

Estimation d'erreur de propagation acoustique dans la CFD

A. Chelius

Onera, 29 avenue de la Division Lelerc, 92322 Châtillon, France
alain.chelius@onera.fr

On étudie dans cet article les pertes numériques subies par les ondes acoustiques propagées dans des calculs CFD (Computational Fluid Dynamics), et on cherche à les évaluer afin de contrôler la précision des prévisions acoustiques qui en découlent. On propose d'estimer l'erreur de propagation en se basant sur une analyse préalable des propriétés propagatives du solveur CFD *elsA* de l'Onera. L'influence de différentes caractéristiques physiques et numériques sur la dissipation et la dispersion est mesurée avec des calculs de propagation acoustique académiques. Les résultats de cette analyse permettent de mettre en place une base de données d'erreur acoustique dépendant des trois principaux paramètres identifiés : la distance de propagation, le nombre de points par longueur d'onde et le nombre de CFL. Dans un second temps, on utilise cette base de données pour estimer a priori ou a posteriori l'erreur acoustique d'un calcul CFD. On réalise ainsi un outil modélisant la propagation et fournissant pour chaque fréquence d'intérêt une cartographie d'erreur acoustique dans le domaine de calcul. L'outil est ici adapté aux configurations d'hélices simples ou contrarotatives. Il est illustré par deux calculs différents simulant une même configuration.

1 Introduction

La simulation du bruit d'origine aérodynamique s'appuie aujourd'hui souvent sur des approches dites hybrides, où les sources acoustiques sont déterminées par résolution numérique des équations de Navier-Stokes, puis la propagation du bruit en champ lointain est réalisée via une analogie acoustique (Kirchhoff, Ffowcs-Williams & Hawkings [1]) ou une résolution des équations d'Euler.

La qualité de propagation des ondes au sein du calcul CFD est déterminante pour l'étape de calcul acoustique suivante. Si les configurations académiques autorisent l'emploi de méthodes numériques d'ordre élevé qui permettent une propagation précise, les applications complexes ou à grand nombre de Reynolds sont souvent réalisées avec des schémas d'ordre deux en temps et en espace et sur des maillages irréguliers. Les ondes acoustiques sont alors soumises à de la dissipation et de la dispersion, dues à la fois aux schémas numériques du solveur, à la résolution du maillage et aux paramètres physiques du calcul. Il est donc important d'être en mesure de quantifier l'erreur commise par le calcul CFD sur les ondes acoustiques, afin de vérifier la fiabilité de la prévision acoustique pour laquelle il a été réalisé.

Souvent, si elles ne sont pas omises, les qualités propagatives d'un calcul CFD sont jugées à partir de la résolution du maillage et du nombre de points par longueur d'onde à partir duquel l'utilisateur estime que l'acoustique est correctement propagée. S'il n'a pas été défini au travers d'une étude paramétrique préalable et est appliqué comme une règle arbitraire, ce critère est trop approximatif au regard du degré de précision qui est aujourd'hui attendu de ces calculs. Une telle étude a été réalisée par Wilson [2] sur les solveurs de plusieurs centres de recherches européens. Bien qu'il retrouve des comportements similaires entre les codes, comme la pente de la dissipation par longueur d'onde (λ) en fonction du nombre de points par longueur d'onde, la disparité entre les solveurs est importante. Par exemple, l'erreur de dissipation des solveurs uRANS (unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes) va de 0.2 à 2.5 dB/ λ pour une résolution moyenne de 14 points par longueur d'onde. Enfin, le critère du nombre de points par longueur d'onde seul ne suffit pas pour quantifier l'erreur sur l'acoustique propagée.

L'objectif des présents travaux est donc d'être en mesure d'évaluer a priori l'erreur acoustique en chaque point d'un maillage CFD, constituant ainsi une cartographie de l'erreur attendue. On propose d'estimer cette erreur de propagation en fonction du maillage en se basant sur une

analyse préalable des propriétés propagatives du solveur CFD, ici le code *elsA* de l'Onera [3, 4]. Dans un premier temps, l'influence de différentes caractéristiques physiques et numériques sur la dissipation et la dispersion est mesurée avec des calculs de propagation d'ondes acoustiques académiques. Les résultats de cette analyse permettent de mettre en place une base de données d'erreur acoustique en fonction des principaux paramètres identifiés. Dans un second temps, on utilise cette base de données pour estimer a priori ou a posteriori l'erreur acoustique d'un calcul aérodynamique. On réalise ainsi un outil modélisant la propagation et fournissant pour chaque fréquence d'intérêt une carte d'erreur acoustique dans le domaine de calcul. L'outil est ici adapté aux configurations d'hélices simples ou contrarotatives. Il est illustré par deux calculs différents simulant une même configuration.

