



Analyse expérimentale des vibrations de torsion d'hélices sur moteur Lycoming O-360

Jérémie Buiatti, Habib Setti, Himaé Guigne, Yoann Cossec, Samuel Dupland

9 janvier 2026

Résumé

Cette étude présente une investigation expérimentale du couple vibratoire de torsion dans un ensemble moteur-hélice à entraînement direct utilisant plusieurs configurations d'hélices. Les mesures ont été effectuées sur un moteur Lycoming O-360-A1D instrumenté avec des jauge de contrainte internes, permettant la mesure directe des charges de torsion du vilebrequin pendant les essais au sol et en vol. Quatre types d'hélices ont été évalués : une hélice en aluminium, une hélice en bois, une hélice en fibre de carbone à cinq pales et une hélice en fibre de carbone à trois pales.

Les données de couple vibratoire ont été analysées en utilisant une méthode de comptage de cycles rainflow, appliquée sur des fenêtres temporelles d'une seconde, afin d'extraire une enveloppe conservatrice du chargement cyclique haute fréquence en fonction de la vitesse moteur. Les résultats révèlent des différences significatives dans le comportement des résonances de torsion entre les configurations d'hélices, incluant des résonances prononcées pour les hélices en aluminium et en fibre de carbone multi-pales dans ou près des plages de régime typiques d'exploitation.

En revanche, l'hélice en fibre de carbone à trois pales conçue en utilisant une modélisation dynamique moteur-hélice et des algorithmes d'optimisation évolutionnaires présente un couplage vibratoire réduit et des niveaux d'excitation de torsion significativement plus faibles. L'influence des résonances de torsion sur les accélérations du vilebrequin et les accessoires moteur est discutée, ainsi que les bénéfices du placement de résonance et de la réduction de la plage de fonctionnement. Ces résultats soulignent l'importance des approches de conception dynamique intégrées pour améliorer les performances, la durabilité et le comportement vibratoire des systèmes propulsifs à entraînement direct.

Mots-clés : Vibration de torsion ; Couplage moteur-hélice ; Moteurs d'avion à entraînement direct ; Mesure de couple vilebrequin ; Comptage de cycles rainflow ; Résonance d'hélice ; Fatigue vibratoire ; Hélices en fibre de carbone ; Optimisation évolutionnaire ; Chargement des accessoires moteur

1. Dispositif Expérimental

Les mesures de vibrations de torsion ont été effectuées sur un ensemble moteur-hélice à entraînement direct utilisant les configurations d'hélices suivantes :

- Hélice en aluminium (SENSENICH 76EM8S14-0-60)
- Hélice en bois (HOFFMANN HO 7 HM-180 160)
- Hélice en fibre de carbone à cinq pales : Moyeu et pied de pale en aluminium, pales en carbone (DUC 5-blade FLAIR-2)
- Hélice en fibre de carbone à trois pales : Moyeu en carbone et pales complètes (E-PROPS 3-blade A42 22deg)

Tous les essais ont été effectués en utilisant un **moteur Lycoming O-360-A1D** équipé d'un vilebrequin creux. Le couple de sortie du vilebrequin a été mesuré en utilisant des jauge de contrainte internes.

Les mesures ont été réalisées :

- Au sol et en vol pour la plupart des configurations
- Au sol uniquement pour la configuration FLAIR-2, cette hélice ayant été décertifiée par l'EASA suite à plusieurs problèmes mécaniques. Cette hélice a néanmoins été incluse dans la présente étude afin d'améliorer la compréhension des phénomènes sous-jacents ayant contribué à ces problèmes, dans l'objectif de s'assurer que de telles conditions ne soient pas reproduites dans les futures conceptions d'hélices.

2. Méthode d'Analyse des Charges Vibratoires

Les données de couple vibratoire du vilebrequin ont été traitées en utilisant une **technique de comptage de cycles rainflow**, conformément aux pratiques établies d'analyse de fatigue. L'algorithme rainflow est une méthode de comptage de cycles utilisée pour identifier et quantifier les cycles de contrainte ou de charge dans un historique temporel à amplitude variable complexe en décomposant le signal en plages de charge cycliques équivalentes et valeurs moyennes.

