
















# FOXPAPA , construction amateur d'avions, ULM



-  [Accueil](#)
-  [Plan](#)
-  [Comment rédiger ?](#)
-  [Quoi de neuf ?](#)
-  [Pourquoi ce site ?](#)
-  [Annuaire](#)

-  [A VENDRE](#)
-  [Appareils, vols et navigations .](#)
-  [Bibliographie](#)
-  [Ces personnages qui nous ont marqués ...](#)
-  [CONSTRUIRE](#)
-  [Coups de gueule !](#)
-  [Le futur !](#)
-  [Les Foxpapas ont fait .](#)
-  [Nous et l'administration](#)

Vous êtes ici ► [Accueil](#) ► [CONSTRUIRE](#) ► [L'entretien, la sécurité etc ...](#) ► [La théorie !](#)

## Les moteurs et les vibrations de torsion.

samedi 7 février 2004

### Les groupes moto propulseurs et les vibrations de torsion

Par Donald P.Hessenaur

Aimablement traduit par Etienne.

***Dans ces pages Don apporte son expérience exceptionnelle de contrôleur d'aéronefs. Un diplôme de la Northrup Université et son intérêt durant toute sa vie pour les nouveaux concepts aéronautiques, ses idées sur la sécurité et les progrès réalisés pour transformer les moteurs provenant de l'industrie automobile ont nourris cet article .***

***Heureusement, son apport permet une meilleur appréhension des défis portés aux ingénieurs qui conçoivent les avions modernes. Nous serions heureux de recevoir d'autres articles à ce sujet .***

Puisque le prix des moteurs continue d'augmenter au delà de ce que peuvent consentir ceux qui veulent construire et faire voler leur propre avion ; beaucoup se tournent vers d'autres motorisations .Ceci n'est pas nouveau. Depuis les frères Wright beaucoup ont conçus, construits, ou transformés des moteurs pour un usage aéronautique . Parfois ces moteurs proviennent d'autos, de motos, de moteurs hors-bord et même de moto-neiges, avec plus ou moins de réussite .


### **LA TRANSFORMATION DES MOTEURS AUTOMOBILES .**

Aujourd'hui, on voit beaucoup de moteurs d'auto transformés pour un usage aéro, ce qui est certainement une voie viable. Comparé à un Lyco.. ou un Conti, un moteur auto est très en avance techniquement et bien meilleur marché. Malheureusement ces moteurs sont conçus et optimisés pour les voitures et pas pour les avions .Ils tournent beaucoup plus vite et les caractéristiques des vibrations de



#### DANS LA MEME RUBRIQUE :

- [Réflexions sur les profils](#)
- [Les caractéristiques de certaines fibres employées en aviation](#)
- [La formule de Schrenk](#)
- [Comment mesurer le pas d'une hélice ?](#)
- [C'est quoi la transparence d'une hélice ?](#)
- [S'en sortir avec les nombreux aciers sur le marché ...](#)
- [La conception d'un modèle réduit , dossier adaptable a nos CNRAs](#)
- [Avantages et inconvénients de la formule Canard](#)

 **Rassemblés  
passés et à venir**

 **SECURITE**

 **Téléchargements**

**Espace Rédaction**



~ inscription ~



b  
SPiP  
o

Ecrivez moi

torsion qu'ils engendrent, en entraînant une transmission, un pont et des roues, sont très différentes quand ils entraînent une hélice d'avion.

L'amortissement du aux pneus sur la route , et l'inertie due au poids de l'auto sont très différents de ceux dus à une hélice tournant dans l'air .

### **LA TORSION ET LES EFFETS DE RESONANCE**

Je me suis aperçu ces dernières années , que beaucoup de personnes ou de société concernées par l'étude de l'adaptation des moteurs automobiles, ne semblent pas avoir pris conscience des problèmes dus aux vibrations de torsion. Je ne dis pas que ce soit toujours le cas car quelques-uns en ont tout à fait conscience, mais d'autres semblent le négliger comme un problème mineur.

Il leur semble qu'il suffit de coller un amortisseur en caoutchouc, un embrayage centrifuge, ou quelque autre équipement, pour évacuer le problème ; or mon expérience montre que justement le problème demeure. Ceci pouvant faire capoter tout un projet, pas seulement techniquement, mais aussi entraîner un gouffre financier pour la personne ou la société concernée. La probabilité de succès sera d'autant plus grande que les personnes en charge du projet savent en tenir compte et utilisent des procédures reconnues en conception aéronautique pendant l'étude et la réalisation d'un moteur.

Il faut encourager la créativité et l'expérimentation , mais aussi savoir que 9 fois sur 10 ce qui semblait être une solution nouvelle et originale, a déjà été maintes fois testée auparavant..

Les lois physiques relatives aux vibrations sont les mêmes aujourd'hui qu'il y a 20 ou 50 ans ; et je suis le premier à l'admettre. Je ne sais pas tout en matière de vibrations des ensembles tournants, j'ai toutefois une expérience certaine en la matière. Mon espoir, en la racontant, est d'éviter des déconvenues à ceux qui me lisent.

### **MON EXPERIENCE**

J'ai participé à 3 projets intéressants impliquant des problèmes de vibration de torsion à des degrés divers . Le premier était le gyro **Avian 2-80**, développé à Georgetown, Ontario, Canada, au début des années 1960. Les performances et la mise en œuvre de ce gyro n'ont été surpassées par aucune autre machine de cette classe jusqu'à aujourd'hui. Le second était le kit d'avion **BD-5 "Micro"** développé par Jim Bede à Newton, Kansas au début des années 70. Le troisième était le moteur pour l'hélico **RW-133** de B.J Schramm au milieu des années 70.

### **LES VIBRATIONS SUR L'AVIAN**

Le gyro Avian est un modèle "push" avec une hélice propulsive Hartzell. Le rotor d'une grande inertie du type tripale articulé semi-rigide exigeait un système de mise en rotation massif. Sur les premiers prototypes il y avait une courroie crantée à dents carrées de 76 mm (3 inches) de large pour usage sévère.