2 Mesure d'erreur de propagation

L'erreur de propagation d'une onde acoustique lors d'un calcul aérodynamique prend deux formes : la dissipation et la dispersion. Elles se traduisent respectivement par une diminution progressive de l'amplitude de l'onde et une modification de sa vitesse de propagation. En comparant une onde calculée et la solution exacte, Figure 1, on mesure l'erreur selon trois grandeurs :

- E_{max} , la différence des niveaux maximums pris sur la longueur d'onde exacte
- E_{inf} , la différence locale entre les deux signaux
- ϕ , la différence locale de phase entre les deux ondes

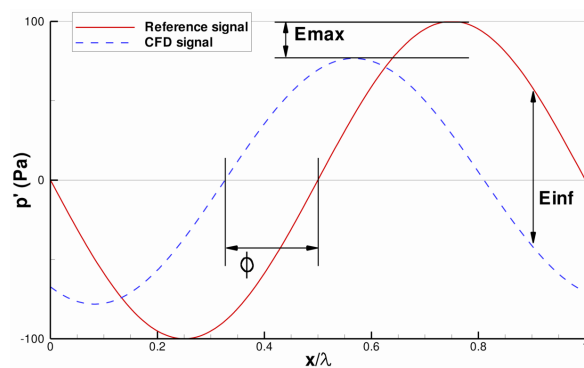


FIGURE 1 – Définition des mesures d'erreurs numériques sur une longueur d'onde de pression.

L'erreur E_{max} n'est pas une grandeur locale, mais est néanmoins représentative de la dissipation subie par une

onde sur le trajet parcouru. Le déphasage ϕ correspond au retard de l'onde propagée numériquement, et représente donc directement l'effet de la dispersion. L'erreur E_{inf} est la conséquence locale des deux effets combinés.

La première étape de cette étude est de suivre l'évolution de ces grandeurs en fonction de différents paramètres sur des calculs CFD simples. Si ce type d'exercice a déjà été réalisé par Wilson, il reste nécessaire car les résultats dépendent fortement de l'implémentation du solveur utilisé, et parce qu'il permet de créer la base de donnée qui sert dans la seconde partie de ces travaux. On étudie ainsi la propagation acoustique en mesurant les grandeurs E_{max} et ϕ à chaque longueur d'onde parcourue. *elsA* résout les équations de Navier-Stokes par une formulation volumes finis, sur des blocs de maillages structurés. On fait donc l'approximation que l'erreur numérique a un comportement isotrope si la grille est cartésienne isotrope, et par conséquent les calculs sont réalisés en 2D, sur des maillages similaires à celui présenté Figure 2. L'onde acoustique introduite dans le calcul est plane, ce qui permet de suivre son évolution sans qu'elle subisse de décroissance naturelle. On impose des conditions aux limites de périodicité dans les direction x et y . Enfin, on ne s'intéresse ici qu'à la propagation acoustique linéaire, l'amplitude de l'onde est donc faible (100 Pa) devant les conditions ambiantes (101325 Pa).

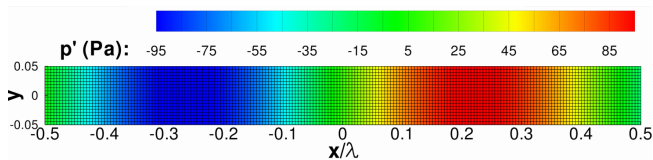


FIGURE 2 – Maillage type utilisé pour la propagation d'ondes dans *elsA* et fluctuation de pression associée à l'onde plane.

On définit la taille de maille selon la direction de propagation Δx , le pas de temps physique Δt , la vitesse du son c_0 et la vitesse d'écoulement moyen u_0 . L'expression du nombre de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) est alors :

$$CFL = \frac{(c_0 + |u_0|) \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (1)$$

Enfin, la longueur d'onde associée à la fréquence f s'écrit :

$$\lambda = \frac{c_0 + |u_0|}{f} \quad (2)$$

Plusieurs schémas numériques et modèles physiques sont disponibles dans *elsA*, avec des effets différents sur la propagation d'une onde. On fait le choix de ne s'intéresser qu'à un seul jeu de modèle et schéma, et d'étudier les effets des paramètres suivants :

- la distance de propagation, rapportée au nombre de longueurs d'onde que devrait parcourir l'onde initiale
- le nombre de points par longueur d'onde $N_\lambda = \frac{\lambda}{\Delta x}$
- le nombre de CFL
- le nombre de Mach de l'écoulement moyen $M_0 = \frac{|u_0|}{c_0}$
- le pourcentage de déraffinement du maillage
- le rapport d'aspect des cellules $\frac{\Delta y}{\Delta x}$
- l'angle d'inclinaison des cellules

Ainsi, tous les calculs de cette première partie sont basés sur les équations de Navier-Stokes laminares, les flux convectifs sont calculés avec le schéma spatial de Jameson (ordre 2) et les flux diffusifs avec un schéma centré d'ordre 2. Les calculs sont instationnaires et on emploie un schéma d'intégration en temps implicite à trois niveaux d'ordre 2, avec pas de temps dual résolu par Euler implicite dont les résidus ont été convergés jusqu'à 10^{-8} . La viscosité est définie par la loi de Sutherland, tandis que les coefficients de viscosité artificielle du schéma de Jameson valent $K2 = 0.5$ et $K4 = 0.016$. Au total, 215 calculs ont été menés.

