



Par **MICHEL BARRY**,
pilote professionnel,
ingénieur aéronautique.

Dangerosité des phénomènes alternatifs, oscillants ou vibratoires

FLUTTER DE GOUVERNE, SHIMMY D'ATTERISSEURS, RÉSONANCE ET VIBRATION, ÉTUDE DE CES RISQUES RÉELS MENAÇANT LA STRUCTURE DE NOS AVIONS.

Nos avions sont soumis à des charges statiques continues et nous connaissons les limites à ne pas dépasser en restant par exemple à l'intérieur du domaine de vol. Ainsi nous avons une indication pour préserver la structure de l'avion. Mais ils sont également soumis à des charges alternatives tout aussi destructrices et dangereuses qui peuvent se produire à l'intérieur du domaine de vol, pour peu que l'appareil ait subi quelques dommages ou des travaux pas toujours conformes. Le danger est alors plus discret mais reste aussi grand.

Quelques exemples, liés à des endommagements lors des roulements sur piste ou à des problèmes plus graves de flottement ou de flutter (définition ci-après) en vol, sont exposés dans les lignes suivantes. Les pilotes ne sont certes pas directement concernés par des problèmes qui relèvent plutôt de la conception ou de la maintenance. Cependant, dans cinq des cas exposés ci-dessous, un contrôle plus approfondi lors de la visite prévol aurait peut-être dissuadé le pilote de s'embarquer à bord d'un appareil qui présentait de réels risques.

On ne parlera pas ici du phénomène de buffeting provoqué par des tourbillons à faible énergie qui se développent à basse vitesse et représentent peu de danger pour la structure de l'avion. Les secousses qu'ils transmettent, si elles inquiètent le débutant, représentent cependant un indicateur précieux pour lui signaler qu'il approche de l'incidence de décrochage.

A. Des exemples d'accidents graves dus à des sollicitations périodiques ou alternatives : flutter de gouvernes, shimmy des atterrisseurs

A savoir : flutter - mot anglais signifiant battement en français -, il s'agit d'un mouvement oscillant incontrôlable de certains plans porteurs ou de gouvernes activés par des forces aérodynamiques alternées.

Voir vidéo, lien #1 sur notre site
1. Accident d'un Grob G115D à Indiantown (États-Unis), le 24/08/1996 - Voir lien #2 sur notre site

L'appareil se disloque en vol lors d'un vol rapporté comme non acrobatique par les témoins. L'ensemble des éléments de l'épave est dispersé sur une surface de 700 mètres de long et de 120 mètres de large. L'aile gauche est retrouvée intacte, ce qui a permis aux enquêteurs de l'expertiser. Notamment, ils ont remarqué qu'il avait été

L'étrange et caractéristique équilibrage des gouvernes de l'empennage papillon du Fouga Magister. La masselotte d'équilibrage est un fin secteur circulaire qui traverse le plan fixe.



repeint et qu'il était plus lourd qu'à l'origine (3,24 kg au lieu de 2,9 kg). L'accroissement de masse vers le bord de fuite a pu créer un déséquilibre alors que, sur cet appareil, un strict équilibre statique est nécessaire pour éviter les phénomènes de flutter. Il en était probablement de même pour les autres gouvernes dont l'état n'a pas permis de contrôler

ni la pesée ni l'équilibrage avant l'accident. L'analyse faite par le constructeur conclut que les conditions pour la survenue d'un flutter étaient réunies. De plus, de l'oxydation sur les charnières a pu contribuer à l'affaiblissement de la structure et favoriser la rupture en vol. Les défaillances au niveau de la maintenance de l'appareil, notamment l'omission de procé-