Les historiques temporels de couple mesurés ont été divisés en intervalles consécutifs d'une seconde, chacun correspondant à une condition de fonctionnement moteur quasi-stationnaire. Pour chaque intervalle d'une seconde, une analyse rainflow a été effectuée pour extraire les cycles de couple et leurs plages associées.

Pour se concentrer sur l'excitation vibratoire soutenue pertinente pour les dommages de fatigue, seules les plages de cycles se produisant à un taux d'au moins 20 cycles par seconde ont été considérées. Pour chaque vitesse moteur (RPM), la plage de couple maximale répondant à ce critère d'occurrence dans l'intervalle d'une seconde correspondant a été sélectionnée et assignée à ce régime.

Le seuil minimal de fréquence de cycle de 20 Hz a été sélectionné afin de rester en dessous de la première fréquence harmonique moteur pour les vitesses moteur supérieures à environ 1200 RPM, garantissant que tous les phénomènes d'excitation de torsion pertinents sont capturés.

Cette méthodologie fournit une enveloppe conservative du chargement de couple vibratoire haute fréquence en fonction de la vitesse moteur, tout en excluant les événements isolés ou transitoires qui ne sont pas représentatifs d'une excitation vibratoire continue.

3. Système d'Instrumentation et de Mesure

Les mesures de couple du vilebrequin ont été effectuées en utilisant deux assemblages de jauge de contrainte en pont de Wheatstone complet collées sur le vilebrequin à $\pm 45^\circ$ par rapport à l'axe de l'arbre, une configuration sélectionnée pour maximiser la sensibilité à la contrainte de torsion tout en minimisant l'influence des charges de flexion et axiales. Les jauge de contrainte ont été installées à une distance de 30 mm de la face de bride moteur (Figure 1), garantissant la mesure du couple dans une région représentative de la charge transmise à l'hélice.

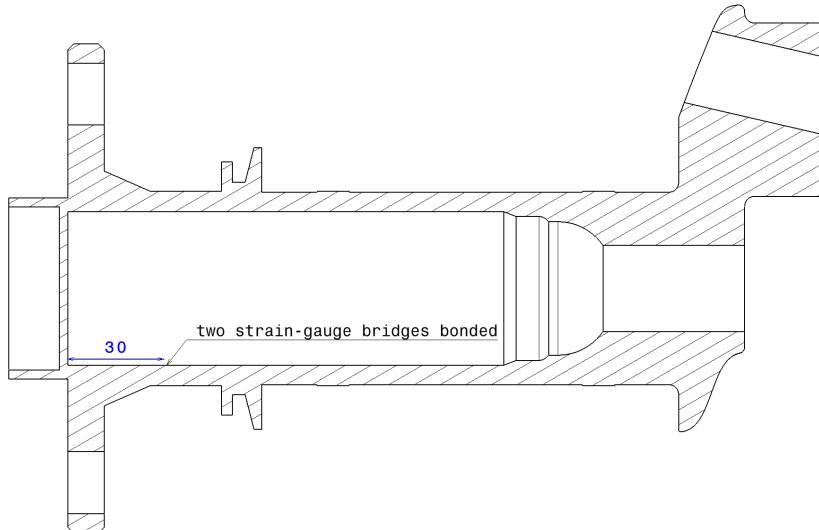


Figure 1 – Position du pont de Wheatstone à jauge de contrainte.

Tous les essais ont été effectués en utilisant les mêmes ponts de jauge de contrainte et l'électronique de mesure identique, garantissant la cohérence et la traçabilité à travers toute la campagne d'essais.

La chaîne de mesure a été calibrée avant les essais en utilisant une procédure de calibration de couple statique effectuée sur un vilebrequin séparé démonté. Ce vilebrequin de référence était du même modèle et instrumenté avec des jauge de contrainte identiques installées aux mêmes emplacements et orientations que ceux utilisés pour les essais en vol et au sol. La stabilité de calibration a été vérifiée pendant la durée de la campagne de mesure, et aucune dérive significative n'a été observée.