2.1 Influence du nombre de points par longueur d'onde

Plusieurs calculs ont été réalisés avec des maillages cartésiens de résolutions différentes. Aucun écoulement n'est introduit dans le calcul ($M_0 = 0$), et le pas de temps est à chaque fois adapté pour conserver $CFL = 1$. On trace ainsi l'évolution de la dissipation et de la dispersion en fonction du nombre de points par longueur d'onde (noté parfois ppwl, pour "points per wavelength"), Figure 3. On observe naturellement que, lorsque la résolution du maillage augmente, l'erreur de dissipation et le déphasage diminuent. De même, les courbes en fonction de la distance parcourue par l'onde présentent des pentes de moins en moins fortes, illustrant une meilleure conservation des ondes quand le nombre de points par longueur d'onde est élevé.

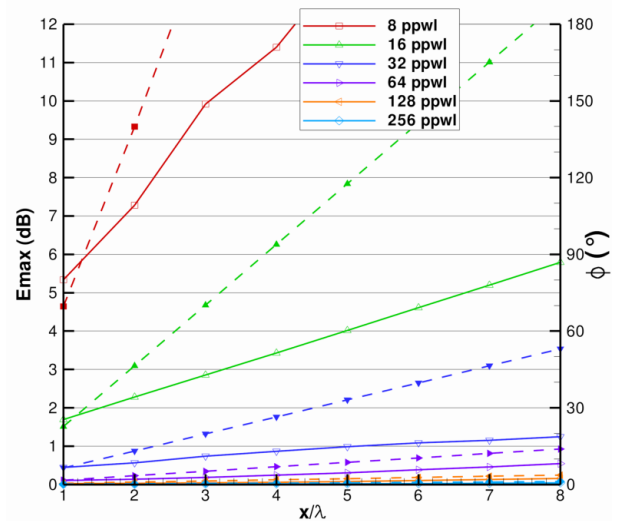


FIGURE 3 – Evolutions de l'erreur E_{max} (traits pleins, symboles vides) et du déphasage ϕ (pointillés, symboles pleins) en fonction du nombre de points par longueurs d'onde et de la distance de propagation, à $CFL = 1$.

Ces pentes mettent également en évidence l'aspect cumulatif des erreurs numériques. Par conséquent, même si un maillage garanti un certain nombre de points par longueur d'onde entre une zone source et un point d'observation (micro numérique, surface de couplage...), l'erreur numérique peut, selon la distance séparant les sources de l'observateur, s'avérer néanmoins non-négligeable. On constate enfin qu'il est important de tenir compte à la fois des effets de dissipation et de dispersion : avec $N_\lambda = 32$, la dissipation après 8 longueurs d'onde reste acceptable avec une erreur E_{max} proche de 1 dB. En revanche, la dispersion induit un déphasage supérieur à 50° . Cela implique d'une

part une erreur locale E_{inf} qui elle sera supérieure à 1 dB, et d'autre part, si ce signal venait à être employé parmi d'autres points de mesure dans une méthode intégrale ou un calcul CAA, l'énergie acoustique rayonnée serait donc quasiment conservée, mais les directivités obtenues seraient vraisemblablement faussées par des interférences constructives et destructives erronées.

2.2 Influence du nombre de CFL

Si l'influence de la discrétisation spatiale sur la propagation acoustique est communément reconnue et ainsi relativement prise en compte, celle de la discrétisation temporelle est plus souvent négligée (cf. [2]), en considérant qu'elle ne contribue qu'à la stabilité et la précision de l'avancement temporel, caractérisées par le nombre de CFL. Ce dernier (cf. équation (1)) représente le rapport entre la distance parcourue par une onde pendant un pas de temps et la taille de maille locale, mais également le rapport entre le nombre de points par longueur d'onde et le nombre d'itérations par période :

$$CFL = \frac{N_\lambda}{N_T} \quad \text{avec } N_T = \frac{T}{\Delta t} \quad (3)$$

La Figure 4 présente les évolutions de E_{max} et de ϕ obtenues en faisant varier le CFL sur un maillage de résolution de 32 points par longueur d'onde, avec $M_0 = 0$. La sensibilité au CFL apparaît clairement comme étant non négligeable aussi bien pour la dissipation que pour la dispersion, les deux phénomènes étant tous deux d'autant plus importants que le pas de temps est élevé. La Figure