Date	Avion	Emplacement	Circonstances	Causes	Conséquences
1 24/08/96	G115	Indiantown (États-Unis)	Flutter d'aile	Équilibrage d'aile défectueux	Avion détruit, 2 morts
2 24/06/01	PC6	Anneriesse (74)	Flutter d'aile Perte aileron	Perte masselotte d'équilibrage en vol	Avion endommagé
3 08/06/03	DH251	Chateaugay (26)	Flutter de volet et d'aileron	Jeu dans les axes	Avion détruit, pilote décédé
4 26/03/05	MCRAS	Nogaro (32)	Shimmy du train avant à l'atterrissage	Train vulnérable à un freinage trop énergique	Avion endommagé
5 23/09/06	DR300	Rouen (76)	Shimmy du train avant au décollage	Vitesse de roulement trop élevée	Avion détruit, pilote légèrement blessé
6 04/06/12	PA18	Altipart de Peyresourde (65)	Shimmy du train arrière	Montage mécanique non conforme	Avion fortement endommagé

der à un contrôle de l'équilibrage des gouvernes après la peinture, sont retenues comme cause principale de l'accident.

2. Accident d'un Pilatus PC6 à Annemasse (74), le 26/06/01 Voir lien #3 sur notre site

L'appareil, après avoir largué des parachutistes, est mis en descente. Après de fortes vibrations, l'aileron extérieur droit se désolidarise de l'aile. Le Pilatus PC6 possède deux ailerons sur chaque demi-aile. Le pilote réussit à garder le contrôle de l'appareil et finit par se poser durement, mais miraculeusement, sur l'aérodrome de départ. Une rupture opportune de la commande des ailerons côté droit, sans endommagement du circuit de commande de l'aileron gauche, a permis de conserver un peu de contrôle en roulis et contribué au retour au sol sans trop de dégâts et sans dommage pour le pilote.

L'accident est dû à la rupture du bras d'une masselotte d'équilibrage de l'aileron extérieur droit. Voir figure 1. Pourtant la crique qui a conduit à la rupture en vol avait été détectée lors de la visite prévol par les pilotes du club. Mais le risque consécutif à une éventuelle rupture avait été sous-estimé. Et ce malgré un avis défavorable du constructeur qui avait conseillé d'interrompre les vols.



Figure 1. Masselotte d'équilibrage de l'aileron extérieur droit du Pilatus PC6. Ici, appareil identique à l'appareil accidenté. La rupture de la tige de la masselotte d'équilibrage de l'aileron extérieur droit a suffi à produire la probable résonance aéroélastique (flutter) qui a conduit à la rupture des ferrures de fixation de l'aileron et de sa biellette.

3. Accident d'un Jodel DH251 à Chatuzange-le-Goubet (26), le 08/06/2003 Voir lien #4 sur notre site

Un constructeur amateur modifie un Jodel DR250 (appareil initial). Mais il ne tient pas compte des conséquences possibles de ses initiatives :

- changement de l'hélice d'origine afin d'augmenter la vitesse en croisière ;
- modification des fixations de charnières de volets et d'ailerons remontées avec trop de jeu.

Les deux modifications ont transformé un appareil exempt en principe de tout risque de flutter en un appareil susceptible de se disloquer en vol après avoir perdu un volet et un aileron.

Nous expliquerons plus loin comment les deux modifications accroissent le risque de flutter.

A savoir : shimmy – mot anglais signifiant vibration, dandinement en français – : il s'agit d'une oscillation en direction d'une roue, en général directrice (roulette de nez ou roulette de queue), lors du roulement au sol. Le shimmy apparaît en général sur des pistes en dur. Sa violence peut conduire à la rupture du train concerné et à l'endommagement de la structure de l'avion.

4. Accident d'un Dyn'Aéro MCR45 à Nogaro (32), le 26/03/2005 Voir lien #5 sur notre site

L'appareil se pose un peu long sur la piste en dur, ce qui oblige le pilote à freiner énergiquement. Or, sur ce type d'appareil, la compression de l'amortisseur avant lors du freinage peut déclencher un phénomène de shimmy à une vitesse donnée.

La fourche du train avant se rompt sous l'action des violentes forces alternées dues aux oscillations du shimmy. L'avion privé de roulette de nez s'immobilise sur la piste.