Table 1 – Spécifications du Système d'Acquisition de Données

Paramètre	Valeur
Système d'acquisition	E-PROPS ELIAS
Nombre de canaux	16 canaux
Taux d'échantillonnage	6,5 kHz par canal
Synchronisation	Capteurs avion (GPS, altitude, etc.)
Transmission de données	Temps réel (Wi-Fi + 3G)

L'acquisition de données a été effectuée en utilisant le système E-PROPS ELIAS, comprenant une unité d'acquisition à 16 canaux fonctionnant à un taux d'échantillonnage de 6,5 kHz

par canal. Les mesures de couple ont été synchronisées temporellement avec les autres capteurs embarqués de l'avion (paramètres moteur, GPS, altitude, etc.), permettant une corrélation précise entre les niveaux de couple vibratoire et les conditions de fonctionnement. Les données de mesure ont été transmises en temps réel via des liaisons Wi-Fi et 3G au pilote et à l'ingénieur d'essai au sol, permettant une supervision continue de l'intégrité des données et de l'exécution des essais.

Pour des raisons liées à la confidentialité industrielle, les valeurs absolues et les niveaux de fréquence exacts des données de couple vibratoire mesurées ne sont pas divulgués. Les résultats sont donc présentés sous une forme comparative et normalisée, préservant la pertinence de l'analyse.

4. Contexte et Cadre d'Analyse

4.1 Le Logiciel LUKY

Le logiciel LUKY est un outil interne de conception et d'optimisation d'hélices développé pour modéliser l'interaction dynamique entre le moteur et l'hélice. Le logiciel intègre un modèle dynamique de torsion moteur-hélice couplé, permettant la prédiction de la transmission du couple vibratoire à travers la plage de vitesse de fonctionnement.

Basé sur ce modèle dynamique, LUKY implémente des algorithmes d'optimisation évolutionnaires pour explorer l'espace de conception de la géométrie des pales, de la distribution de masse et des paramètres aérodynamiques, avec l'objectif de réduire le couplage vibratoire et de minimiser les amplitudes d'excitation de torsion tout en préservant les performances aérodynamiques.

Les simulations dynamiques effectuées dans LUKY prédisent également les mouvements de bout de pale de grande amplitude dans des plages de fonctionnement vibratoires spécifiques, fournissant un aperçu de la réponse structurelle de l'hélice sous conditions de résonance. Cette capacité permet d'identifier et d'atténuer les phénomènes de résonance potentiels tôt dans la phase de conception, contribuant à un comportement vibratoire amélioré de la configuration finale de l'hélice sans dépendre d'un ajustement post-conception.

4.2 Résonances de Torsion

Les résonances de torsion dans les systèmes moteur-hélice sont caractérisées par une amplification significative du couple cyclique et des niveaux de contrainte associés. Lors du fonctionnement près d'une résonance de torsion, les charges alternées de haute amplitude résultantes peuvent accélérer substantiellement l'accumulation de dommages de fatigue dans le vilebrequin, le moyeu d'hélice et les pales, conduisant potentiellement à une fissuration prématuée ou une défaillance structurelle.

Aux points de fonctionnement où le couple oscillatoire maximal est observé dans le vilebrequin, des accélérations de torsion maximales à l'extrémité libre du vilebrequin sont également atteintes. Ce comportement est cohérent avec la dynamique du système, qui peut être modélisée comme un système masse-ressort dans lequel les masses en rotation restent inchangées. Dans un tel système, les forces inertielles alternées résultent des accélérations de masse, entraînant un transfert d'énergie périodique entre l'énergie cinétique et l'énergie élastique stockée dans la rigidité de torsion de la chaîne cinématique.

Par conséquent, les grandes oscillations de couple transmises à l'hélice sont directement associées à des accélérations élevées du vilebrequin à son extrémité libre, générant des forces dynamiques significatives sur les accessoires moteur, notamment les magnétos. Cela confirme

que l'inertie de l'hélice seule ne protège pas les accessoires moteur d'un tel chargement dynamique.

Pour ces raisons, le fonctionnement continu dans les plages de vitesse de résonance de torsion identifiées doit être strictement évité, et les combinaisons moteur-hélice doivent être conçues et exploitées pour soit déplacer les fréquences de résonance en dehors de l'enveloppe de fonctionnement normale, soit minimiser les niveaux d'excitation dans ces régimes critiques.