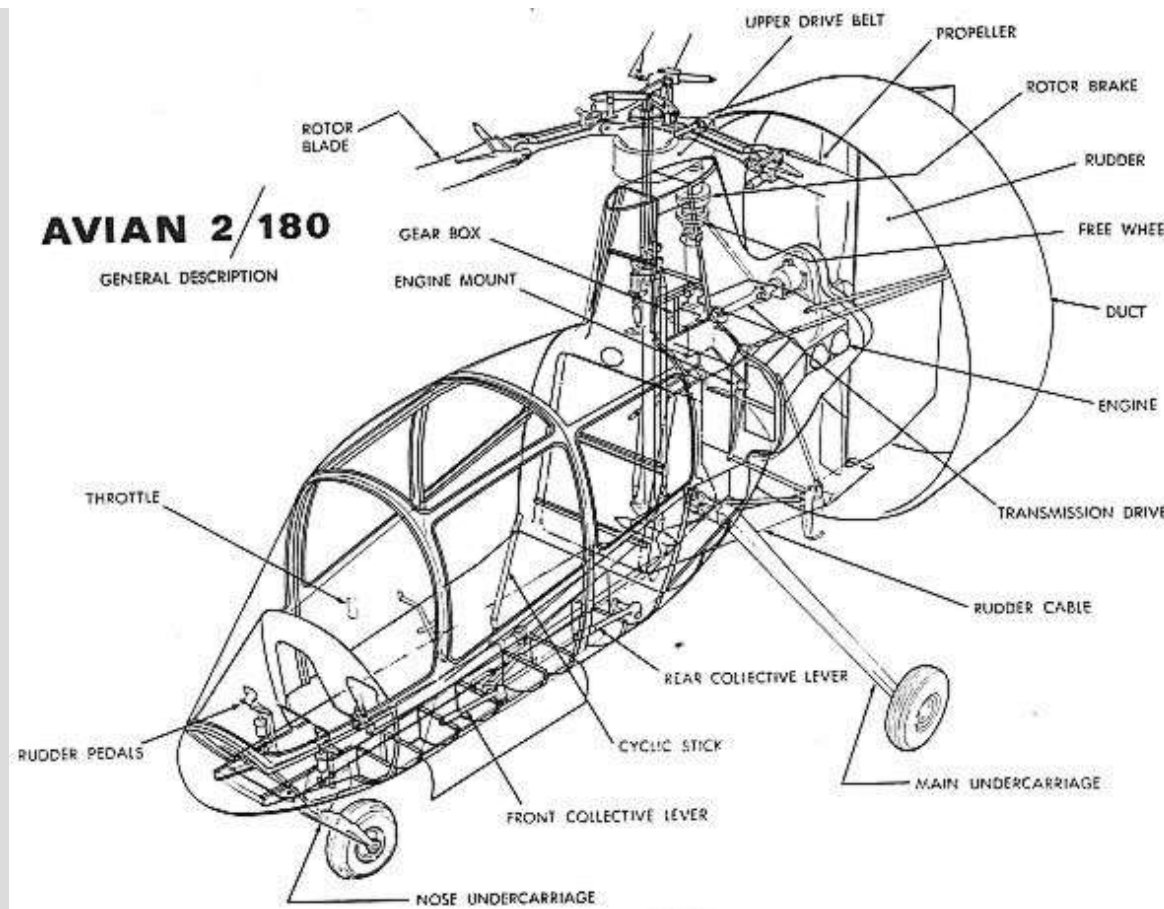
Elle transmettait l'énergie du moteur par une petite poulie vers une poulie plus grande le tout placé à la base du support de rotor. Parfois, au démarrage du rotor, et sous l'effet d'un effort extrême, cette courroie s'allongeait, et se décrantait, d'où un trop gros effort sur les poulies ce qui déformait les supports de roulements. (Une courroie du type HTD à dents arrondies aurait résolu ce défaut, mais ceci n'avait pas encore été envisagé au début des années 60.)

C'est à cette époque qu'Avian démarrait l'étude et la réalisation de son dernier prototype, complètement redessiné, et très amélioré dans tous les domaines par rapport aux protos précédents. Une de ces améliorations résidait dans le système de mise en rotation du rotor : la largeur de la courroie du haut était portée à 101 mm (4 inches) et les supports de paliers de poulies renforcés. Un embrayage hydraulique multidisque permettant de transmettre un couple plus élevé, était monté sur le moteur côté hélice. Cette amélioration mécanique donnait au nouveau proto des performances de décollage absolument stupéfiantes : le gyro était capable de décoller en 20 mètres (50 feet) . Une approche par le renforcement des éléments supérieurs avait résolu le problème d'entraînement de la voilure, en rigidifiant le support et en utilisant une courroie et des poulies plus larges.

Mais avec le temps, d'autres problèmes commencèrent à apparaître : la courroie du bas, côté moteur semblait beaucoup flotter à certains moments. Après quelques lancements de rotor, l'accouplement chauffait allant jusqu'à bleuir. Si on avait enlevé le capot aussitôt après une mise en rotation, on aurait vu l'accouplement porté au rouge. Les contraintes de torsion transmises s'avéraient très supérieures à celles qui avaient été calculées. J'avais entendu parler des vibrations de torsion pendant mes études, mais à ce moment là, je n'imaginai pas que le problème rencontré avec le système d'entraînement pouvait provenir de ces vibrations.

### ***ESSAIS SUR LES OSCILLATIONS ET LES VIBRATIONS***

Chez Avian, je travaillais avec un consultant qui avait pour mission de mesurer les vibrations. du sol, et de faire une analyse du "flutter" sur notre nouveau proto, c'était une technologie relativement nouvelle, et il était la seule personne à faire ce travail à ce moment là. Quoique venant de Toronto, Canada, il travaillait pour toute l'industrie aérospatiale Américaine. Il utilisait de nombreux vibreurs attachés à la structure qu'il faisait vibrer à différentes fréquences, ces vibreurs étant commandés depuis un pupitre. Des capteurs de vibration magnétiques étaient fixés le long de la structure, en outre il en gardait un sous la main, ce qui lui permettait de le déplacer tout autour. Ces capteurs mesuraient les amplitudes des vibrations en divers points de la structure, qui étaient visualisées sur un oscilloscope. Il pouvait ajuster la fréquence de façon à ce que les différentes parties de la structure vibrent à leur fréquence de résonance.



Les aiguilles des instruments, la poignée de porte, le plexi de la fenêtre latérale, un support de conduite ou le gouvernail pouvaient être mis individuellement en résonance. C'était réellement stupéfiant et mystérieux de voir cet ingénieur ajuster la fréquence pour secouer la partie de l'appareil qu'il avait choisie.

Il faisait une cartographie complète des fréquences de tout ce qui pouvait entrer en résonance sur le gyro. Tout ceci pour voir si un élément pouvait entrer en résonance dans les fréquences de fonctionnement du moteur, du système d'entraînement ou du rotor, et donc aurait pu se casser par la suite. Cette analyse nous a permis de trouver de nombreux éléments qu'il a fallu renforcer ou redessiner pour qu'ils ne vibrent plus et n'entrent pas en résonance pendant le vol.

Pendant les 3 jours pendant lesquels j'ai travaillé avec cet ingénieur et son assistant, j'ai acquis une somme de connaissance au sujet des vibrations et des mises en résonance sur un aéronef.

**BEDE AIRCRAFT**

J'ai été contacté par Burt Rulan à la Bede AincraH Cy qui m'a proposé un poste d'ingénieur. et j'y suis entré le 6 juillet 1972. Après les années Avian, j'étais très attiré par l'étude des vibrations et je me polarisais sur les problèmes de torsion dans les systèmes en rotation. Je passais mes heures perdues à étudier les ouvrages techniques et à lire les nombreux articles sur le sujet, dont beaucoup écrits par Molt Taylor. J'étais très curieux de voir comment ils avaient traité le problème des vibrations de torsion sur le BD-5.

Pendant ma première semaine à Bede, Les Berven volait avec le BD-5 tous les jours. Sitôt atterri les mécanos ouvraient le capot pour voir l'état du moteur, je n'ai pas été long à voir que le problème des vibrations se posait en de nombreux endroits. Le moteur avait des problèmes de refroidissement et de richesse malgré les efforts pour maintenir l'EGT et la CHT au dessous de la ligne rouge. Mais celui que j'ai retenu était l'échauffement anormal de la courroie et des accouplements de transmission.

Alors qu'ils essayaient une chenillette à différents rapports d'accouplements, la surchauffe de l'accouplement observée sur l'Avian me revint en mémoire lorsque je remarquais que ces accouplements étaient décolorés par les températures élevées .