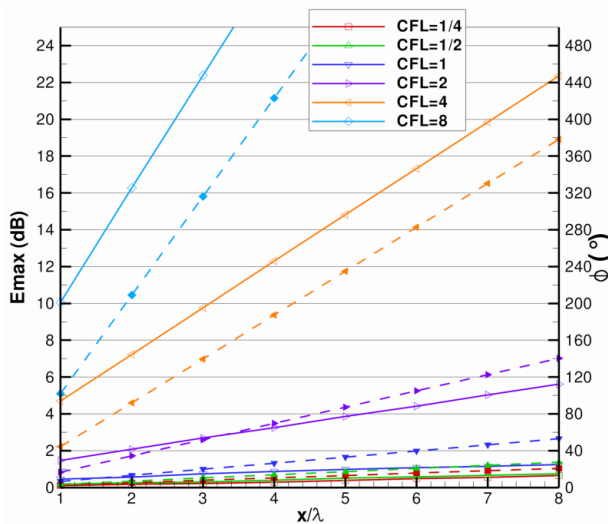


FIGURE 4 – Evolutions de l'erreur E_{max} (traits pleins, symboles vides) et du déphasage ϕ (pointillés, symboles pleins) en fonction du nombre de CFL et de la distance de propagation, avec $N_\lambda = 32$.

5 présente l'erreur de dissipation en fonction du nombre de CFL et du nombre de points par longueur d'onde pour une distance de propagation donnée. Cette même représentation pour le déphasage présente une cartographie très similaire. On constate que l'erreur est peu sensible aux CFL inférieurs à 1, tandis que lorsqu'ils sont au-delà de 1 elle est uniquement influencée par le choix du pas de temps. En effet, si ce dernier est conservé et que seul le nombre de points par longueur d'onde est modifié, le CFL étant

proportionnel à l'inverse de la résolution, la dépendance "diagonale" du niveau d'erreur au-delà de $CFL = 1$ indique que E_{max} est quasiment conservée. A l'inverse, modifier le pas de temps, uniquement ou non, aura nécessairement un effet sur la dissipation.

Ces résultats prouvent que le pas d'espace n'est pas le seul paramètre que l'on peut modifier pour améliorer la propagation dans un calcul. Il faut toutefois tenir compte du nombre de CFL acoustique local : s'il est supérieur à 1 cela constitue un avantage puisqu'en pratique, raffiner un maillage est plus fastidieux que diminuer le pas de temps et peut s'avérer plus coûteux en temps de calcul. En revanche, le CFL des schémas implicites est généralement élevé dans les couches limites mais est proche de 1 dans les zones convectives porteuses d'acoustique. Dans ce cas, une modification du pas de temps peut avoir moins d'effets que celle du maillage. Un outil tel que celui qui est présenté dans la deuxième partie de cet article permet d'évaluer les gains apportés par la diminution de Δt et/ou Δx .

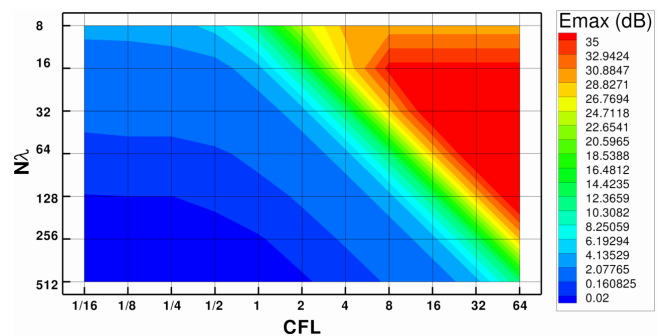


FIGURE 5 – Erreur E_{max} en fonction du nombre de CFL et du nombre de points par longueur d'onde, mesurée à $x/\lambda = 4$.

2.3 Influence des autres paramètres

On ne présente ci-après que les conclusions des tests sur les paramètres supplémentaires. En effet, ceux-ci ont des effets sur la propagation qui peuvent être pris en considération en recalculant le nombre de points par longueur d'onde moyen.

La présence d'un écoulement moyen modifie par convection la longueur de l'onde propagée, modifiant ainsi le nombre de points par longueur d'onde et le nombre de longueur d'ondes nécessaires pour parcourir une même distance. Au pire l'onde sera raccourcie donc moins bien discrétisée et parcourra plus de longueurs d'onde si elle se propage dans le sens opposé à l'écoulement ; au mieux elle sera allongée donc mieux discrétisée et parcourra moins de longueurs d'onde si elle va dans le même sens. Cet effet est pris en compte si l'on utilise l'expression de la longueur d'onde apparente (2). Si θ est l'angle entre le vecteur d'onde et l'écoulement, elle devient :

$$\lambda = \frac{c_0(1 + M_0 \cdot \cos \theta)}{f} \quad (4)$$

L'effet du déraffinement du maillage a été évalué en appliquant sur une longueur d'onde des étirements plus ou moins progressif (de 2.8 à 700%) dans la direction de propagation, tout en conservant le nombre de points total sur la longueur d'onde. Les résultats montrent peu d'écart d'erreur entre les différents déraffinements et le cas uniforme, impliquant que c'est avant tout le nombre de

points par longueur d'onde moyen qui contrôle les erreurs de propagation.

