

ETUDE SUR LES VIBRATIONS D'UNE HELICE

1) **Introduction:** Tout un chacun sait qu'il est important de faire équilibrer les roues de sa voiture, pour éviter les problèmes de vibrations dans le volant (shimmy). Il en est de même pour une hélice d'avion, qui présente une inertie importante .

Ce que l'on sait moins, c'est qu'il existe 2 types d'équilibrage (le statique et le dynamique) et que les forces mises en jeu par la rotation de l'hélice sont considérables.

Nous allons étudier chacun des 2 types d'équilibrage, et définir la notion de balourd qui est à l'origine des vibrations. Enfin, nous verrons comment sont caractérisées les vibrations

2) **Géométrie de l'hélice :** Ceux qui se sont lancé dans la fabrication d'une hélice bipale d'avion en bois, le savent bien, il est très difficile d'obtenir la similitude exacte des 2 pales. La géométrie n'est jamais parfaite, et donc, le poids, et la répartition des masses diffèrent d'une pale à l'autre.

2 - 1) Equilibrage Statique:

Si nous considérons la figure n° 1 ci-dessous, représentant une hélice en vue de face, nous voyons que les poids P1 et P2 de chaque pale qui s'appliquent respectivement aux centres de gravité G1 et G2, ne sont pas à égale distance du centre O de rotation de l'hélice.

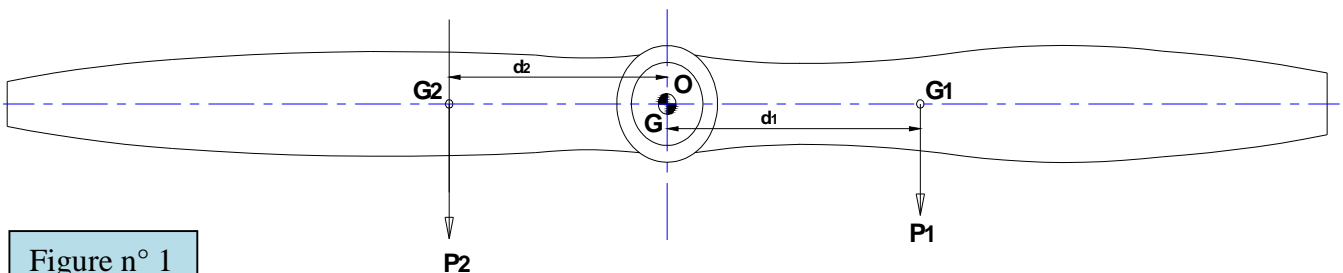


Figure n° 1

La dissymétrie des pales a volontairement été exagérée sur le dessin pour mettre en évidence le défaut. Les 2 points G1 et G2 ont été alignés avec l'axe longitudinal de l'hélice, mais ce n'est pas forcément toujours le cas.

L'équilibrage statique de l'hélice consistera à ajouter du poids sur la pale la plus légère pour que l'on obtienne la relation :

$$P2 \times d2 = P1 \times d1$$

L'axe longitudinal sera alors parfaitement horizontal, et le point G, centre de gravité global sera confondu avec le point O.

Le montage représenté figure n° 2 permet de vérifier l'équilibrage de l'hélice aussi bien dans le sens latéral que longitudinal. L'équilibrage s'effectue au moyen de vernis en bout de pale.

Le montage représenté en figure n°3 permet de vérifier également l'équilibrage dans le sens longitudinal.

La sensibilité doit être telle que l'hélice doit bouger lorsque l'on dépose un poids minimum de 2,5 g à 1 m du centre.

Figure n° 2

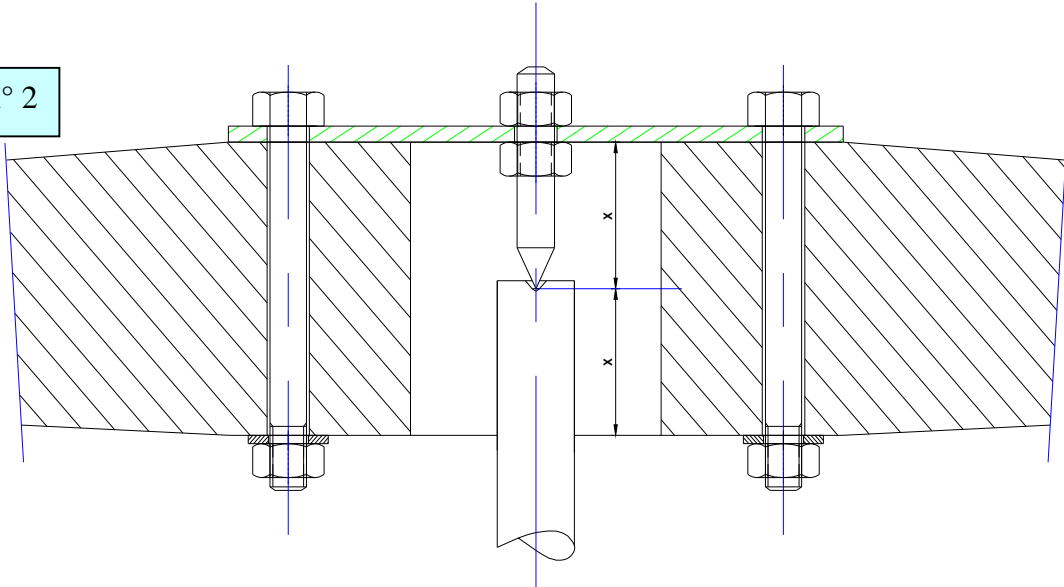
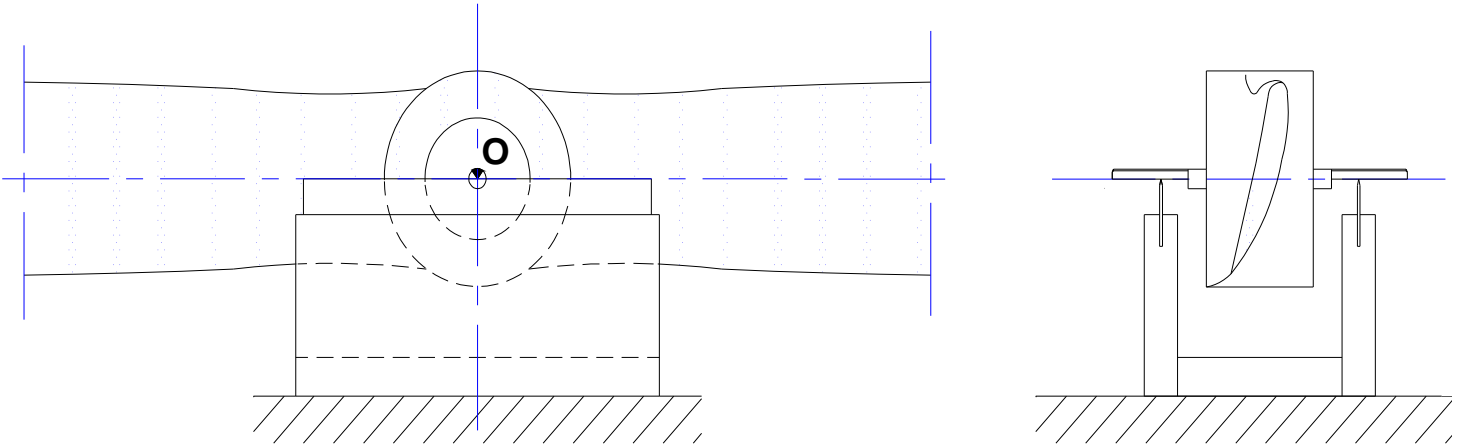