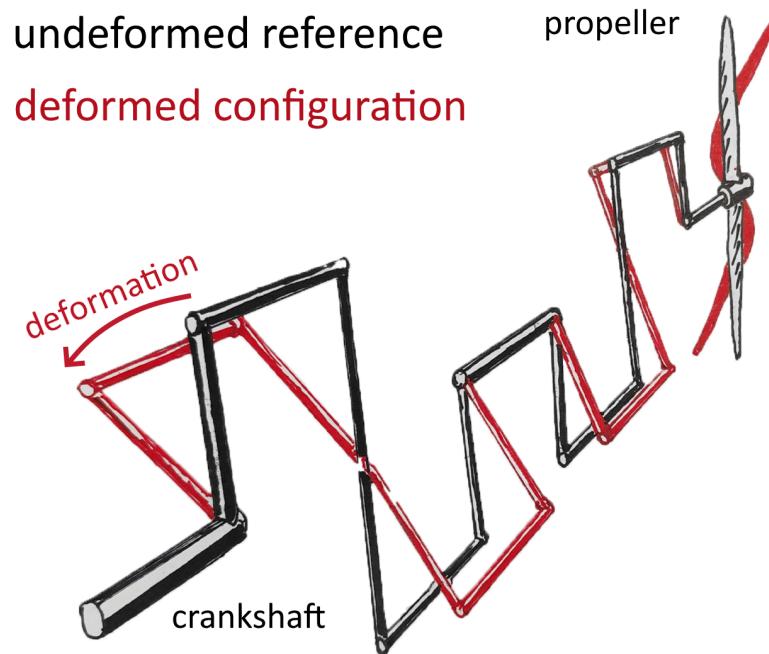


Figure 2 – Déformée modale de torsion de l'ensemble vilebrequin-hélice.

La Figure 2 illustre une déformée modale de torsion de l'ensemble vilebrequin-hélice, comparant la configuration de référence non déformée avec la forme déformée correspondante. Le mode est caractérisé par de grandes amplitudes de déformation de torsion et un point nodal unique situé dans l'hélice, indiquant un fort couplage dynamique entre le vilebrequin et les pales d'hélice.

Pour de telles déformées modales, le moment d'inertie de masse statique de l'hélice ne caractérise pas adéquatement son comportement dynamique, car la réponse vibratoire est gouvernée par la masse distribuée, la rigidité et la déformée modale de l'ensemble plutôt que par un seul paramètre d'inertie concentrée.

