

Le groupe de travail de l'IOA est aussi salué pour sa contribution importante au savoir dans ce sujet.

## Références bibliographiques

- [1] Oerlemans, S. and Schepers, G., Prediction of Wind Turbine Noise Directivity and Swish, Third International Meeting on Wind Turbine Noise Aalborg Denmark 17 - 19 June 2009
- [2] Hayes McKenzie Partnership, The Measurement of Low Frequency Noise at Three UK Wind Farms, Report for the Department of Trade and Industry (UK), contract W/45/00656/00/00, 2006
- [3] Moorhouse, A., Hayes, M., von Hünerbein, S., Piper, B. and Adams M., Research into Aerodynamic Modulation of Wind Turbine Noise, Report by the University of Salford for the Department for Business, Enterprise and Regulatory Reform, URN 07/1235, Contract NANR233, 2007
- [4] Van den Berg, F., Effects of the Wind Profile at Night on Wind Turbine Sound, J. Sound Vib., 277 (4-5), pp. 955-970. 2004
- [5] Di Napoli, C., Long Distance Amplitude Modulation of Wind Turbine Noise, 4th International Conference on Wind Turbine Noise, Rome, 12-14 April 2011
- [6] Bullmore, A., Jiggins, M., Cand, M., Smith, M., von Hünerbein, S. and Davis, R., Wind Turbine Amplitude Modulation: Research to Improve Understanding as to its Cause & Effect, Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise, Rome, Italy 12-14 April 2011
- [7] Wind Turbine Amplitude Modulation: Research to Improve Understanding as to its Cause and Effect, Renewable UK, December 2013. <http://www.renewableuk.com/default.asp?page=IndustryStatementOAM>
- [8] Oerlemans, S. An explanation for enhanced amplitude modulation of wind turbine noise, Netherlands National Aerospace Laboratory (NLR), report NLR-CR-2011-071. Included in [7], 2011
- [9] Boorsma, K., Schepers, J. G. Enhanced Wind Turbine Noise Prediction Tool SILANT, Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise, Rome, Italy, 2011
- [10] Cand, M., Bullmore, A., Wilson, B. Renewable UK research Work Package D (WPD) - Measurement and Analysis of New Acoustic Recordings. Included in [7], 2012
- [11] Madsen, H. A., Fischer A. and Kragh K. A., Mechanisms and Causes of Amplitude Modulation (AM) and Other Amplitude Modulation (OAM) of Aeroacoustic Wind Turbine Noise, Technical University of Denmark report I-0095. Included in [7], 2013
- [12] Cand M., Bullmore, A., Measurements demonstrating mitigation of far-field AM from wind turbines, 6th International Meeting on Wind Turbine Noise, Glasgow 20-13 April 2015
- [13] White, P. The Measurement and Definition of Amplitude Modulations, RenewableUK AM Research, Work Package WPB1, 2012
- [14] Lee, S., Kim, K., Lee, S., Kim, H., and Lee, S., An estimation method of the amplitude modulation in wind turbine noise for community response assessment, Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, DK, June 2009
- [15] Lundmark, G., Measurement of Swish Noise; a New Method. Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise, Rome, Italy 12-14 April 2011
- [16] Institute of Acoustics (IOA), Amplitude Modulation Working Group, Final Report, A Method for Rating Amplitude Modulation in Wind Turbine Noise, June 2016. <http://ioa.org.uk/publications/wind-turbine-noise>
- [17] Fukushima, A., Yamamoto et. al., Study on the amplitude modulation of wind turbine noise: Part 1 - Physical investigation, Proc Internoise 2013
- [18] <https://sourceforge.net/projects/iaa-am-code/>
- [19] A. Fukushima, H. Tachibana, Comparison of the IOA method and Japanese F-S method for quantitative assessment of amplitude modulation of wind turbine noise - A study based on the field measurement results in Japan. 7th International Conference on Wind Turbine Noise, Rotterdam - 2nd to 5th May 2017
- [20] Yokoyama, S., Koboyashi, T., Sakamoto, S., & Tachibana, H., Subjective experiments on the auditory impression of the amplitude modulation sound contained in wind turbine noise. 6th International Meeting on Wind Turbine Noise, Glasgow
- [21] Work Package B (2): Development of an AM Dose-Response Relationship, University of Salford Manchester, Sabine von Hünerbein, Andrew King, Benjamin Piper, Matthew Cand. Included in [7].
- [22] Review of the evidence on the response to amplitude modulation from wind turbines, Wind Turbine AM Review: Phase 2 Report, WSP for UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy. <https://www.gov.uk/government/publications/review-of-the-evidence-on-the-response-to-amplitude-modulation-from-wind-turbines>
- [23] E. Barlas, W. J. Zhu, W. Z. Shen, K. O. Dag, P. Moriarty, Investigation of Amplitude Modulation Noise with a Fully Coupled Noise Source and Propagation Model, 7th International Conference on Wind Turbine Noise, Rotterdam - 2nd to 5th May 2017