Figure n°3



2 - 2) Équilibrage dynamique : Si l'équilibrage statique est indispensable pour une hélice, il n'est néanmoins pas suffisant.

Nous allons tenter d'expliquer ce phénomène, en considérant d'abord la figure n° 4 qui représente une portion d'hélice bipale vue de face et de profil.

On a supposé un déséquilibre statique sur la vue de face : le centre de gravité G est décalé par rapport au centre de rotation O, ainsi qu'un décalage des projections H1 et H2 des centres de gravité G1 et G2 sur l'axe de rotation, sur la vue de profil. Ces décalages vont entraîner lors de la rotation de l'hélice, un phénomène de **balourd** d'autant plus important que la vitesse de rotation est grande. Ce balourd se manifeste par des vibrations qui risquent d'être dévastatrices pour la cellule de l'avion. L'équilibrage dynamique permet de mettre en évidence et de corriger le défaut constaté sur la vue de profil, d'un décalage entre H1 et H2, alors que le défaut de la vue de face doit être corrigé par l'équilibrage statique qui ramène le point G en O.

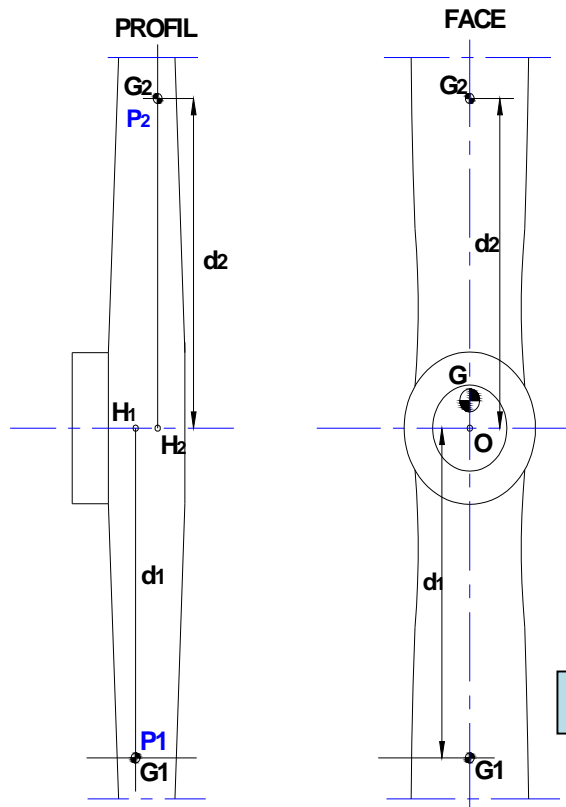


Figure n° 4

Remarque : Le décalage H1/H2 a beaucoup moins d'incidence sur le balourd que le déséquilibre statique, ce qui permet parfois de se passer de l'équilibrage dynamique, les distances d1 et d2 étant grandes par rapport à l'épaisseur de l'hélice.

Les hélices sont réalisées de nos jours sur des centres d'usinage à commande numérique, avec une grande précision, ce qui fait que le décalage H1/H2 est quasiment nul.

3) Etude du balourd :

3-1) Balourd statique : Le balourd statique (ou simple) est essentiellement lié au déséquilibre statique. Considérons un disque plein, homogène de rayon "r", qui tourne librement autour de son axe "O" (cercle bleu). L'axe O représente l'axe de rotation de l'hélice.

Si nous ajoutons à ce disque, une surcharge ponctuelle " m " au point G , (le balourd) à une distance r du centre.

Le point G représente le centre de gravité global de l'hélice, vu précédemment dans le chapitre 2

Si nous mettons l'ensemble en rotation, à une vitesse angulaire "w", cette surcharge sera soumise:

- à son poids $P = mg$
- à la force centrifuge $F = m\omega^2 r$ (voir figure n°5)

Les 2 forces se composent pour donner la résultante R.

$r = OM = OG =$ distance du centre de gravité au centre de rotation.
 $m =$ Masse de l'hélice = Poids / 9,81
 $\omega =$ Vitesse angulaire du centre de gravité

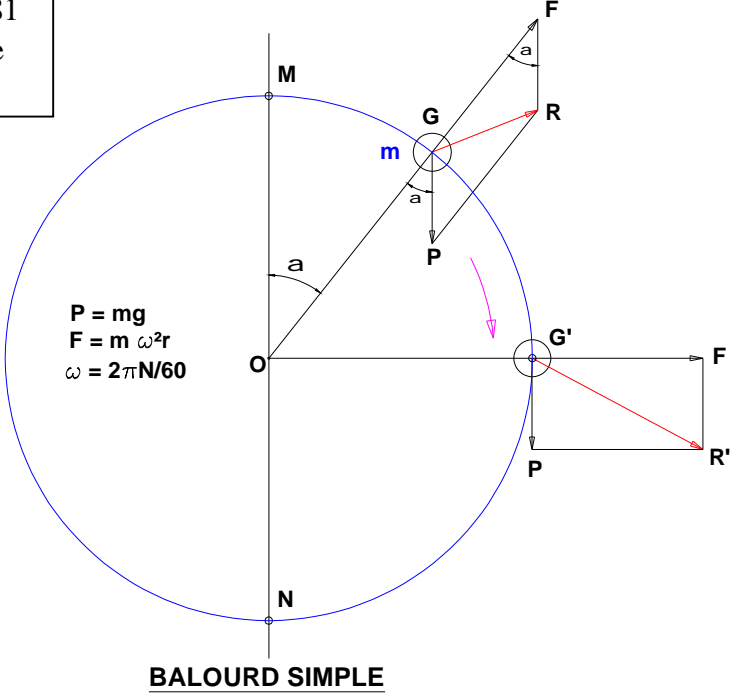


Figure n°5

Si le point G se déplace en G', nous voyons que la résultante R' sera différente de R, et orientée différemment. Il en sera de même pour une autre position G''