### ***LES TORSIONS À BEDE***

Pendant les semaines suivantes, ils firent beaucoup d'essais au sol, et j'avais la responsabilité du programme de pesée et de centrage du BD-5, comme je l'avais fait chez Avian. Comme l'Avian 2-180, le BD-5 avait un gros problème de centrage . Un jour que le moteur tournait au sol depuis un certain temps, il y eut soudain une grosse explosion. La courroie s'était désintégrée et les morceaux jonchaient le tarmac. Ces morceaux de courroie étaient aussi durs et cassants que de la bakélite et je réalisai aussitôt ce qui arrivait : c'était un problème de résonance de torsion. Je le dis aux autres ingénieurs qui me regardèrent comme une bête curieuse, ils pensaient que je plaisantais et ne firent pas attention à ma remarque car j'étais le nouveau .

### ***LA COURROIE HTD UNIROYAL***

Peu après l'incident de la courroie, des spécialistes des courroies furent invités à venir voir notre situation. Ils apportèrent plusieurs courroies telles que V normale, PolyV et différentes courroies crantées, et j'en remarquais une que je n'avais jamais vue auparavant. C'était une courroie à crans arrondis originale, une HTD de 6mm.. Après les difficultés rencontrées chez Avian avec les crans carrés, lorsque je vis cette courroie à crans arrondis, je compris que c'était une conception parfaite. Elle pouvait être utilisée sur un aéronef avec beaucoup plus de fiabilité qu'une courroie carrée. D'autant mieux que la perte de puissance était extrêmement faible à cause de la réduction des frottements, d'où un bien moindre échauffement.

Après cela on me demanda de commencer une étude des différents systèmes de courroies et de m'intéresser aux problèmes de transmissions et d'installation des moteurs. Parallèlement, je poursuivais le programme de réduction de poids notamment sur la partie arrière. Et j'avais bien l'intention d'y parvenir. Tout ce qu'on pouvait alléger à l'arrière permettait de rechercher ce qu'on pouvait enlever à

l'avant. C'est ainsi que commence l'étude d'un nouveau système d'entraînement utilisant la courroie HTD de 8mm.

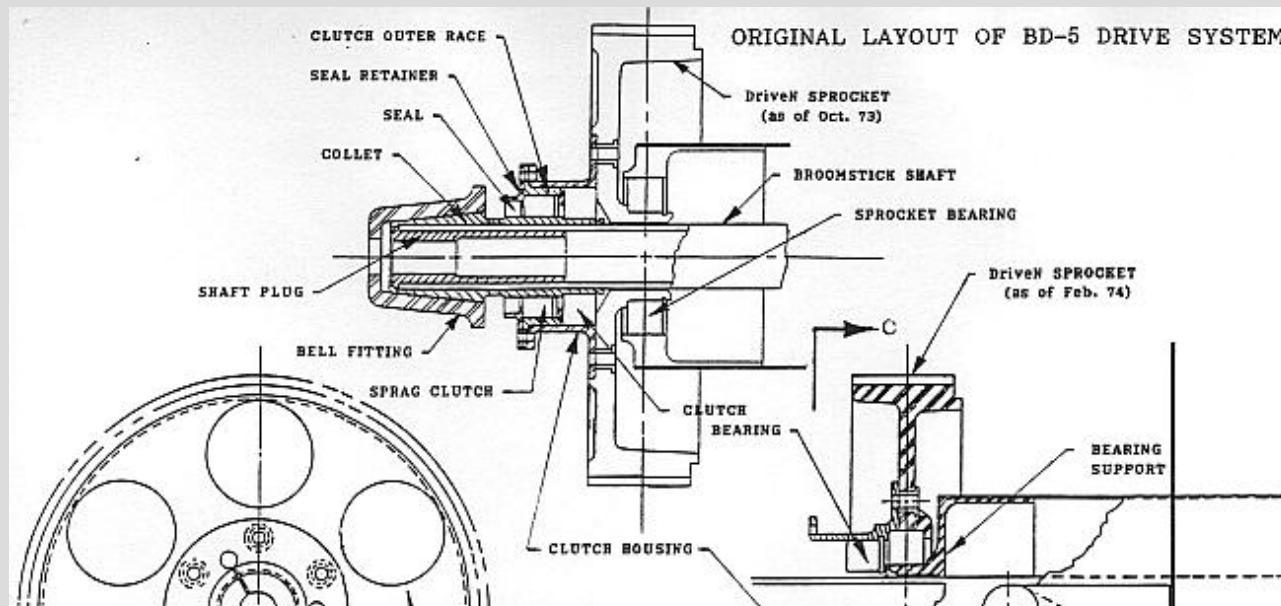
Lorsque tout fut assemblé et mis en service, le système paraissait bien fonctionner, mais je ne tardais pas à m'apercevoir qu'à certains régimes de rotation, la courroie se mettait à flotter. Nous avons tendu la courroie au maximum, mais le flottement semblait persister. Malgré tout le problème semblait momentanément résolu et Les Berven repris les vols. En fin de compte, si nous avions eu une casse, nous aurions pu réparer ou remplacer la pièce et continuer. Mais pendant ce temps nous avons plus de tracas avec la chenillette. Des articles sur le BD-S qui était devenu très populaire, parurent dans différentes revues et les ventes de kit étaient en progression.