Le rapport d'aspect a été étudié en propageant l'onde acoustique suivant la diagonale d'un carré dont la taille de maille Δy a été modifiée pour chaque calcul (pour un rapport d'aspect $\Delta y/\Delta x$ entre 0.25 et 3). La dissipation et la dispersion augmentent avec le rapport d'aspect, et les effets sont proches de ceux obtenus en considérant le nombre de points par longueur d'onde à partir de la taille de cellule moyenne.

Enfin, l'inclinaison des mailles (ou "skewness") n'a montré aucun effet tant que le nombre de points par longueur d'onde suivant la direction de propagation est conservé.

3 Cartographie d'erreur

3.1 Base de données

Les résultats précédents ont montré que le nombre de points par longueur d'onde, le nombre de CFL et le nombre de longueurs d'onde parcourues sont les principaux paramètres qui régissent les erreurs de propagation. Ainsi, une base de données à trois entrées reprenant l'ensemble des résultats obtenus a été générée. La Figure 5 en est un extrait. Elle permet, à partir de la connaissance de ces trois données, d'interpoler les valeurs de E_{max} et ϕ auxquelles on peut s'attendre entre une source et un nœud de maillage. Les autres effets (nombre de Mach, rapport d'aspect...) doivent être inclus dans la définition des données d'entrée en tenant compte des conclusions du paragraphe 2.3. L'étude paramétrique ayant été réalisée avec des schémas numériques spécifiques (cf. §2), l'utilisation de cette base pour interpolation n'est valable que si le calcul est réalisé avec ces mêmes schémas.

3.2 Cartographie d'erreur pour les hélices

En s'appuyant sur cette base de données, on met en place un outil permettant d'estimer l'erreur de propagation dans tout ou partie d'un maillage CFD. L'analyse ayant été réalisée dans le cadre de la simulation du bruit d'hélice simples et contrarotatives (ou CROR pour "Counter Rotating Open Rotor"), l'outil développé est adapté à ce type de problème. Ce bruit étant essentiellement tonal, les fréquences qui doivent être propagées par les calculs uRANS sont les multiples de la fréquence de passage des pales $n.BPF$ et, dans le cas d'un CROR, les raies d'interactions $n1.BPF1 + n2.BPF2$, où $BPF1$ et $BPF2$ sont respectivement les fréquence de passage des pales amont et aval. Néanmoins, on peut imaginer un outil pour chaque type de problème aéroacoustique (bruit de jet, profils hypersustentateurs...).

Dans tous les cas, on doit être en mesure de positionner les sources acoustiques dans le domaine de calcul afin de déterminer la distance et le nombre de points qui les séparent des nœuds de réception. Selon la problématique traitée, la position des sources est plus ou moins préalablement connue, et peut nécessiter des approches différentes. Par exemple, pour du bruit d'origine turbulente, on peut envisager de définir un volume source au sein duquel on positionnera un nombre suffisant de points d'origine pour obtenir une estimation statistique de l'erreur. Dans le cas des hélices basse vitesse, le bruit d'épaisseur et le bruit de

charge prennent leur origine à la surface des pales. Il a donc été choisi de décrire ces sources dans le plan de l'hélice par une distribution radiale uniforme de sources le long de chaque pale. Enfin, si l'erreur de dissipation est extraite de la base directement en décibels, l'erreur de dispersion doit être calculée à partir de la valeur du déphasage ϕ . Par conséquent, il est nécessaire de modéliser le signal au point d'observation, constituant ainsi une phase de référence à partir de laquelle est calculée l'erreur de dispersion.

On choisit pour cela un modèle simple où chaque source est représentée par un monopôle générant un signal de la forme $A \cdot \cos(2\pi ft - \varphi)$. En chaque point du maillage, la contribution de tous les monopôles est sommée pendant une période, la phase φ prenant alors en compte le déphasage entre chaque pale $[(b-1)2\pi]/B$ (b allant de 1 à B pales) et le déphasage entre chaque monopôle dû à la différence de distance de propagation. Dans la mesure où la répartition et la phase des charges sur pales sont inconnues, on ajoute une phase aléatoire et on fait l'hypothèse de charges uniformes en envergure. Ces deux approximations, combinées à la distribution rectiligne des sources, impliquent que les effets du poids relatif des sources et de leurs interférences ne sont pas exacts. Enfin, on considère que l'hélice est statique et que les ondes entre une source et un point du maillage ont une trajectoire rectiligne. La Figure 6 illustre la géométrie du problème. Les maillages pour les hélices étant généralement de révolution, cette approche permet de limiter l'estimation d'erreur à une coupe longitudinale. L'ensemble de ces approximations conduit à une estimation statistique de l'erreur de propagation. Ainsi, le résultat est peu sensible au nombre de sources par pale, qui sera généralement fixé à 20.