En reportant les résultantes R, R', R'' au point O, nous voyons que l'extrémité décrit un cercle rouge, de centre I, et décalé vers le bas par rapport à O. Ainsi le centre de notre disque est soumis à des efforts continuellement variables, vers le haut, le bas et latéralement. C'est cette résultante variable qui crée le balourd, et par suite les vibrations. (figure n° 6)

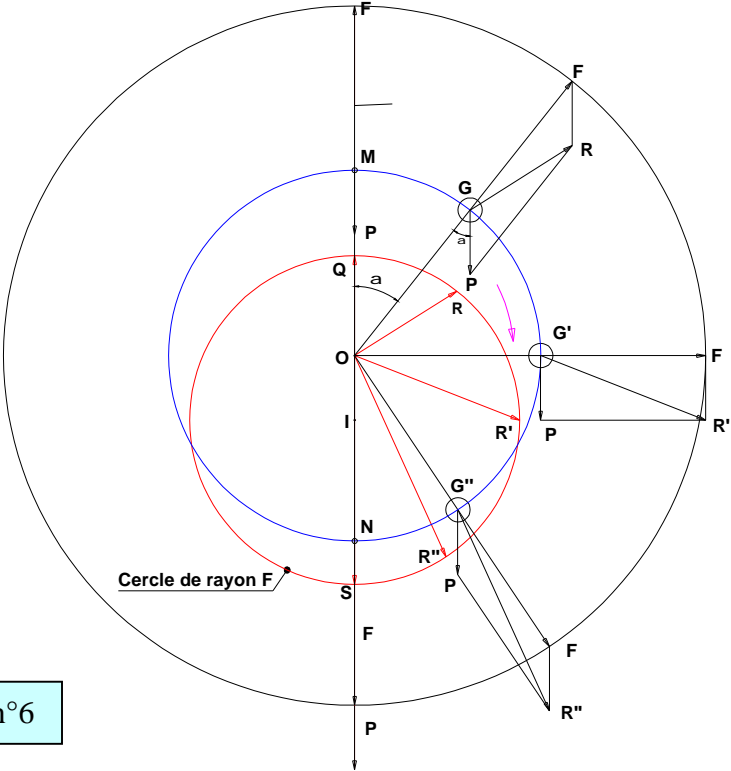


Figure n°6

Nous allons calculer le rayon de ce cercle rouge et la valeur du décalage OI.

Si nous revenons à la figure n° 5, en considérant le triangle GFR, une relation dans le triangle quelconque en fonction de l'angle α s'écrit :

$GR^2 = GF^2 + FR^2 - 2 GF.FR \cos \alpha$ (α étant l'angle de rotation par rapport à OM, on a aussi l'angle $GFR = \alpha$)

Si l'on remplace les segments par leur valeur : $GR = R$ (résultante), $GF = F$ (Force centrifuge), et $FR = P$ (poids), nous obtenons :

$$R^2 = F^2 + P^2 - 2FP \cos \alpha$$

- Points remarquables : - Au point M, nous aurons $\alpha = 0$ et $\cos \alpha = 1$ d'où $R^2 = (F-P)^2$ et $R = F - P$

- Au point G', $\alpha = 90^\circ$ et $\cos \alpha = 0$ d'où $R^2 = F^2 + P^2$ et $R = \sqrt{F^2 + P^2}$

- Au point N, $\alpha = 180^\circ$ et $\cos \alpha = -1$ et $R^2 = (F+P)^2$ avec $R = F + P$

Si nous considérons le diamètre QS du cercle rouge de centre I, nous aurons OQ (au point M) = F- P
Et OS (R au point N) = F+ P.

$$D'où QS = F - P + F + P = 2 F \quad QS = 2 F$$

Le cercle rouge a donc un diamètre de 2 F soit un **rayon égal à F**.

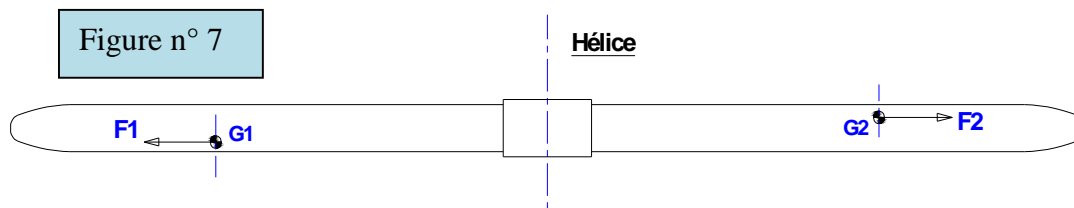
Décalage du cercle rouge par rapport au disque bleu : Nous avons IS= F et OS = F+ P d'où
 $OI = OS + SI = F + P + (- F) = P$ Le décalage des centres est égal au poids P du balourd.

$$OI = P$$

Conséquences : 1) Plus la vitesse de rotation est forte et plus la force centrifuge sera grande, et le rayon du cercle rouge sera grand (amplitude des vibrations importantes).
2) Plus la valeur du balourd augmente , plus les variations d'amplitude des vibrations seront fortes.

3-2) Balourd de couple : Comme nous l'avons vu au paragraphe 2-2, sur la vue de profil, le décalage des centres de gravité G1 et G2, entraîne un balourd décelable uniquement en essai dynamique.