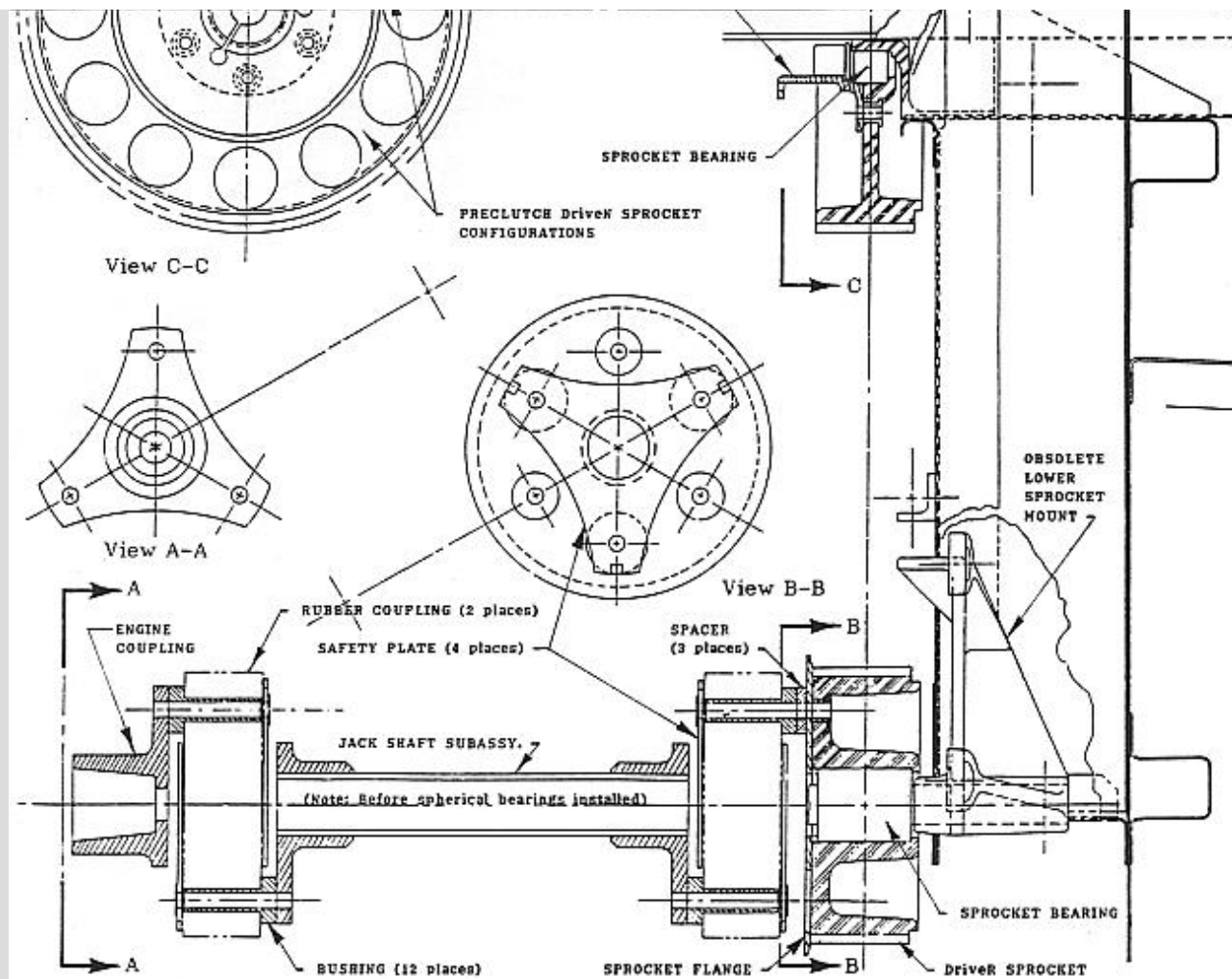
### **CASSE DU BÂTI MOTEUR**

Il se produisit un incident significatif : la casse du bâti moteur par rupture de fatigue. Ce bâti fait de tubes soudés en chrome molybdène à haute teneur en chrome, montrait une cassure cristalline bizarre, que je reconnus devoir aux vibrations de torsion qui n'avaient pas été éliminées du système.

On soude un nouveau tube plus résistant pour renforcer le bâti, mais après quelques vols, il se casse à nouveau. Un nouveau bâti plus solide est fabriqué et monté, mais peu de temps après, nouvelle casse.

Cette fois ce n'est plus le bâti, mais les plaques qui relient le bâti au fuselage, le long desquelles certaines parties sont sévèrement criquées ; de plus, dans la cellule, beaucoup de rivets menacent de partir. Tout ce que nous avons modifié avait fait déplacer les ruptures d'un endroit à un autre : le problème de torsion demeurait. Ma plus grande difficulté était que personne ne voulait me croire. Pour finir, on a mis un galet presseur sur la courroie : c'était la solution.





Lexique du dessin :

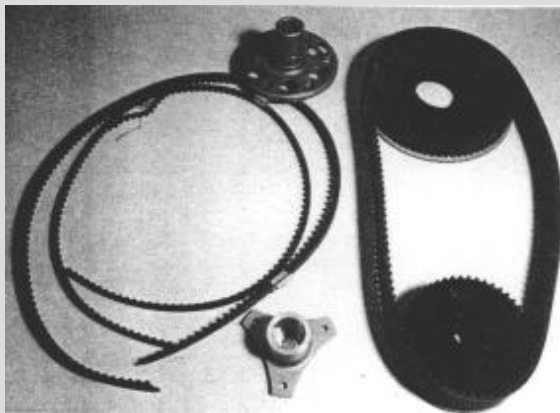
clutch	embrayage accouplement	engine	moteur	shaft	arbre
seal	joint	coupling	accouplement	housing	boitier
bearing	roulement	rubber	caoutchouc	sprocket	poulie crantée

driver	meneur	jack shaft	arbre de liaison		
driven	mené	spacer	rondelle		

### **MYSTERIEUSE CASSURE DE L'ARBRE DE TRANSMISSION**

Les difficultés rencontrées avec le système de propulsion se sont aggravées avec l'utilisation des moteurs deux temps. La première des priorités était de garder le moteur en état de fonctionner pour les démonstrations et les shows. (Si seulement le Rotax 562 avait été disponible, nous aurions éliminé le principal ennui avec le BD-5 !).

Le refroidissement posait un problème difficile et un soir nous avons presque passé la nuit pour trouver une solution. Burt se sentait réellement désarmé, et en désespoir de cause, il prit un des immenses ventilateur électrique, le raccorda à une grosse conduite qu'il rattacha au compartiment moteur du BD-S. Il sentait que si cela ne pouvait pas refroidir correctement le moteur, il n'y avait aucune chance pour que nous y parvenions en vol. Nous avons fait un certain nombre de cycles : pleine puissance -arrêt ; et pendant un de ces cycles, soudainement quelque chose se cassa, le moteur s'emballa puis s'arrêta. Nous vîmes que l'hélice pouvait tourner librement sans entraîner la courroie ni le moteur. Nous avons tout examiné sans voir ce qui avait cassé. L'arbre n'était pas rompu, rien ne paraissait détérioré, c'était un vrai mystère.



Les accessoires du système d'entraînement par courroie HTD du BD-S. Les essais avec plusieurs largeurs de courroie étaient faits pour établir l'indication de durée de vie.

Le système d'entraînement à ce moment là utilisait la courroie HTD et l'arbre de transmission supérieur d'origine. Si mes souvenirs sont bons, cet arbre tubulaire de 75 mm (3 inches) de diamètre et d'environ 1,3 m (4 feet) de long et de 3,2mm.(0.125 inch) d'épaisseur avait une portée de roulement usinée à chaque extrémité, avec l'hélice montée sur le manchon arrière et la poulie HTD sur le manchon avant.

Ces manchons d'extrémité étaient ajustés à l'intérieur de l'arbre, avec 3 vis AN-4 de chaque côté qui se vissaient radialement dans l'arbre. Ces vis étaient très courtes donc filetées au ras de la tête, des filets se trouvant donc dans l'interface entre le manchon et l'arbre, et c'étaient elles, les 3 vis de chaque extrémité, qui transmettaient le couple de la poulie HTD au manchon d'hélice à l'arrière. Ceci était la disposition de l'arbre supérieur quand je suis arrivé à Bede : avoir le couple transmis par les vis au droit des filets n'est pas très académique, mais ils avaient déjà tenu un an ou plus.

### ***LES TORSIONS FONT ENCORE DE LA CASSE***

Telle était la mécanique quand nous avons commencé à considérer chaque pièce une par une. Quand nous avons retiré l'arbre supérieur, nous avons constaté que les 6 vis, 3 de chaque côté, avaient cassé en même temps, ce qui était bizarre ou de la magie noire. Vous auriez pensé que si quelque chose devait casser, ce serait la partie avant, qui en déchargeant l'arbre aurait sauvé la partie arrière. Mais non, des 2 côtés de cet arbre de 1,3 m., les 6 vis ont cassé en même temps et de la même façon . Elles présentaient une fracture cristalline et semblaient avoir été malmenées depuis quelque temps.