5. Accident d'un Robin DR300 à Rouen (76), le 23/09/2006 Voir lien #6 sur notre site

Afin de majorer sa vitesse de décollage (110 km/h au lieu des 90-100 recommandés) pour

mieux lutter contre le vent de travers, le pilote doit pousser le manche pour empêcher l'appareil de décoller. De ce fait, il oblige la roue avant à rester en contact avec la piste et comprime inhabituellement l'amortisseur. Il réunit alors les conditions de déclenchement du shimmy liées à ce type d'appareil. Attention, elles ne représentent pas une règle générale. Le shimmy se déclenche plutôt à basse vitesse, avec une roue plutôt allégée, la compression de l'amortisseur pouvant alors arranger la situa-

tion. Parfois la règle est encore plus compliquée, le phénomène de shimmy est de nature vibratoire ou périodique. Ainsi, il obéit aux phénomènes généraux de la résonance mécanique liés à des correspondances malheureuses de conditions, entre-autres de fréquences, particulières.

6. Accident d'un Piper PA18 sur l'altiport de Peyresourde (65), le 04/06/2012 Voir lien #7 sur notre site

Au cours d'un atterrissage sur la piste revêtue de l'altiport de Peyresourde, la roulette de queue connaît un shimmy important qui rend bien vite l'appareil incontrôlable. Le BEA constate un montage non conforme à l'original qui a pu laisser l'ensemble prendre du jeu. Au cours du shimmy, la roulette a ainsi pu se verrouiller à 90° de son axe et provoquer la sortie de piste. A noter le rôle important joué par la piste revêtue : déclenchement du shimmy. S'il est rare sur les pistes en herbe, la forte adhérence du bandage en caoutchouc le favorise et l'entretien sur les pistes en dur. Le basculement sur le dos de l'appareil, fortement endommagé, montre les dangers liés au dysfonctionnement d'un des

SÉCURITÉ

éléments du train, notamment du train arrière, sur un appareil à train classique.

B. Éléments de physique liés aux phénomènes périodiques

1. La fréquence propre et la mise en vibration

Toute structure solide est susceptible de vibrer ou d'osciller. Vibrer, osciller désignent l'un et l'autre une déformation périodique selon un mouvement, la plupart du temps, de forme sinusoïdale ou composé de fonctions sinusoïdales. La vibration a lieu à des fréquences données, caractéristiques de la structure. Par exemple si la voilure d'un avion au sol oscille naturellement animée d'un mouvement qui se reproduit une fois par seconde, sa fréquence propre est de 1 hertz (Hz). Elle est une constante, caractéristique de la structure de l'aile. Elle dépend des matériaux (rigidité, élasticité), de la géométrie, des différentes masses et des dimensions.

La mise en vibration nécessite, soit une sollicitation brutale (impulsion), soit une sollicitation périodique (excitation). Un dispositif-moteur animé d'un mouvement vibratoire est un exciteur. Un moteur à explosion illustre un dispositif susceptible de transmettre des mouvements oscillants ou vibratoires (vibrations) à une structure qui lui serait associée. Un exciteur peut générer plusieurs fréquences de vibration en général multiples, ou sous-multiples, d'une fréquence fondamentale (harmoniques). À 3 000 tours/minute (50 tours par seconde), la fréquence fondamentale est de 50 Hz.

2. Le phénomène de résonance

Si la source d'excitation transmet par contact mécanique ses vibrations à une structure capable de vibrer, la structure vibrera à la fréquence imposée par la source. Dans un véhicule, vous ressentez toujours plus ou moins les vibrations du moteur. Dans le cas très particulier où la fréquence d'excitation est identique à la fré-

quence propre de la structure, les vibrations de la structure peuvent être entretenues et même amplifiées. On parle de résonance. Elle prend une importance particulière dans notre domaine car l'amplification des vibrations, et notamment de leur intensité et des contraintes mécaniques, peut conduire à la rupture des éléments qui se déformeraient au-delà de leur limite élastique.