Ce balourd est appelé balourd de couple car les forces centrifuges agissant sur les 2 centres de gravité G1 et G2 créent un couple de torsion sur l'hélice.(voir figure n° 7)



3-3) Balourd dynamique : On appelle ainsi la somme des balourds statique et de couple, ainsi :

$$\text{Balourd dynamique} = \text{Balourd Statique} + \text{Balourd de couple}$$

Le balourd se calcule comme suit :

$$B = r \cdot M$$

avec B : balourd en g . mm
r : distance du centre de gravité au centre de rotation (en microns : mm)

M : masse en rotation (hélice) en kg

La distance r étant en général inconnue, le balourd est déterminé par une machine d'équilibrage , qui permet de calculer la masse de compensation. Cette masse réduit alors le balourd à une valeur acceptable.

La norme ISO 1940-1, fixe la qualité d'équilibrage (grade G) suivant la taille de la machine, et fixe le balourd maximal admissible. Dans le cas d'une hélice nous pouvons prendre pour le grade G, la valeur 6,3 précisée sur le graphique figure n° 8.

En fonction du grade G = 6,3, la norme précise aussi la *masse maximale de compensation acceptable* m_{acc} .

Celle-ci est donnée par la formule :

$$m_{acc} = \frac{6,3 \cdot 60}{2 \cdot \rho \cdot N \cdot R_c} \cdot M$$

avec m_{acc} en g.

N : Vitesse de rotation en t/mn

R_c : Rayon de compensation (rayon du cercle sur lequel on fixe les masses de compensation) en mm

M : masse en rotation (en g.)

En prenant l'exemple d'une hélice de 12 kg tournant à 2000 t/mn, sur laquelle on fixerait la masse de compensation sous l'une des vis de fixation de l'hélice (rayon 60 mm pour un moteur O 235).

On obtient :

$$m_{acc} = \frac{6,3 \cdot 60 \cdot 12000}{2 \cdot \rho \cdot 2000 \cdot 60} = 6,02 \text{ g} \quad \boxed{m_{acc} = 6\text{g}}$$

Comme nous l'avons déjà dit, c'est le balourd qui est à l'origine des vibrations. Le balourd est un moment de forces exprimé en g.mm, alors que les vibrations représentent une vitesse, exprimée normalement en inches /sec (IPS) dans le système anglo-saxon ou en m/s (ou cm/sec) dans le système métrique. Nous verrons plus loin que la vibration s'exprime aussi par rapport à l'accélération de la pesanteur g. Nous avons les relations :

$$V = 61,7 \cdot \frac{A}{f}$$

Avec A : Amplitude crête à crête de l'accélération (en g)

f : Fréquence (en hz)

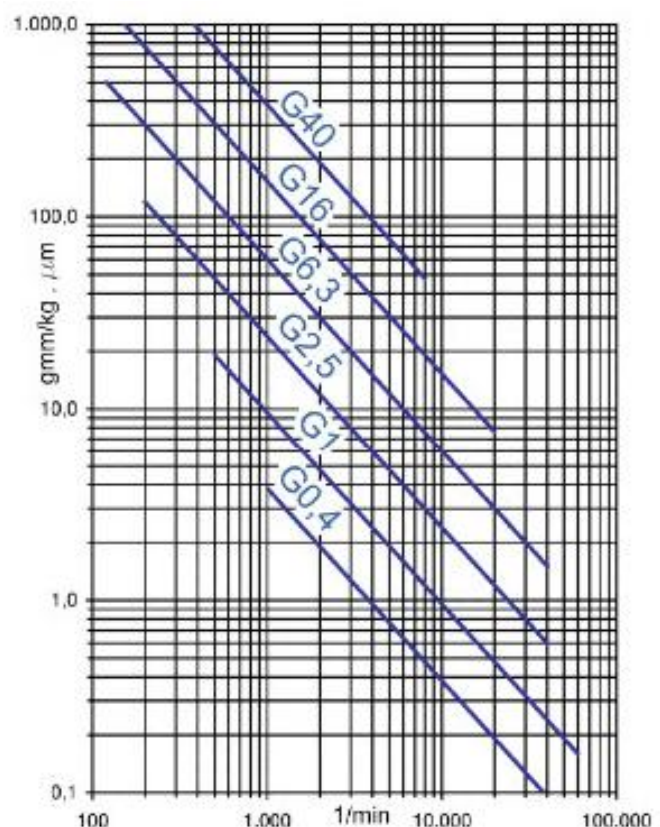
V : Amplitude crête à crête de la vitesse (en in./sec)

et : 1 in/sec = 0,0254 m/s avec RMS = 0,707 Pic

Si l'on mesure les pics de déplacement D(valeur crête à crête) (en inches), on a :

$$D = 9,78 \cdot \frac{A}{f^2}$$

Figure n°8



4) **Mesure du balourd:** Il existe des appareils industriels utilisés par les Unités d'Entretien Avions ou hélicoptères, mais qui sont hors de prix pour les amateurs.

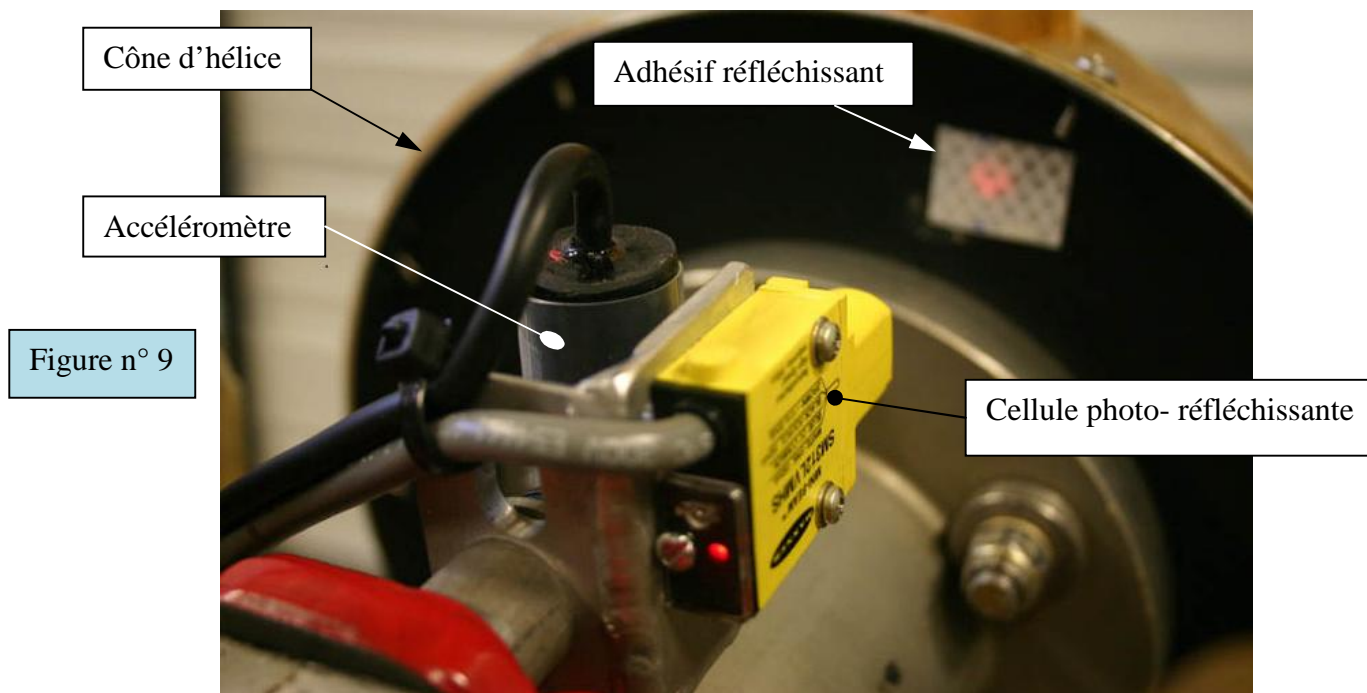
Nous décrivons ici un appareil appelé Dynavibe et vendu aux USA par RPX Technologies.