C'est alors que Burt et les autres ont convenu des résonances de torsion. Immédiatement nous avons téléphoné à Jim Bede pour l'informer . En moins d'une semaine, Jim nous amena Al Beaufrere, un expert des vibrations venant de Long Island avec qui il me demanda de travailler à résoudre le problème de torsion. Al utilisa deux dispositifs de test, très lourds et compliqués mais qui nous indiquèrent la voie à suivre. J'en profitais pour en apprendre le maximum, ce qui, avec le bagage acquis précédemment, donnait le savoir qui devait nous conduire à trouver la solution des ennuis.

### ***LE SYSTEME DYNAFLEX DE MOLT TAYLOR***

Après le départ de Al je commençais à étudier un nouveau système d'entraînement basé sur les principes appris. Et c'est à cette époque qu'une bonne partie du staff du bureau d'études a été mutée dans le nouvel immeuble de Bede Product Development. Je partageais mon bureau avec un autre ingénieur appelé Larry Heuburger qui avait participé à la conception du bimoteur Derringer. Larry connaissait très bien Molt Taylor et pouvait persuader Jim Bede de lui demander de concevoir et réaliser un petit accouplement dynaflex en aluminium. Je dois dire qu'il nous apporta un beau travail qui fut monté directement sur la sortie du moteur, relié au système de courroie HTD et l'arbre supérieur renforcé que j'avais réalisé entre temps. Les vibrations de torsion semblaient avoir disparu, et pendant qu'ils essayaient le dyna flex, je menais à bien l'étude et la réalisation de mon nouveau système d'entraînement.

### ***L'ARBRE " MANCHE A BALAIS "***

J'en arrivais à la conclusion, en me basant sur l'enseignement reçu de Al Beaufrere, que nous devions réduire très fortement la fréquence de torsion du système d'entraînement en diminuant son élasticité de torsion. Stan Welles, notre spécialiste des contraintes, suggéra un arbre en alu 6061 T6 de 25,4 mm (1 inch) de diamètre et 2,4mm(.095 inch) d'épaisseur que nous avons appelé notre "arbre manche à balais", et nous avons utilisé le même pour les arbres haut et bas.(jackshaft).

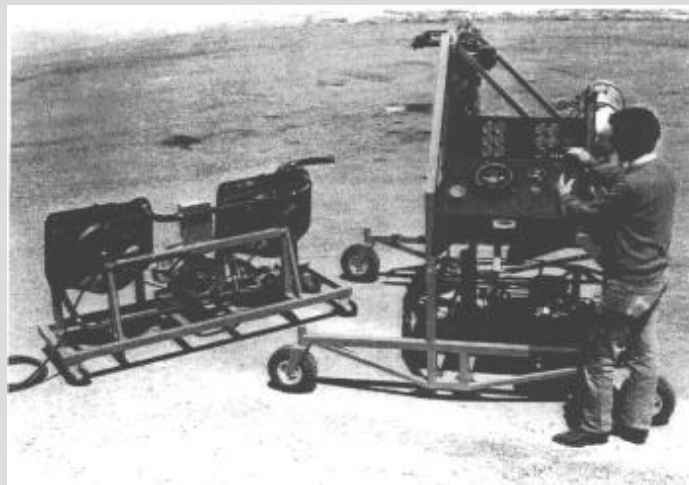
Un accouplement à plots en caoutchouc très souple fut monté à chaque extrémité de l'arbre du bas. Cet ensemble inférior transmettait la puissance à la poulie HTD inférieure et permettait le déplacement de l'engin. On ne pouvait plus approvisionner les poulies plastiques faites en bakélite agglomérée par la Budd Corporation qui avaient des caractéristiques d'usure convenables pour une courroie HTD, mais très inférieures à celles des poulies en aluminium anodisé. qui, en outre, étaient plus légères.

La poulie du bas fut montée sur un support réglable lui même monté sur le panneau du compartiment moteur. La courroie passait sur la poulie supérieure reliée à l'extrémité avant de l'arbre du haut. Le rapport des poulies était de 1.6/1.0 et des roulements supportaient la charge de la courroie via les poulies, charge relativement faible, car la courroie n'était pas préchargée, car il n'est pas nécessaire d'avoir une courroie très tendue avec un dispositif souple de transmission du couple.

Puisque l'arbre du haut ne faisait que 25,4 mm(1 pouce) de diamètre extérieur, 2 paliers furent disposés pour empêcher les vibrations latérales. Un autre palier fut monté sur le manchon arrière pour encaisser la charge de l'hélice. (Plus tard, après que j'eus quitté Bede, Dan Cooney rajouta un autre palier à l'extrémité arrière de l'arbre pour mieux absorber les charges dues à l'effet gyroscopique de l'hélice. )

### **LES EMMANCHEMENTS**

Les accouplements sur l'arbre du bas et le manchon d'hélice sur l'arbre du haut étaient fixés par des manchons frettés à la presse, par contre celui de la poulie à l'extrémité avant de l'arbre du haut était un manchon conique démontable. Ces emmanchements à frottement étaient plus que suffisant pour transmettre le couple du moteur et étaient du modèle préconisé par Al Beaufreere pour les liaisons sujettes aux vibrations de torsion., de plus c'étaient des pièces extrêmement légères.



Le poids de l'ensemble du système de transmission fut réduit de plus de 40%, et ce fut un pas décisif pour résoudre le problème du centre de gravité sur le BD-5. Pour un essai, les systèmes de transmission prototypes étaient conçus et réalisés avec des coefficients de sécurité nuls. La première version du

"manche à balais" n'avait pas d'accouplement roue libre, et quand on le fit fonctionner pour la première fois, il y avait encore fort à faire pour résoudre le problème de torsion.

### **LES TORSIONS A BASSES FREQUENCES**

Les vibrations du nouveau système avaient des caractéristiques de vibration très différentes de celles de ses prédécesseurs, à tel point que l'on pouvait parler d'un changement radical. Le point de résonance était à moins de 600 t/min, ce qui était la vitesse de démarrage du moteur. A de telles fréquences et de fortes amplitudes, il était possible d'entendre et de voir la résonance se produire.

On pouvait voir des à-coups à l'hélice et l'engin aurait tremblé violemment et serait tombé en morceaux si on avait continué. Quand on mettait les gaz, le régime montait jusqu'au point de résonance, et si on avait mis à fond, les vibrations auraient absorbées toute l'énergie du moteur empêchant le régime de franchir l'obstacle de la résonance de torsion.

Parfois, par hasard , le régime moteur dépassait celui de résonance, et tout devenait super super calme. De même, quand on ralentissait, le régime se stabilisait momentanément au régime de résonance, et alors l'avion se mettait à vibrer et trembler tant que l'énergie due à l'inertie n'était pas absorbée. L'hélice s'arrêtait alors plutôt brutalement, c'était très étrange.

Bien que nous ayons réussi à déplacer le point de résonance vers les basses fréquences à faible énergie, nous n'avons pas supprimé le problème. Après bien des essais, nous étions parvenus à provoquer la résonance : moteur coupé en n'utilisant que le démarreur.

Le passage de compression du moteur provoquait des tremblements et des vibrations d'importance équivalente à ceux produits par le moteur tournant au régime de résonance. A ce moment, nous commençons à penser qu'il y avait quelque chose de vraiment mystérieux.