3. Le flutter : une résonance de la structure de l'avion ou de ses éléments soumis à une excitation d'origine aérodynamique

Dans le phénomène de flutter, l'excitation provient de l'écoulement de l'air autour de l'avion. En effet autour des surfaces portantes, ou non, se forment des tourbillons aérodynamiques d'origines diverses (décollements des couches limites, enroulements en forme de tourbillons se détachant à une fréquence propre, tourbillons alternés lorsque l'écoulement d'intrados rejoint l'écoulement d'extrados, sillages tourbillonnaires derrière les haubans...)

Le drapeau qui flotte dans le vent est un exemple de structure souple qui se déforme sous l'action des tourbillons qu'elle a elle-même générés près de son bord de fuite. **Figure 2.** Chacun de ces tourbillons exerce une force aérodynamique sur la structure qui l'a produit ou sur n'importe quelle structure qu'il rencontrera. **Figure 3.** Par exemple, les tourbillons qui se détachent du bord de fuite de l'aile et du fuselage peuvent exciter les empennages de l'avion. Si, par malheur, la fréquence propre de l'empennage est égale à la fréquence des tourbillons, on assistera à un phénomène de résonance : l'empennage oscillera de plus en plus fort et pourra se rompre. Le phénomène cessera dès que la fréquence des tourbillons sera différente de la fréquence propre de l'empennage. La fréquence propre des tourbillons est fonction de la vitesse de l'appareil. Elle augmente sensiblement proportionnel-

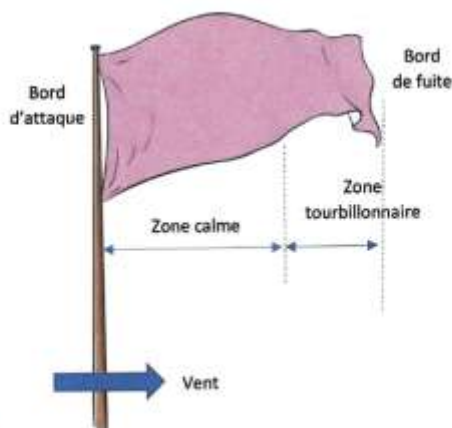


Figure 2. Flottement du drapeau dans le vent.

Le dessin montre la zone perturbée, vers le bord de fuite, où se forme l'écoulement tourbillonnaire du vent. Le tissu du drapeau suit les mouvements imposés par l'action des tourbillons qui se détachent. Une structure rigide comme une aile ou une gouverne subirait les mêmes sollicitations alternées et casserait ou non selon sa résistance mécanique.

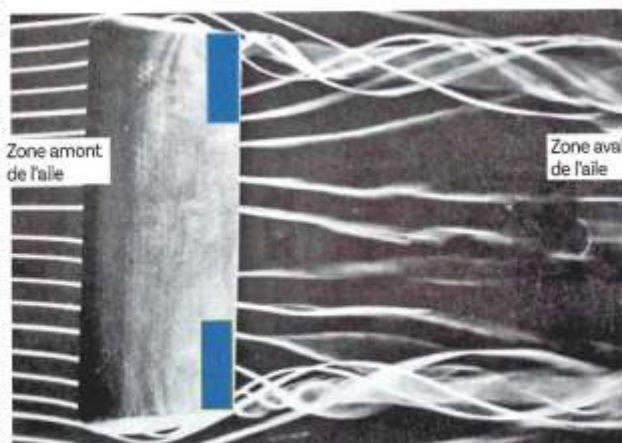


Figure 3. Visualisation de l'écoulement tourbillonnaire derrière une aile d'avion

Un profil d'aile est placé dans un écoulement d'eau. Un liquide traceur blanc matérialise les différents écoulements. Dans l'air, la géométrie des écoulements est semblable :