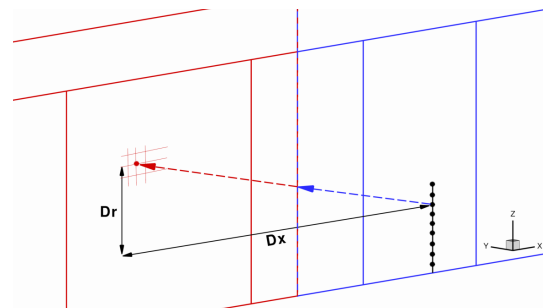


FIGURE 6 – Représentation des sources sur une pale, d'une trajectoire de propagation approchée vers un nœud, sur le cas d'une coupe longitudinale de maillage chorochronique multi-blocs (amont en rouge, aval en bleu).

L'erreur est calculée pour chaque fréquence d'intérêt. Dans le cas des CROR, seule l'erreur due aux sources sur la pale aval est calculée car celle-ci est la principale source de bruit d'interaction. La méthode de calcul est donc la même pour une hélice simple. De plus, les calculs CFD peuvent être réalisés sur des maillages dits "360°", représentant l'ensemble du système propulsif (Figure 7a), ou par la méthode chorochronique, qui utilise les propriétés périodiques du couple rotor-rotor pour limiter le maillage à un canal inter-pale par hélice [5] (Figure 7b). Les calculs 360° permettent de simuler des configurations complexes de CROR installé ou en incidence, mais sont coûteux en points, tandis que les calculs chorochroniques ne peuvent être appliqués qu'à des cas axisymétriques, et permettent une meilleure discrétisation. Dans le premier cas le maillage est donc dans le repère soufflerie, où les ondes propagées

sont bien aux fréquences d'intérêt, tandis qu'en approche chorochronique les domaines amont et aval sont dans des repères tournants, d'où la fréquence de propagation d'une onde dépend du domaine dans lequel elle évolue. Les deux méthodes étant régulièrement employées à l'Onera [6, 7], l'outil a été adapté aux deux cas. Ainsi, pour un calcul chorochronique et pour un point situé dans le domaine amont, l'erreur calculée tient compte de la propagation dans le domaine aval, entre la pale et l'interface chorochronique, et de celle dans le domaine amont, entre cette même interface et le nœud de réception (cf. Figure 6).

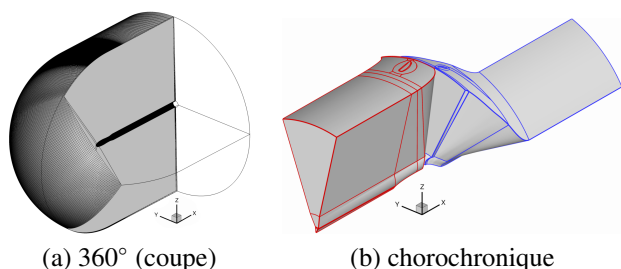


FIGURE 7 – Exemple de domaines CFD pour les CROR.

Le nombre de longueurs d'onde parcourues et le nombre de points par longueur d'onde sont déterminés suivant le rayon de propagation entre chaque source et chaque nœud. Le nombre de points par longueur d'onde moyen est calculé en fonction de la fréquence étudiée et de la taille de maille moyenne Δm , elle-même calculée en comptant axialement et radialement le nombre de cellules entre la source et l'observateur, respectivement c_x et c_r . En définissant Dx et Dr les distances axiale et radiale entre ces mêmes points (cf. Figure 6), on calcule la taille de maille moyenne :

$$\Delta m = \frac{Dx + Dr}{c_x + c_r} \quad (5)$$

Ainsi définie, elle tient compte des déraffinements et du rapport d'aspect. La longueur d'onde est déterminée en fonction du nombre de Mach de l'écoulement amont et de la direction de propagation, selon l'équation (4). Enfin, le nombre de CFL est calculé par :

$$CFL = \frac{c_0(1 + M_0 \cdot \cos \theta)\Delta t}{\Delta m} \quad (6)$$

Pour un nœud de maillage et une fréquence d'intérêt donnés, et pour chaque source située sur l'hélice, on dispose donc des nombres de points par longueur d'onde, de longueurs d'onde à parcourir et de CFL moyen. Les signaux de l'ensemble des sources sont sommés une première fois pendant une période, puis une nouvelle fois en incluant cette fois les effets des erreurs de dissipation et de dispersion interpolés. L'erreur E_{inf} la plus élevée de la période entre ces deux signaux est l'erreur maximale estimée, et est retenue comme étant le niveau d'erreur de propagation Err au nœud. Ces opérations sont résumées dans les équations (7), où n représente le nombre total de sources et T la période associée à la fréquence d'intérêt. Les amplitudes A , E_{max} et Err sont ici en Pascal.

$$\begin{aligned} s1(t) &= \sum_n A \cdot \cos(2\pi ft - \varphi) \\ s2(t) &= \sum_n (A - E_{max}) \cdot \cos(2\pi ft - (\varphi + \phi)) \\ Err &= \max_T |s2(t) - s1(t)| \end{aligned} \quad (7)$$