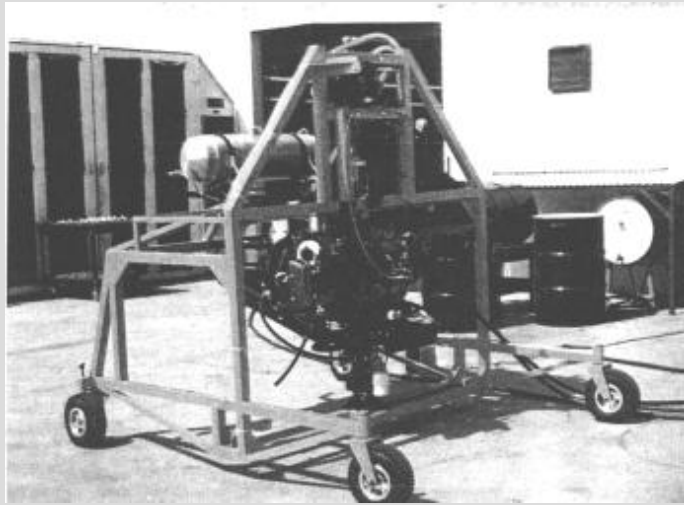
Ceci nous amena à concevoir un essai où nous avons remplacé les 2 bougies par deux clapets pilotés depuis un pupitre de contrôle. Lorsque l'on faisait tourner le moteur et l'ensemble mécanique par le seul démarreur, et les clapets ouverts, il ne se produisait aucune vibration et c'était aussi doux que de la soie, par contre dès qu'on refermait les clapets, les tremblements et vibrations recommençaient. A tel point que nous commandions à volonté le phénomène et il devenait évident que la résonance ne pouvait provenir que du temps de compression du moteur.

Ce qui nous a le plus surpris était que le phénomène se produisait quand l'énergie était faible, avec des contraintes aussi destructrices pour la structure de l'avion qu'avec les fortes énergies.

### **CONTRAINTES INFINIES ?**

Quand nous avons commencé à approfondir la théorie des résonances de torsion, nous y avons trouvé une explication. Sans amortissement dans le système, en théorie le pic de charge à la résonance devrait monter à l'infini, ce qui expliquait pourquoi la quantité d'énergie injectée dans le système avait si peu d'influence sur les contraintes produites ; mais en pratique il n'existe pas de système qui ait un amortissement nul. Malheureusement nous ne savions pas quel était le degré d'amortissement du

système. Et même si l'amortissement diminuait la charge au  $1/10^{\circ}$  de la charge infinie, celle ci n'en restait pas moins très forte. D'où ma conclusion : les contraintes sont très fortes pendant la résonance et ne dépendent pas uniquement de l'énergie fournie.



### **L'ACCOUPLLEMENT A CLIQUETS**

Je dois reconnaître que l'idée de mettre un accouplement à cliquets vient de notre mécano Ray Johnson. Un jour il vint me dire qu'étant enfant, son père avait une machine à battre à la ferme, qui était entraînée par le tracteur au moyen d'une courroie. Il y avait une roue libre sur la machine, si bien que les vibrations provenant du vieux tracteur bicylindre John Deere étaient en quelque sorte arrêtées.

Lorsqu'il me dit "accouplement à cliquets" une sonnette retentit car après avoir observé les oscillations de l'hélice due à des inversions de couple, je savais qu'il fallait trouver un système qui permette de laisser passer le couple inversé sans avoir l'effet de retour.

J'avais envisagé les embrayages centrifuges, manuels, etc... pour pouvoir débrayer et admettre du glissement ; nous avons même essayé avec une courroie très peu tendue avec des poulies folles mais l'absorption du couple de renverse n'était pas suffisante et l'amplitude d'inversion était encore trop grande aux basses fréquences qui nous intéressaient.

Dès que Ray me parla de l'accouplement à cliquets, je recherchais un et trouvais un accouplement Borg Warner utilisé dans les transmissions automatiques. C'était un modèle à double cage et enclenchement synchronisé.

Toutes les petites cames situées dans les doubles cages s'encliquetaient précisément en même temps. J'avais utilisé auparavant chez Avian des accouplements à galets, mais nous avons eu des ennuis avec "the brinelling of the clutch races" (le broutage ??) quand un galet s'engageait avant les autres en

absorbant la totalité du couple, ce qui provoquait parfois la rupture de l'accouplement, et qui n'arrivait pas avec l'accouplement synchro à double cage.

En un à deux mois, les pièces de l'accouplement furent dessinées et fabriquées et l'accouplement monté devant la poulie supérieure. Il avait son propre roulement pour maintenir la concentricité, et le manchon qui transmet le couple à l'arbre supérieur est d'une seule pièce avec la cloche intérieure de cet accouplement. Le traitement thermique de cette pièce et de la cloche externe n'était pas simple ni bon marché, mais à ce point nous n'avions pas regardé au prix tant nous recherchions quelque chose de léger et fiable.

C'était l'époque où une très forte pression s'exerçait sur moi à Bede, pour essayer de faire fonctionner ce système. A l'issue d'un travail acharné, les pièces étaient fabriquées et s'assemblaient impeccablement, l'accouplement monté sur l'avion. C'est alors que la société qui nous fournissait le moteur eut des ennuis et nous ne pouvions plus avoir de moteurs. Et le système, prêt peu après le 1<sup>er</sup> janvier, dut attendre jusqu'à mars que nous ayons trouvé un moteur pour l'essayer, et pendant tout ce temps je me demandais s'il allait bien fonctionner.

Finalement le moteur arrive, les mécanos le montent et le mettent en route : parfaitement doux. Il n'y avait aucun ébranlement et pas de vibration dans l'avion. Et ces premiers essais étaient si réussis, que Les fit voler l'avion. Il se posa avec un grand sourire et nous dit que c'était la transmission la plus douce qu'il avait jamais vue. Jim était rassuré et heureux, vraiment heureux. Nous avons résolu le problème de torsion.



Le banc d'essai Dyno pour la mise au point des moteurs RotorWay, les démonstrations dans les air-show, et les rodages de moteurs.

### ***LE SYSTEME A DOUBLE FREQUENCE***

Selon la théorie, quand la raideur d'un système donné tend vers zéro, la vitesse de rotation à laquelle se produit la résonance tend vers zéro. Avec l'accouplement à cliquets, la fréquence de torsion tend vers zéro bien qu'un renversement de couple se produise lorsque la vitesse de rotation est encore supérieure à la vitesse d'apparition de la résonance, d'où il résulte qu'il n'y a plus de problème de mise en puissance du moteur dans le domaine des vitesses de rotation utilisées. A ce point de vue, le système soft du BD-5 avec l'accouplement à cliquets était un système à fréquence double passif, qui fonctionnait aussi bien que celui à fréquence double actif utilisé sur la famille des moteurs réductés Continenta Tiara pour l'aéronautique.

### ***L'ACCOUPEMENT A CLIQUETS - UNE SOLUTION INCOMPLETE !***

Il faut bien comprendre que l'accouplement à cliquets n'est qu'une partie de la solution du problème de résonance de torsion, l'autre partie, essentielle, est d'abaisser la fréquence de résonance en dessous de celle produite au démarrage du moteur.

Installer un accouplement à cliquets sur un système dont la résonance se produit dans le domaine de rotation du moteur, peut donner l'impression d'avoir réussi à court terme, mais cela ne dure pas. Dans un système de transmission de couple doux et à basse fréquence , comme celui mis au point à Bede, la fréquence du claquement de l'accouplement est faible, mais l'amplitude de vibration de la rotation est élevée lorsque le moteur traverse le régime de résonance. Ceci peut aussi se produire quand le moteur est sur le point de démarrer et que le niveau d'énergie du système est encore bas.