Le Dynavibe a été installé par un constructeur amateur sur son avion, lui permettant ainsi de faire des mesures en vol.

Un accéléromètre est fixé sur le bâti du moteur, et mesure les accélérations verticales dues au balourd de l'hélice. Il mesure également celles dues au déséquilibre résiduel des pièces en mouvement dans le moteur (vilebrequin, bielles, pistons...) mais qui sont faibles par rapport aux effets dus au balourd de l'hélice.

Un capteur constitué d'une cellule photo réfléchissante fixée également sur le bâti du moteur et d'un adhésif réfléchissant fixé sur la partie arrière d'une pale ou du cône de l'hélice. Ce capteur sert de comptage du nombre de tours hélice et aussi de repérage du passage de la pale en position 0° (top tour).

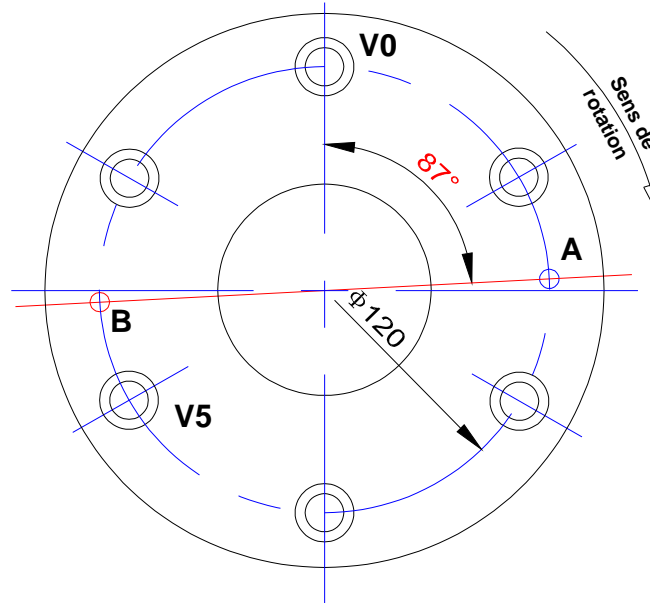
(voir figure n°9)



L'instrument (Figure n° 10) relié à l'accéléromètre et à la cellule photo-réfléchissante indique alors, pour une vitesse donnée de rotation (2751 t/mn), la valeur de la vibration maximale 0,26 inch/sec ou IPS), ainsi que la position de la pale (de 0 à 360°) pour cette valeur maxi, ici 87° (point A figure n° 11)



Figure n° 11



La figure n° 10 représente un plateau d'hélice de moteur O235. On a choisi arbitrairement de prendre la vis de fixation d'hélice V0, comme position 0 (top tour), en y fixant l'adhésif réfléchissant. Le balourd est détecté au point A (sens de rotation de l'hélice vue en place pilote) sur le cercle de compensation (F 120 mm). On devra fixer la rondelle de compensation en B ; ou sur la vis de fixation la plus proche soit V5.

Il suffit alors de fixer une ou plusieurs rondelles calibrées (masse de compensation) sous la tête de la vis de fixation de l'hélice qui se trouve à l'opposé (+ 180 °) de la position de la pale, (soit à 270° par rapport au 0°) pour équilibrer le balourd.

On opère ainsi par tâtonnement, en ajoutant des rondelles, jusqu'au moment où la valeur de la vibration trouvée soit dans les limites tolérables.

Les tableaux suivants figure n° 12 donnent les diverses valeurs d'amplitude de vibrations (crête à crête) avec leur niveau de danger.

Danger : 1,25 IPS : L'hélice doit être retirée et Rééquilibrée

Très rude : 1,00 IPS : L'hélice peut-être rééquilibrée dynamiquement, cependant, une masse de compensation importante sera nécessaire. Un rééquilibrage statique est recommandé. Le fonctionnement du moteur à ce niveau de vibration peut causer des dommages.

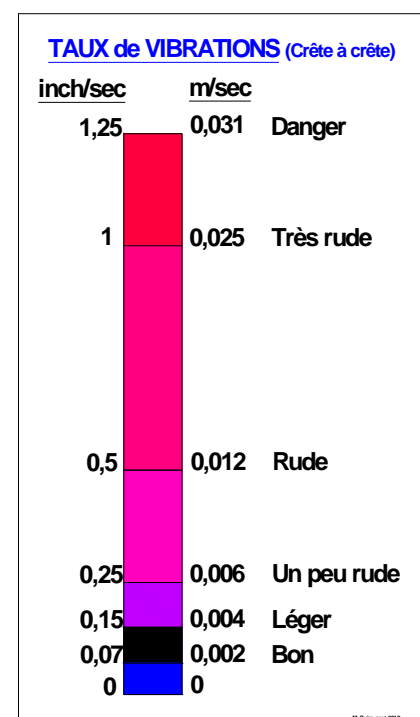
Rude : 0,5 IPS : L'hélice nécessite un équilibrage dynamique. Un fonctionnement du moteur peut créer, à long terme, une usure excessive.