3.3 Application

Cet exemple d'application s'appuie sur la géométrie du CROR AI-PX7 d'Airbus [8], constitué de 11 pales à l'amont et 9 à l'aval. Il s'agit d'un cas à échelle maquette, en configuration isolée, basse vitesse ($M_0 = 0.2$) et sans incidence, issu du programme Européen Clean-Sky SFWA (Smart Fixed-Wing Aircraft). Le cas est simulé avec un calcul 360° et un calcul chorochronique, dont les domaines sont présentés sur la Figure 7. Le maillage 360° est constitué d'environ 45 millions de points, tandis qu'il y a 11.5 millions de points pour les deux canaux chorochroniques. Les pas azimutaux, correspondant aux angles parcourus par une pale pendant une itération, valent respectivement 0.5 et 0.1818° . Le calcul chorochronique est donc bien mieux résolu en temps et en espace, et est a priori plus favorable à la propagation acoustique. L'outil d'estimation d'erreur va ici permettre d'évaluer le gain sur la précision. A noter que les deux calculs ont été réalisés avec les mêmes schémas numériques que ceux utilisés pour la base de données.

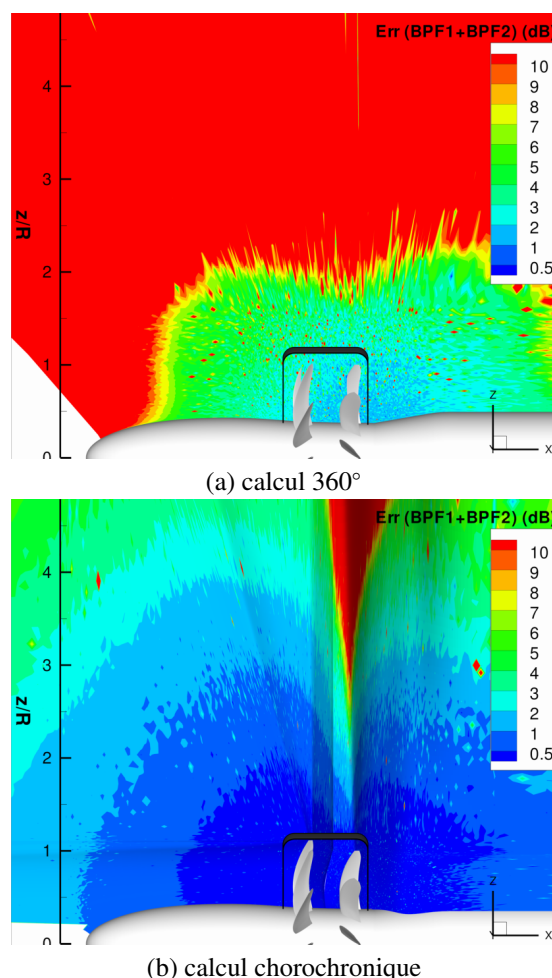


FIGURE 8 – Estimations d'erreur pour la première raie d'interaction. Surface de FW-H en noir.

Au-delà de $1.8R$ (R = rayon de l'hélice aval), les choix de maillage et de pas de temps conduisent à des cartographies de nombre de CFL similaires où il vaut moins de 1. Au voisinage des hélices, le maillage chorochronique atteint des nombres de CFL supérieurs à 5 là où le cas 360° se limite à 2.5. Dans ce qui suit, on ne s'intéresse qu'à la première raie d'interaction $BPF1 + BPF2$, les autres raies se comportant de façon identique avec naturellement des

erreurs plus importantes. Concernant le nombre de points par longueurs d'onde, sur le maillage 360° , il est de l'ordre de 40 au voisinage des pales et inférieur à 10 au-delà de $3.6R$. Dans le cas chorochronique, les ondes correspondant à cette raie sont discrétisées avec $N_\lambda \approx 100$ en champ proche et $N_\lambda \leq 40$ au-delà de $3.6R$. Les écarts de CFL entre les deux approches étant faibles devant ceux en nombre de points par longueur d'onde, ce dernier paramètre fera essentiellement la différence sur la qualité de propagation. Ainsi, les cartographies Figure 8 montrent que la propagation est bien mieux assurée par le calcul chorochronique. Là où l'erreur du cas 360° dépasse 10 dB , elle est encore inférieure à 1 dB en chorochronique. D'après l'analyse faite au §2.2, tant que les CFL au voisinage des hélices sont supérieurs à 1, ces niveaux d'erreurs pourront être diminués en réduisant les pas de temps.