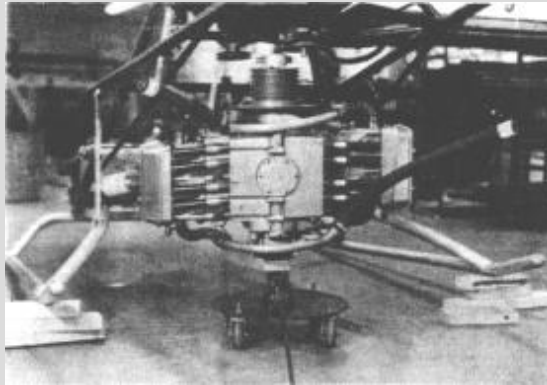


Extrait du manuel de maintenance de chez Rotorway, qui donne des instructions détaillées. Cette photo montre le montage de contrôle du faux rond de la poulie. Un modèle de publication pour transformer un moteur.

C'est vrai les contraintes peuvent devenir très élevées à la résonance, mais cela n'arrive qu'avec le

couple inversé qui libère l'accouplement et annule la charge, ce qui est bon pour la durée de vie de cet accouplement et permet d'en réduire la taille et la capacité, ce que nous recherchons, car cela économise du poids et de l'argent. D'autre part, avec une fréquence plus élevée, et un système de torsion très peu amorti, la fréquence d'encliquetage est forte et l'amplitude des vibrations de torsion faible : un tel système a un niveau d'énergie élevé, ce qui tend à diminuer la durée de vie de l'accouplement, donc à en augmenter la taille puisque la résonance de torsion est encore un problème.

L'accouplement et toutes les autres pièces du système de transmission deviennent alors un sujet d'étude de durée de vie. J'en connais beaucoup qui ont essayé d'utiliser un accouplement à cliquets dans un système rigide pour supprimer les résonances de torsion, mais je n'en connais aucun qui y soit parvenu de façon fiable dans le temps. Je ne peux pas conseiller l'emploi d'un accouplement à cliquets dans une transmission non amortie.



Dans le manuel, 61 photos et 10 dessins illustrent les opérations de maintenance du moteur RW133. Cette image propose une bonne façon de monter le moteur sur la structure de l'avion.

### ***LE PROBLEME DES VIBRATIONS RADIALES***

Après avoir résolu le problème des vibrations de torsion, il restait à résoudre celui des vibrations radiales. Ils avaient installé un banc d'essai dans un vieux mobil-home devant l'atelier chez Bede, et le mécano spécialiste des moteurs deux-temps faisait un tas d'essais pour améliorer le moteur. Un jour que lui et son assistant travaillaient à régler les carburateurs, juste devant le moteur, mais sans y toucher, et que l'arbre inférieur tournait à environ 6.000 t/min, il s'avança un peu sur le côté pour attraper une clef. C'est alors qu'il se produisit une violente explosion et un trou béant dans le mur du stand.

L'arbre inférieur avait arraché ses accouplements en caoutchouc, avait traversé le mur en sifflant comme un missile, avait volé jusqu'à l'immeuble voisin, frôlant l'aile d'un Beech 18, et s'était enterré dans la boue épaisse du Kansas.

L'énergie mise en œuvre était considérable, et si le mécano était resté à l'endroit où il se tenait quelques

secondes plus tôt, il aurait sans doute été tué.

Une fois l'ensemble remonté, nous l'avons remis en marche en fixant une lampe stroboscopique sur le support de l'arbre. Immédiatement, nous avons vu que l'arbre inférieur à son extrémité avant ne tournait pas concentrique à la sortie de vilebrequin du moteur, ni avec la poulie à son extrémité arrière; de plus les plots de caoutchouc de l'accouplement étaient trop souples. On a monté des roulements sphériques à chaque extrémité pour maintenir l'arbre de telle sorte que les vibrations radiales dues aux forces centrifuges ne puissent pas s'amorcer. Cette modification a résolu le problème.

Il y en avait un autre avec la poulie inférieure; après avoir installé la lampe stroboscopique, nous nous sommes aperçus que le support de poulie provoquait une onde vibratoire dans la paroi arrière du compartiment moteur, ce qui expliquait pourquoi les rivets du revêtement de cette paroi partaient si souvent.

Un jour que cette vibration était particulièrement forte, Burt vint voir et sitôt vue, il parut choqué, blêmit et s'en alla en marmonnant qu'il ne fallait pas que Les voie cela sans quoi il ne volerait plus jamais. Je pense qu'à ce moment il était près d'abandonner, et qu'après tous les problèmes rencontrés avec le moteur, c'était la goutte qui faisait déborder le vase. Une semaine ou deux plus tard, Burt et moi quittions Bede Aircraft. Entre temps je confiais la responsabilité de concevoir la modification du système à Al Thompson notre spécialiste des trains d'atterrissage en lui donnant mes instructions pour redessiner le montage de la poulie inférieure. Il a fait un excellent travail, et le problème de la résonance radiale de la poulie inférieure était résolu.

### ***CHEZ ROTORWAY***

Une fois chez Rotorway, B.J.Schramm me confia la tâche de concevoir et réaliser un banc d'essai par dynamomètre à eau pour un moteur d'hélicoptère RW133. Le moteur était disposé verticalement comme dans un hélico et le dynamomètre avait un rotor très massif avec une grande inertie qui était accouplé au moteur au moyen d'un arbre muni de deux joints universels. Ce banc était destiné non seulement à mettre le moteur au point, mais aussi ensuite à essayer et roder les moteurs avant leur livraison au client. Il fut donc conçu et réalisé avec un bel aspect de telle sorte qu'il pouvait être installé à Oshkosh ou tout autre air-show pour faire la démonstration du moteur et montrer aux clients potentiels son couple réel et sa puissance de sortie

Un jour, pendant un essai, tout le bazar se dégingue, l'arbre et les deux joints universels se sont séparés du moteur et volent en tout sens en secouant violemment le banc. Si j'en avais été plus près je ne serais plus du monde des vivants aujourd'hui. La partie supérieure du vilebrequin était cassée, la cassure était cristalline, et avait l'aspect d'une rupture par fatigue de torsion. J'ai alerté B.J. sur l'aspect étrange du vilebrequin après m'être aperçu qu'il était en fonte. Le moteur Rotorway avait une base WW mais avait été sensiblement modifié pour pouvoir fournir la puissance requise par un hélicoptère.

Les moteurs WW ont un vilebrequin en acier forgé, mais le Rotorway est équipé d'un vilebrequin spécial à longue course, et comme le moteur en était à sa phase de développement, B.J. avait utilisé un vilo en fonte.

Peu de temps après, B.J. avait conçu un nouveau vilo en acier forgé pour remplacer celui en fonte. En tous cas, une chose est sûre : un vilo en fonte ne convient pas quand on se frotte aux problèmes de torsion.

### **UNE SOLUTION PAR LES RESSORTS D'EMBRAYAGE**

B.J. avait discuté avec les gens qui avaient construit le dynamomètre, et avait découvert que leur accoupler un moteur 4 cylindres pouvait créer des problèmes ; on nous disait que tout moteur qui produit 2 impulsions motrices par tour est mal parti quand il rencontre des vibrations de torsion.