Un peu rude : 0,25 IPS : Un équilibrage dynamique peut améliorer le confort des passagers.

Léger : 0,15 IPS : C'est le niveau de vibration maximum acceptable, après équilibrage dynamique.

Bon : 0,07 IPS : Le niveau de vibration au-dessous de 0,07 IPS, n'est pas décelable par le pilote ou les passagers.

Figure n° 12



5) Utilisation d'un iPhone pour mesurer les vibrations : Une application nommée " Vibration " développée par la société Diffraction Limited

Design LCC, pouvant être téléchargée sur I Pod, I Phone ou maintenant Ipad, via I Tunes , permet de faire un relevé des vibrations subies par une machine en rotation.

Dans notre cas le relevé peut se faire par un support fixé directement sur le carter du moteur (pas recommandé) ou en posant l' I Phone à plat sur le tableau de bord de l' avion.

Les vibrations étant amorties, dans ces conditions, la mesure ne pourra être que relative, c'est-à-dire que le process permettra de réduire les vibrations, sans pour autant connaître leur valeur absolue.

Je reproduis ci-dessous, un test effectué par Tom Zucal de Diffraction Limited Design LCC, sur une hélice d' avion. Il a choisi d'effectuer le test à 1200 t/mn soit à 20 hz avec un Ipod placé sur le haut du tableau de bord et orienté de telle sorte que l'écran soit vertical et dirigé vers la droite, et le bouton principal dirigé vers l'arrière de l' avion, suivant la figure n°13.

Remarque : Le fonctionnement et les réglages de l'application "Vibration " sont expliqués dans le " Vibration Manual 01 à 08 " sur le site de DLD.

Nous indiquons les directions des axes de coordonnées X,Y,Z de l'accéléromètre installé sur l'IPod.

Tom a choisi de relever les données sur l'axe Z, car c'était le pic le plus important en A pour la fréquence de 20 hz en abscisse.

Il a d'abord enregistré les vibrations provoquées par l'hélice avant toute intervention sur celle-ci. Voir figure n° 14 pour le test n° 1.

Il a prévu ensuite d'effectuer 3 tests pour déterminer le balourd.

Dans le test n°2, il a ajouté à priori une masse de compensation constituée de 2 rondelles AN970-3 et d'une masselotte en plomb d'un poids total de 32 gr.

L'ensemble est fixé à l'arrière du flasque du cône d'hélice dans un des 8 trous répartis sur le pourtour du flasque sur un cercle de 25 cm de diamètre. (rayon 12,5 cm)

Ce point de fixation est pris comme point zéro sur le cercle de compensation.

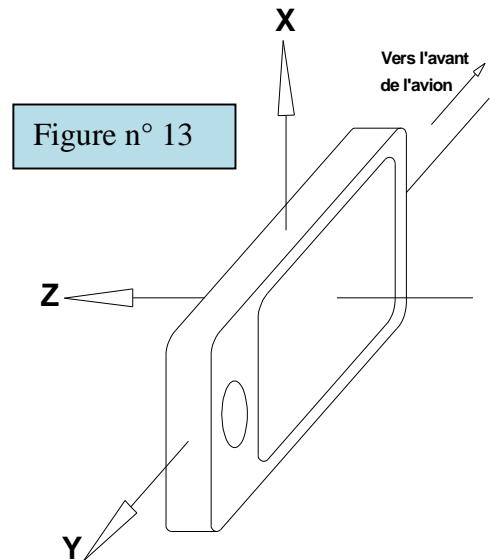
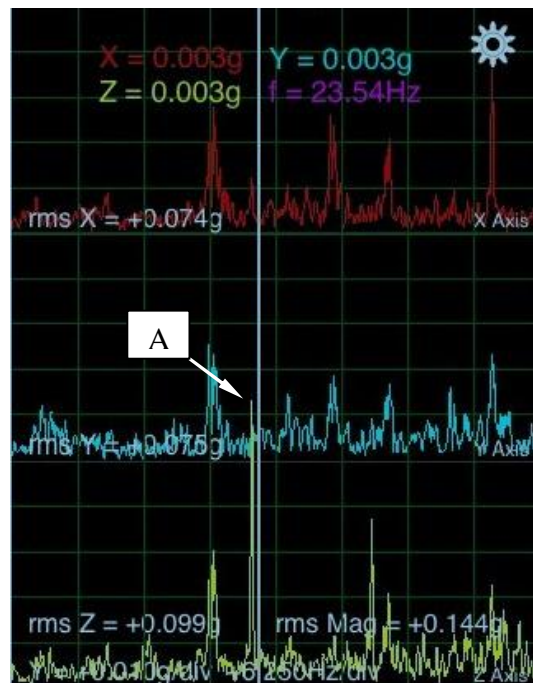


Figure n° 14



Test n° 1 : Figure n°14 : L'essai est effectué au départ sans aucune modification.

Il a été relevé la courbe jaune sur l'IPad (vibrations suivant l'axe Z), un pic de 0,06 g (car chacune des 6 divisions verticales pointées par la flèche A vaut 0,01 g) ,situé à la fréquence de 20 hz en abscisse

Les réglages d'échelle sont effectués par le Time Series Verticale Scale.

L'essai démarre par le bouton Sample après un compte à rebours réglable par Sample Delay (5 sec. est suffisant)

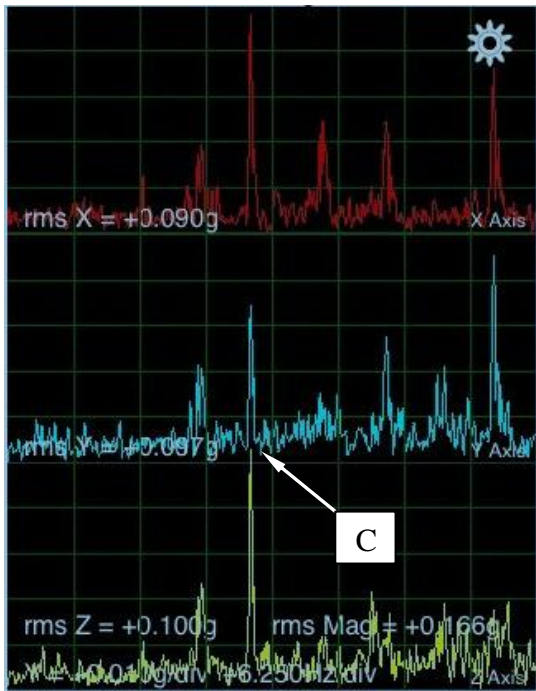


Figure n° 15

Test n° 2 : Figure n° 15 : L'essai est effectué après adjonction des 2 rondelles et de la masselotte en plomb en position 0° sur le flasque.