5. Représentation des Données

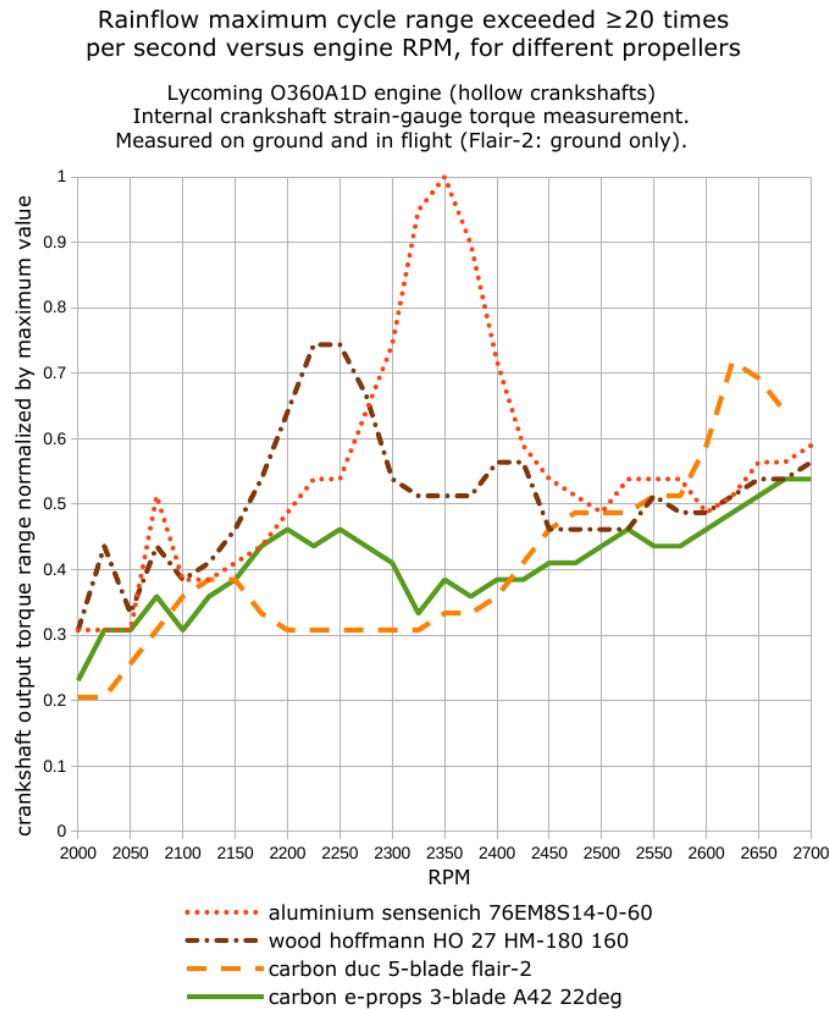


Figure 3 – Amplitude du couple vibratoire de torsion en fonction de la vitesse moteur pour différentes configurations d'hélices.

6. Résultats et Discussion

6.1 Hélice en Aluminium

L'hélice en aluminium présente une forte résonance vibratoire centrée autour de 2350 RPM. La plage de fonctionnement restreint du fabricant pour cette hélice est spécifiée entre 2150 et 2350 RPM, indiquant que la fréquence de résonance semble avoir été déplacée vers le haut.

Les facteurs contributifs possibles incluent :

- Tolérances de fabrication de l'hélice et du moteur.
- Réduction de la masse des pales due à des opérations de réparation ou de remise en état.

Il est considéré peu probable que le pic de contrainte des pales se produise à une fréquence significativement inférieure au pic de contrainte du vilebrequin correspondant. Il convient de

noter que le bulletin de service interdisant le fonctionnement continu dans cette plage de régime date de 1969.

6.2 Hélice en Bois

L'hélice en bois montre une résonance autour de 2225 RPM, avec un niveau de couple vibratoire modéré comparé à l'hélice en aluminium. Bien que les hélices en bois soient généralement connues pour leurs bonnes caractéristiques d'amortissement, cela n'élimine pas le risque associé à une résonance positionnée défavorablement, par exemple dans la plage de régime de croisière. Même si elle est bien tolérée par l'hélice elle-même, une telle résonance peut encore affecter négativement le moteur et les composants associés en raison de l'excitation de torsion soutenue.

Dans ce contexte, il est remarquable que la plage de vitesse de fonctionnement autour de 2225 RPM ne soit pas identifiée comme une plage à éviter pendant le fonctionnement en croisière, en particulier compte tenu des implications potentielles pour les accessoires moteur soumis à un chargement de torsion soutenu.

6.3 Hélice en Fibre de Carbone à Cinq Pales (FLAIR)

L'hélice en fibre de carbone à cinq pales présente une résonance près de 2625 RPM. Cette hélice a été testée avec un pas de pale plus petit que le pas nominal de vol, permettant au moteur d'atteindre 2700 RPM au sol à vitesse nulle.

L'augmentation du pas de pale pour le fonctionnement en vol tend généralement à réduire la fréquence de résonance, suggérant que le comportement vibratoire pourrait être plus sévère sous conditions de vol. Il semble également possible que, sur les moteurs équipés de vilebrequins rigides, la fréquence de résonance puisse être au-dessus de 2700 RPM. L'identification des variantes exactes de moteur (configuration de vilebrequin et contrepoids) affectées par cette configuration serait donc d'intérêt.

La résonance observée est associée à un mouvement significatif de bout de pale, comme prédit par la reproduction dynamique du système moteur-hélice dans le cadre de simulation LUKY. Une investigation plus approfondie de la contribution de ces mouvements à la signature acoustique globale serait précieuse.