- l'écoulement est laminaire dans la zone amont ;
 - dans la zone aval, les tourbillons générés par la portance et par les couches limites s'organisent en filets individualisés. Ils sollicitent mécaniquement la surface qui les a générés.
- De tels écoulements dits « rotationnels » produisent par nature des sollicitations alternées. À remarquer leur intensité dans les zones extérieures, là où seraient implantés les ailerons.

lement à la vitesse. La VNE est souvent déterminée par le risque de flutter car, au-dessous, la fréquence des tourbillons, et leur intensité, sont insuffisants pour exciter la structure et les gouvernes de l'appareil. Dans l'accident du DH251, l'accroissement de vitesse dû au changement d'hélice est retenu par le BEA comme facteur ayant pu jouer un rôle dans l'apparition du flutter.

4. Réponse des structures rigides à une excitation d'origine aérodynamique

• 4.1. Structure strictement rigide : aile sans volet ou volet bloqué. Problème d'aéroélasticité.

En réponse aux tourbillons qui produisent des sollicitations alternées

vers son bord de fuite, l'aile a tendance à se déformer vers ses bords marginaux, notamment en torsion. L'incidence varie et le coefficient de portance aussi. Il s'ensuit des variations périodiques de la portance d'extrémité d'aile qui induiront des forces de flexion alternées dans le sens de l'envergure. Les planeurs et leur aile à grand allongement sont particulièrement sensibles à ce phénomène qui provoque régulièrement des ruptures. L'aile plus trapue et relativement plus rigide de nos avions y est moins sensible.

• 4.2. Structure rigide articulée : gouverne (aileron, gouvernail de profondeur, dérive) ou volet

Les tourbillons se développent aussi. Mais, contrairement à la structure rigide, dans un premier temps, ils tendent simplement à agiter les surfaces mobiles. Si celles-ci sont rigidement associées à leurs commandes (bielles, câbles, vérins), l'ensemble se comporte alors comme la structure rigide précédente. Mais si les commandes présentent des imperfections, comme du jeu ou de l'élasticité, la situation

se compliquera et pourra, sous certaines conditions, connaître la résonance. Pour certaines vitesses de l'avion, la fréquence de formation ou de détachement des tourbillons aérodynamiques pourra être précisément l'une des fréquences propres de l'oscillation de la gouverne ou de la chaîne de commande. L'amplification des oscillations, par exemple par braquage intempestif et anormal de gouverne, pourra alors rapidement atteindre les butées. Le choc qui s'ensuivra détruira la structure : charnière, gouverne, commande...

• 4.3. Une parade au risque d'oscillation ou de flutter des gouvernes : leur équilibrage.

Les paramètres qui influent sur la fréquence propre de tout système oscillant :

- une liaison trop élastique ou une rigidité insuffisante ;
- une inertie en mouvement ou une inertie en rotation.

Une inertie est toujours liée à la masse.

En modifiant ces deux paramètres, l'un ou l'autre voire les deux, on peut s'éloigner des fréquences d'excitation que l'ap-

pareil pourra connaître en vol. Par exemple l'allègement ou l'alourdissement d'une gouverne changera sa fréquence propre d'oscillation autour de son axe. **Figure 4.** Une gouverne en équilibre autour de son axe de rotation reste sensible au développement des sollicitations d'origine aérodynamique. En revanche, elle devient insensible aux mouvements verticaux de l'aile, puisque son centre de gravité est confondu (équilibrage à 100 %) ou moins sensible si le centre de gravité est rapproché (équilibrage partiel) de l'axe.

• 4.4. Le rôle du jeu mécanique dans les phénomènes oscillatoires.