Le pic sur la courbe jaune se situe au point C à 0,05 g (5 carreaux de 0,01g sur l'axe vertical) Tom explique que le produit de la masse d'essai par le rayon de giration (ici 12,5 cm) ne doit pas dépasser un moment de 750 gr x cm . Il a choisi une masse raisonnable de 32 gr soit un moment de 400 gr x cm. pour ne pas détériorer le flasque par la force centrifuge .

Figure n° 16

Test n° 3 : Figure n° 16 : L'essai est effectué en déplaçant les masselottes de 135° sur le flasque dans le sens de rotation de l'hélice . Les angles sont donnés par la répartition des 8 vis de fixation du cône sur le flasque.

Le pic sur la courbe jaune se situe à 14 carreaux sur l'axe vertical, au point D, soit un pic de vibration de 0,14 g.

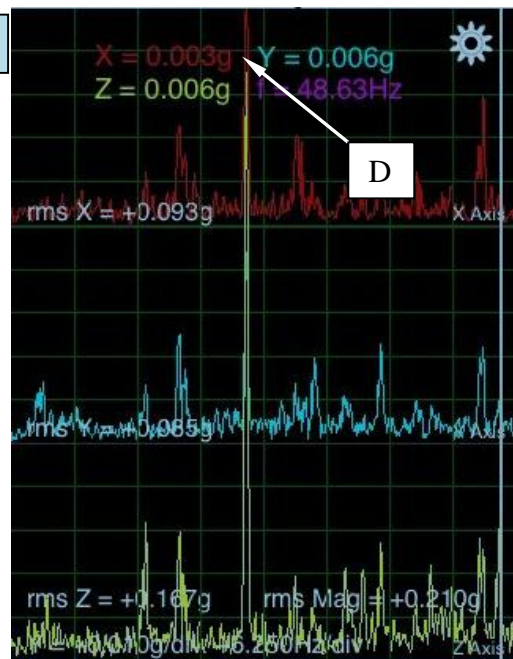
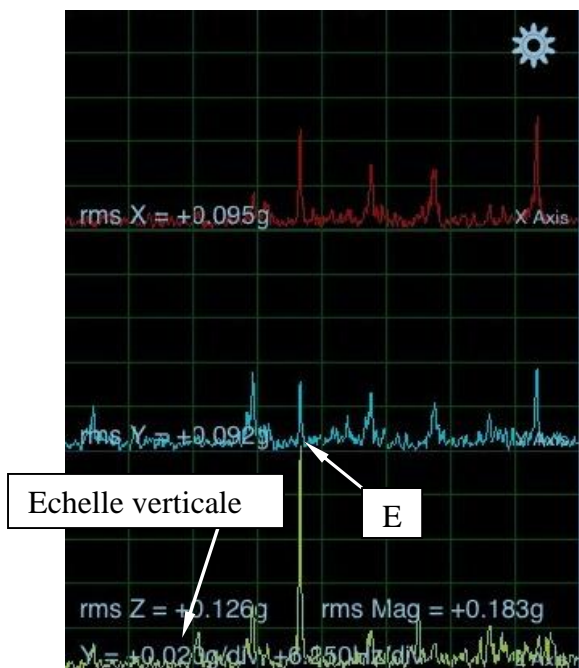


Figure n° 17

Test n° 4 : Figure n° 17 : L'essai est effectué en déplaçant les masselottes , de nouveau de 135°.soit à 225°

Le pic sur la courbe jaune se situe à 0,1 g, au point E. L'échelle verticale a été changée (passée à 0.02 g/ carreau) en bas à gauche du graphique.



Echelle verticale

Après les 3 derniers tests, on obtient 3 valeurs de vibration :

- 0,05 g à 0°
- 0,14 g à 135°
- 0,10 g à 225°

On va utiliser ces données pour déterminer le balourd :
On trace un graphique en polaire (voir figure n° 18)

A partir du point O, on trace OM= 0,05 puis, décalé de 135° par rapport à OM, on trace ON = 0,14 et enfin OP décalé de 225° par rapport à OM, le segment OP = 0,10

On obtient le triangle MNP, et le cercle circonscrit (en noir). Le centre de ce cercle est le point B qui représente le balourd avec l'angle MOB= 154° et une valeur OB de 0,048g

Pour compenser ce balourd, on devra ajouter un poids situé à 180° de OB soit en OB'. L'angle MOB' sera alors de - 26° (par rapport au top départ).

Le point B' n'est situé ni sur le cercle noir, ni sur le cercle mauve.

La masse de compensation est obtenue par tâtonnement, et après un, voire plusieurs tests, jusqu'à ce que le pic en F soit minimal. (figure n° 19).

Le cercle mauve représente (sans échelle), le flasque d'hélice avec ses 8 vis de fixation.

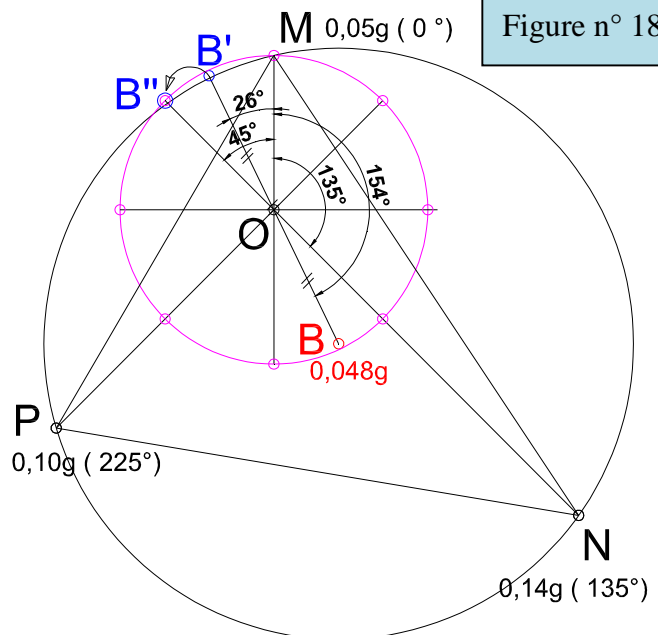
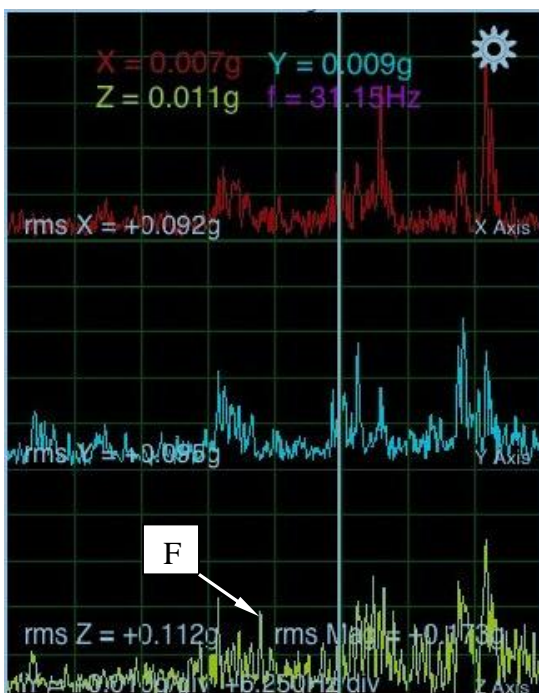