Des calculs de type Ffowcs-Williams & Hawkings (FW-H) sont réalisés sur les deux cas avec le code *KIM* de l'Onera [9]. Ils s'appuient sur les données aérodynamiques interpolées sur une surface axisymétrique enveloppant le doublet d'hélices. Sur cette surface, représentée en coupe sur les Figures 8a et 8b, on estime les erreurs respectives autour de 2.5 et 0.4 dB , soit près de 2 dB d'écart entre les deux calculs. Les directivités sur un arc de cercle en champ lointain ainsi obtenues, présentées sur la Figure 9, ont des formes similaires, mais montrent logiquement des niveaux plus élevés dans le cas chorochronique. Toutefois, les écarts vont de 3 à 8 dB , ce qui est au-delà de ce qui était attendu. Cela illustre le fait que l'outil ne donne qu'une information locale, que l'on ne peut extrapoler. En effet, quelles que soit les erreurs évaluées aux nœuds utilisés par le calcul intégral, les interférences entre ces points sont inconnues, et l'erreur sur le calcul en champ lointain ne peut être prévue avec plus de précision. Le niveau d'erreur estimée autour d'une surface de couplage constitue donc l'erreur minimale qui est propagée par la méthode acoustique.

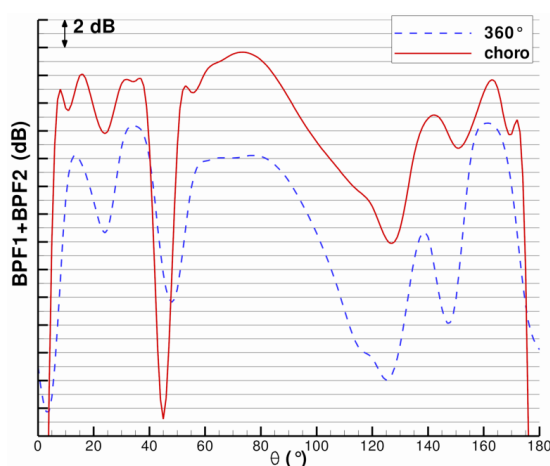


FIGURE 9 – Directivités en champ lointain de la première raie d'interaction obtenues par couplage CFD/FW-H.

4 Conclusion et perspectives

La mise en place d'un tel outil permet d'abord de mesurer les effets des erreurs numériques d'un solveur CFD, au travers de la génération et l'analyse de la base de données. Cette étape met en évidence l'impact des discrétisations spatiale et temporelle, mais également la corrélation entre le rapport de ces deux grandeurs et le niveau d'erreur.

Ces résultats sont propres à l'implémentation du code et aux schémas numériques employés. Il convient donc d'enrichir la base de données en réalisant cette même étude paramétrique avec d'autres schémas, ajoutant ainsi de nouvelles dimensions d'entrée. Ensuite, la cartographie d'erreur est à la fois un moyen de tester des solutions d'amélioration d'un calcul et son maillage, et de connaître la qualité d'une simulation, offrant ainsi plus de recul sur la fiabilité du résultat acoustique final. Enfin, l'outil mis en place spécifiquement pour les hélices peut encore être amélioré pour une meilleure précision, notamment dans le choix des modèles de source et de propagation.

Remerciements

L'auteur remercie Alexis Giauque (LMFA de Lyon) qui a initié et réalisé la première partie de ces travaux. Cette même partie a été soutenue financièrement par Airbus et Snecma dans le projet DGA "CROR-Aéroacoustique". Sont également remerciés Ronand Boisard et Julien Decours (Onera) qui ont réalisé les maillages et calculs CFD.

Références

- [1] J. Ffowcs Williams and D. Hawkings, "Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion," *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, vol. 264, no. 1151, pp. 321–342, 1969.
- [2] A. Wilson, "Noise requirements for CFD codes : Review of generic studies," Tech. Rep. EU Project TurboNoiseCFD, Contract Nr. G4RD-CT-1999-00144, Deliverable D1.6, Rolls Royce, 2001.
- [3] L. Cambier, S. Heib, and S. Plot, "The onera elsA CFD software : input from research and feedback from industry," *Mechanics and Industry*, vol. 14, pp. 159–174, 2013.
- [4] J. Reneaux, P. Beaumier, and P. Girodroux-Lavigne, "Advanced aerodynamic applications with the elsA software," *Aerospace Lab*, vol. 2, 2011.
- [5] G. A. Gerolymos and V. Chapin, "Generalized expression of chorochronic periodicity in turbomachinery blade-row interaction.," *La Recherche Aérospatiale*, vol. 5, pp. 69–73, 1991.
- [6] R. Boisard, G. Delattre, and F. Falissard, "Computational fluid dynamics as a support to counter-rotating open-rotor wind-tunnel test analysis," *J. of Aircraft*, 2014.
- [7] R. Boisard, G. Delattre, and F. Falissard, "Assessment of aerodynamics and aero-acoustics tools for open rotors.," in *9th European Turbomachinery Conference*, 2011.
- [8] C. Kirchhoff, "Airbus ai-px7 cror design features and aerodynamics," *SAE Int. J. Aerosp.*, vol. 6, pp. 626–642, 2013.
- [9] J. Prieur and G. Rahier, "Aeroacoustic integral methods, formulation and efficient numerical implementation," *Aerosp. Sci. and Technology*, vol. 5, pp. 457–468, 2001.