Dans quatre des accidents exposés ci-dessus (celui du DH251 et les trois accidents dus à un phénomène de shimmy), un aileron, un volet, des roulettes de nez et une roulette de queue ont oscillé et provoqué des ruptures des éléments de fixations (charnières, train avant, béquille arrière). Le point commun à ces endommagements est un jeu ou un défaut de serrage. En effet, une telle structure sollicitée par des actions extérieures alternées peut résister si aucune déformation, aucun mouvement entre ses pièces constitutives ne s'ensuit. Si, au contraire, le moindre jeu existe et permet un déplacement d'une pièce, le mouvement sera générateur de forces d'inertie, dont les chocs d'arrêt pourront être destructeurs. Dans le cas du shimmy de la roulette de nez : il est dû à un jeu dans le maintien du braquage de la roue, le moindre départ vers la gauche ou vers la droite sera arrêté avec un choc sur la butée. De plus, dans le cas du shimmy divergent, le braquage de la roue pourra solliciter le pneu qui réagira en introduisant une force pro-braquage, augmentant ainsi la force nécessaire à l'arrêt du mouvement. Une fois le mouvement arrêté, les forces s'inverseront et la rotation partira dans l'autre sens produisant un mouvement alterné de plus en plus ample et destructeur : **voir vidéo, lien #8 sur notre site (vidéo 1).**

Au sol, le mécanicien constatera le jeu excessif du dispositif de guidage de la roue et indiquera la réparation à effectuer : **voir vidéo, lien #9 sur notre site (vidéo 2).**

Dans le cas du jeu dans les commandes de vol (charnières, tension des câbles) : les sollicitations alternées sur la gouverne, quelle qu'en soit leur origine (mécanique, inertielle, aérodynamique...), auront la voie libre pour démarrer sans contrainte un mouvement alterné. Son énergie pourra détruire les butées et les fixations. Voir vidéo montrant comment la tension insuffisante des câbles d'aileron de Jodel D112 a pu conduire à un phénomène de flutter et à l'accident. On disait alors « flottement ».

Voir vidéo, lien #10 sur notre site.

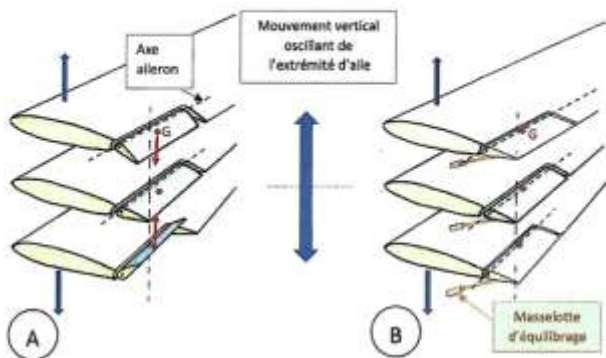
C. Recommandations : connaissance de son avion, visite experte lors de la prévol

- En vol, respectez les vitesses limites : VNO vous garantit que vous n'aurez pas de surprises en atmosphère turbulente, VNE vous assure que vous ne rencontrerez pas de flutter si votre appareil est en bon état.
- Pour la visite prévol, apprenez les points critiques : jeu dans les gouvernes, quelle tolérance ? La tension des câbles est-elle correcte : ni trop tendus ni trop mous ?
- Vérifiez que les volets sont bien en butée et n'ont aucun jeu en position « rentrés ». En position intermédiaire, vous pourrez percevoir la légère élasticité et le jeu de la timonerie. Mais comme dans cette configuration vous devez voler moins vite que VFE, vous resterez loin des vitesses critiques pour le flutter.
- Vérifiez les éléments anti-flutter quand ils sont apparents, comme les bras d'équilibrage et leur masselotte. Vérifiez qu'aucune ne s'est détachée ou est mal fixée. Pas de criques, pas d'endommagements, pas de traces de collision.
- Si vous détectez ou soupçonnez en vol un phénomène de flutter,

Figure 4. Comportement en inertie de l'aileron, lors d'une oscillation verticale.