Figure n° 18

Dans son essai, Tom a ajouté 1 puis 2 rondelles d'un total de 7 grammes à 315°, soit à 45° avant le point M, en B'', ce qui correspond au un trou de fixation du cône d'hélice sur le flasque. (Vis de fixation à gauche du point M). La masse de compensation aurait dû être ajoutée théoriquement, au point B'.

Les résultats du dernier test de choix de la masse de compensation, sont repris sur la figure n°19.

Figure n° 19

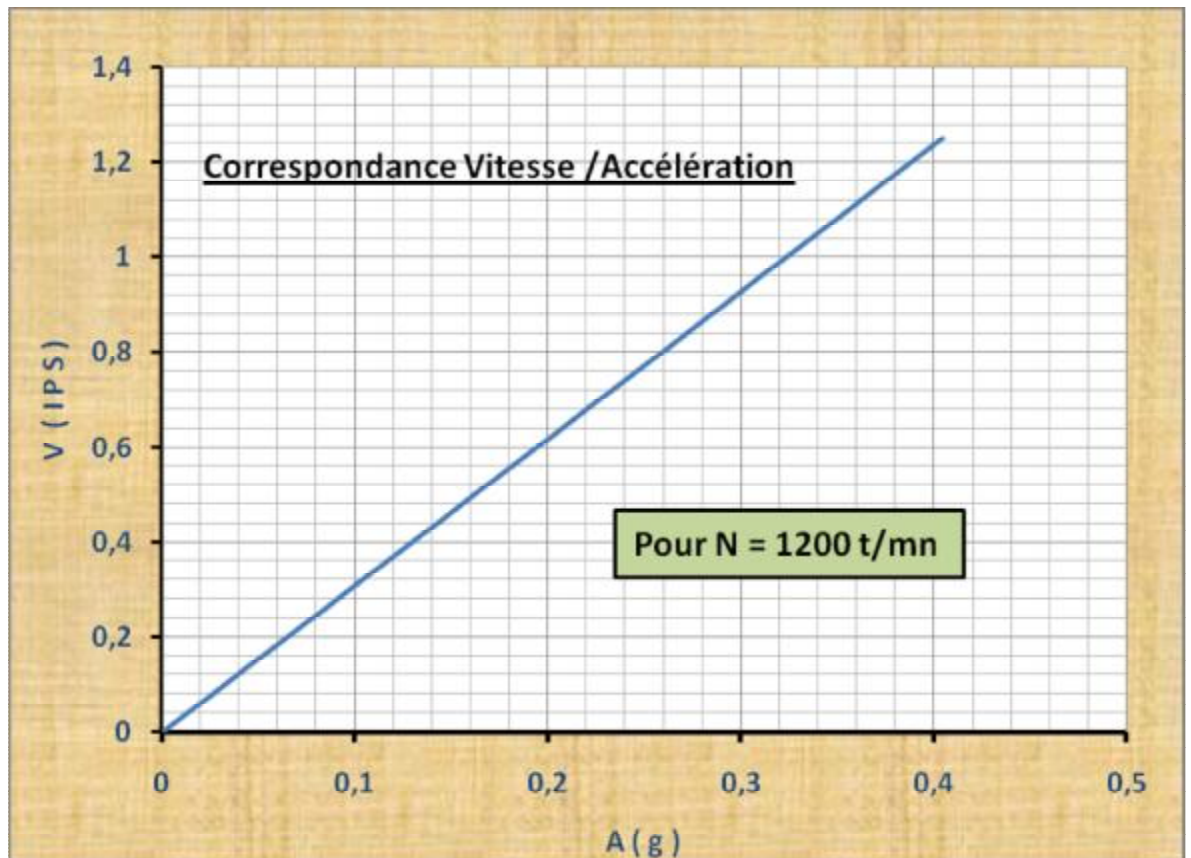


Le pic a été réduit à 0,02 g au point F, et toujours situé à la fréquence 20 hz.

On est donc passé de 0,06g à 0,02g, ou de 0,19 IPS (un peu rude) à 0,06 (bon) soit une réduction d' 1/3.

Pour permettre une meilleure comparaison, j'ai placé ci-dessous un graphique de correspondance entre les « g » et les « IPS » pour une vitesse donnée de rotation (1200 t/min.) (Figure n°20)

Figure n°20



6) Contrôle des vibrations par vibromètre PCE-VT 1000 : La société PCE propose un analyseur de vibration modèle VT 1000 pour 390 € qui permet d'enregistrer le pic de vitesse de vibration (en mm/s) couvrant la gamme de vitesse qui nous intéresse, de 0,1 à 199 mm/s soit 0,04 à 7,7 IPS, avec une résolution de 0,1 mm/s (0,004 IPS).

La figure n° 21 montre l'appareil portatif avec son écran d'affichage digital.

Il suffit d'appuyer la pointe du capteur sur le carter du moteur en fonctionnement à la vitesse de rotation désirée (par exemple 2000t/mn) en le tenant verticalement. Lorsque l'on retire le vibromètre la mesure est enregistrée.

Figure n° 21



michel.suire2@wanadoo.fr