6.4 Hélice en Fibre de Carbone à Trois Pales (E-PROPS)

L'hélice en fibre de carbone à trois pales E-PROPS montre seulement une très légère résonance autour de 2250 RPM, avec des niveaux de couple de vilebrequin significativement plus bas que ceux observés pour les autres hélices.

Ces résultats démontrent l'efficacité du travail de réduction du couplage vibratoire effectué pendant la phase de conception en utilisant des algorithmes d'optimisation évolutionnaires au sein du logiciel LUKY, ciblant la minimisation de l'excitation de torsion.

Une partie de l'amélioration peut également être attribuée à l'effet de Plage de Vitesse Étendue (ESR), qui réduit la variation de la vitesse moteur plein gaz entre les conditions de décollage et de vol à haute vitesse. Cela permet des vitesses moteur plus élevées pendant le décollage pour un réglage de pas de croisière donné, améliorant les performances au décollage. Du point de vue vibratoire, la plage de régime plein gaz plus étroite réduit la probabilité de fonctionner en résonance sous conditions de plein gaz.

En revanche, les hélices traditionnelles à pales larges présentent typiquement des variations de régime plein gaz plus importantes, rendant l'intersection entre les fréquences naturelles structurelles et les excitations harmoniques moteur presque inévitable.

En dehors des conditions de résonance, les niveaux de couple moteur mesurés restent très similaires, bien que les hélices utilisées présentent des moments d'inertie de masse très différents. En particulier, l'hélice en aluminium possède un moment d'inertie plusieurs fois supérieur à celui des hélices en bois et en fibre de carbone, ce qui montre que, en régime établi et dans des conditions de fonctionnement normales, le moment d'inertie de masse de l'hélice n'est pas un paramètre dominant de l'interaction moteur-hélice.

7. Conclusion

Parmi les configurations testées, l'hélice en fibre de carbone E-PROPS démontre le comportement vibratoire le plus favorable, avec une amplitude de résonance minimale et une excitation de couple réduite. En revanche, les hélices en aluminium et en fibre de carbone multi-pales présentent des résonances prononcées dans ou près des plages de régime typiques d'exploitation, avec des implications potentielles pour la durabilité, le confort et le comportement de fatigue à long terme.

Ces résultats fournissent une base pour le développement de solutions d'hélices plus efficaces, plus silencieuses et plus fiables pour les applications de moteurs à entraînement direct. Cependant, la vérification des plages de régime de résonance pour chaque configuration moteur-hélice reste essentielle, car le comportement vibratoire est influencé par la rigidité du vilebrequin, la masse des pistons, la rigidité de l'espaceur et les caractéristiques de l'hélice.

La présence d'un vilebrequin équipé de contrepoids pendulaires d'ordre 6,3 et 8 peut réduire les amplitudes vibratoires pour des ordres harmoniques ciblés, mais ne traite pas toutes les conditions de résonance. Dans ce contexte, les entretoises en fibre de carbone à haute rigidité utilisées sur les hélices E-PROPS contribuent à limiter la compliance supplémentaire et à stabiliser le placement de résonance, en combinaison avec l'optimisation dynamique globale moteur-hélice.

A. Contributions des Auteurs

Jérémie Buiatti : Pilotage de l'étude, définition de la méthodologie, supervision de la campagne d'essais, coordination de l'analyse des données, développement du logiciel LUKY et interprétation des résultats.

Habib Setti : Développement et implémentation du modèle dynamique moteur dans LUKY, contribution au cadre d'optimisation évolutionnaire, et analyse des résultats de simulation en corrélation avec les données expérimentales.

Himaé Guigne : Ingénierie essais principale, incluant la définition des essais, la mise en place de l'instrumentation, la synchronisation des systèmes de mesure, la validation des données acquises, ainsi que l'analyse et la corrélation des résultats expérimentaux avec les prédictions numériques.

Yoann Cossec : Responsable de la gamme d'hélices pour moteurs en prise directe, conception, fabrication et assemblage des prototypes d'hélices, définition des configurations d'essais et cohérence entre les choix de conception des prototypes et les objectifs expérimentaux.

Samuel Dupland : Réalisation des essais en vol, définition de points d'essais sûrs et représentatifs, et exécution du programme d'essais en vol.