4.A. Aileron non équilibré : par inertie, lors de la phase montante du mouvement, son centre de gravité G est soumis à une accélération dirigée vers le bas. G étant en arrière de l'axe de rotation l'aileron est entraîné vers le bas. Lors de la phase descendante, il est entraîné vers le haut. Il est donc sollicité alternativement. Si la fréquence des sollicitations est égale à celle d'une excitation d'origine aérodynamique, il peut entrer en résonance : phénomène de flutter.

4.B. Aileron équilibré : la masselotte d'équilibrage avance la position du centre de gravité sur l'axe de l'aileron : équilibrage à 100 %. Les oscillations verticales n'induisent plus aucune sollicitation par inertie en rotation autour de l'axe.



SÉCURITÉ

hautement improbable sur un appareil certifié et correctement entretenu, réduisez la vitesse instantanément et par tous les moyens : réduction des gaz, aérofreins, mise en montée.

- Concernant le shimmy des atterrisseurs : apprenez à détecter un jeu excessif notamment dans le compas (*figure 5*) des roulettes de nez (*voir la vidéo 2*).

- Informez-vous sur la conduite à tenir, propre à chaque appareil, en cas de shimmy : ralentir ? accélérer ? freiner ? attendre ? comprimer l'amortisseur avant ou au contraire le détendre ?...

- Signalez tout shimmy que vous avez perçu. Vous êtes peut-être le premier mais vous ne seriez pas le dernier. Un shimmy peut provoquer des dommages graves à d'autres parties de l'appareil. Une inspection experte est nécessaire. Voir la bonne décision de l'instructeur, rédacteur du REX du mois. ●



Figure 5. Mécanisme de guidage de la roulette de nez de nombreux appareils à train tricycle : le compas.
Ici sur un Cessna 152.

- Les trois axes du compas, quand ils s'usent et prennent du jeu, sont à l'origine de la plupart des cas de shimmy de ce type de train.
- Dans les cercles, les trois points à vérifier en manœuvrant la roue, comme montré dans la vidéo.
- D'autres pièces usées peuvent aussi être à l'origine du shimmy. Voir le REX du mois.

REX du mois - 22/06/2016 - Shimmy sur DA40 NG

• Description de l'événement :

Lors d'un vol d'instruction sur DA40 NG, nous avons constaté lors du premier toucher en O4 (Vv 10 Kt env. travers droite) à Merville du shimmy au niveau de la roue du train avant.

Après avoir soulagé le train avant par une action à la profondeur à cabrer puis retour du manche au neutre, le shimmy a disparu. Ce phénomène s'est reproduit au second puis au troisième toucher. J'ai donc pris la décision d'abrèger le vol et d'effectuer un retour.

À l'atterrissage en OB avec vent dans l'axe, le phénomène de shimmy s'est reproduit à nouveau. Au parking, je demande à mon élève d'appuyer sur la queue de l'appareil afin de lever la roue avant. En manipulant la roue autour de son axe vertical, je n'ai constaté aucune anomalie. Puis après avoir immobilisé en rotation la roue, j'ai effectué une poussée sur l'ensemble de celle-ci et sur la jambe de train perpendiculairement à l'axe longitudinal de l'avion, j'ai alors constaté une oscillation de l'ensemble avec une amplitude de +/- 15 mm.

J'en réfère à l'atelier maintenance qui me confirme que le shimmy est possible sur cet avion. Non convaincu par leur réponse, et ayant peu d'expérience sur ce type d'avion, je décide de bloquer l'avion et de me rendre le lendemain à l'atelier mécanique pour inspection du train. À l'issue de l'inspection par le mécanicien : avion arrêté de vol, et démontage du train avant pour réparation (changement des bagues d'usure et collage).

• Commentaire du déclarant :

Malgré le peu d'expérience sur ce type d'avion, il est toujours préférable de soumettre aux spécialistes une anomalie constatée. Si celle-ci n'avait pas été relevée, l'avion aurait poursuivi ses vols jusqu'au moment où le shimmy n'aurait plus été « contrôlable » et engendré la rupture du train avant avec les conséquences moteur et hélice qui auraient pu en découler.