Comme solution, ils nous suggéraient d'intercaler des ressorts provenant d'un embrayage automobile entre le moteur et le dynamomètre. (Lou Ross avait la même idée pour ses boîtes à pignons) . Nous avons mis aussi des protections autour de l'arbre pour le retenir si une autre casse se produisait. J'ai revu le banc il y a quelques années et il semblait en bon état, il est toujours en service. L'idée des ressorts semble être positive.

### **CONFIGURATIONS DES SYSTEMES D'ENTRAINEMENT**

A chaque fois qu'une hélice est accouplée à un moteur sans être directement montée sur la sortie de vilebrequin, il est sage de penser que des vibrations de torsion peuvent se produire. En gros, il y a 3 façons d'entraîner une hélice :

1. L'hélice sur le réducteur
2. L'hélice, le réducteur et un arbre de transmission
3. l'hélice et l'arbre de transmission seulement

### **LES FREQUENCES DE RESONANCE DE TORSION**

$$k = \frac{T}{a} = \frac{\pi d^4 G}{32L}$$

- **K** est le coefficient de torsion élastique, i.e le couple (T) nécessaire pour produire un angle de torsion de (a) radian dans l'arbre sur lequel l'hélice est fixée ;
- **d** est le diamètre extérieur de l'arbre d'hélice

- **G** est le module d'élasticité du matériau constituant l'arbre
- **L** est la longueur de l'arbre en pouces

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{I}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi d^4 G}{32IL}}$$

- **f** est la fréquence de vibration de torsion
- **I** est le moment d'inertie de l'hélice.

La formule ci-dessus montre que :

*On peut diminuer la fréquence de vibration de torsion en :*

1. Diminuant le diamètre de l'arbre (d)
2. Diminuant le module d'élasticité du matériau constituant l'arbre (G)
3. Augmentant le moment d'inertie de l'hélice (I)
4. Augmentant la longueur de l'arbre (L)

*Et on peut augmenter cette fréquence en faisant l'inverse.*

La fréquence est plus ou moins dépendante de l'hélice, du vilebrequin, des bielles, des pistons, et de tout ce qui s'y rattache tels que volant, pignons, courroies, et à moindre effet, les culbuteurs et autres accessoires.

### **LES DIFFERENTS SYSTEMES D'ENTRAINEMENT**

1. Un système est dit amorti s'il comporte un amortisseur de vibration pour diminuer les charges dues à la résonance et les rendre plus acceptables, tout en maintenant la fréquence de mise en résonance dans le domaine d'utilisation du régime moteur. Un tel système peut être utilisé avec un réducteur et / ou un arbre de transmission.

2. Un système rigide se caractérise par un coefficient de torsion élevé (k) et aucun glissement entre le vilebrequin et l'hélice (rigidité maximale) . Le problème de torsion est surmonté par la résistance et le maximum de rigidité. Si une courroie est montée, elle doit être tendue en respectant les prescriptions du fournisseur (système du type Dave Blanton) . Un tel système rigide devient beaucoup trop lourd si un arbre de transmission est utilisé à cause des charges de torsion importantes qu'il engendre.

3. Un système lâche est celui qui a un faible coefficient de torsion (k) entre l'hélice et le vilebrequin de façon à faire passer la fréquence de résonance en-dessous du domaine de rotation du moteur et mieux,

en dessous du régime auquel il démarre. Un tel système utilisant un réducteur seul (sans arbre de transmission) avec un coeff de torsion suffisamment faible, sera difficile à réaliser à cause de l'encombrement, du poids, et des contraintes technologiques. Un système lâche avec un arbre de transmission, s'il est correctement conçu et éprouvé, est probablement le plus léger et le plus fiable de tous les systèmes énumérés (c'est celui du BD-5 avec arbre et courroie) .

### **CRITERES RECOMMANDES POUR LA CONCEPTION**

#### **1. Plus le moteur a de cylindres, mieux c'est !!**

#### **2. L'arbre de transmission :**

- ▶ le mieux est l'acier forgé
- ▶ ensuite une barre usinée
- ▶ et enfin la fonte

#### **3. Les accouplements entre les pièces en rotation :**

- ▶ utiliser des accouplements qui transmettent le couple par friction quand c'est possible (i.e. sertissage, emmanchement à la presse et /ou emmanchements coniques)
- ▶ les "splines" (manchons fendus ??) ne sont pas le meilleur choix dans un système rigide
- ▶ Si vous utilisez des vis, (i.e. des brides) veillez à ce que le couple moteur ne fasse pas dépasser la contrainte de cisaillement autorisée pour chaque boulon. Pour cela , choisissez le diamètre des boulons de telle sorte que leur serrage soit suffisant pour que le couple soit transmis par le frottement entre les brides. (Note : Il faut éviter que la partie filetée des vis soit trop près du plan de joint) .

#### **4. Glissement du système**

- ▶ Dans un système rigide, (i.e. le système hyper rigide de Dave Blanton) évitez tout glissement. Tendez la courroie comme prescrit par le fournisseur.
- ▶ Dans un système lâche (i.e. celui du BD-5) un peu de glissement est tolérable. Si on utilise une courroie crantée, elle n'a pas besoin d'être tendue. De même les pignons et les "splines" sont mieux tolérés (i.e. le moteur du Continental Tiara) . Si on utilise une liaison silencieuse telle qu'une chaîne, la tension de cette chaîne n'est pas un point critique.

#### **5. Le coefficient de torsion du système**

- ▶ Dans un système rigide, le critère principal du concepteur est d'avoir un coeff de torsion le plus élevé possible sans que le poids de l'ensemble ne devienne excessif. Le problème de torsion est résolu par la

robustesse de l'ensemble et le maximum de rigidité.

▶ Dans un système lâche, le critère sera au contraire d'avoir un coeff de torsion faible bien que satisfaisant au besoin de transmission du couple avec un coeff de sécurité très modéré. Le coeff de torsion doit être suffisamment faible pour abaisser la fréquence de résonance en-dessous de celle engendrée par le démarrage du moteur.

▶ Ce coeff de torsion peut être diminué en diminuant le module d'élasticité du matériau de l'arbre et son diamètre extér, ou /et en augmentant le moment d'inertie de l'hélice et la longueur de l'arbre.

## 6. L'accouplement à cliquets

▶ N'utilisez qu'un accouplement à double cage synchronisé. (sprag ??)

▶ Les accouplements à galets et ceux préchargés par ressorts, ne sont pas conseillés

▶ Ne pas les utiliser avec un système du type rigide ; les résonances à haute énergie détruiront ces accouplements même si le régime du moteur ne fait que traverser le régime de résonance à la montée ou à la redescende depuis le régime d'utilisation.

## 7. les arbres cantilever (en porte à faux)

▶ Il faut éviter de monter une poulie ou un pignon en porte à faux, en particulier sur les systèmes rigides.

▶ Si la conception impose une poulie en porte à faux, réduisez ce porte à faux et la largeur de la courroie au minimum.

### ***EN RESUME***

**Informez vous au maximum avant d'aborder les problèmes de torsion !!**

Il est sage d'acquérir une bonne base de connaissance avant de résoudre ces problèmes. La plupart des solutions intuitives vont à l'encontre de ce qu'il faut faire. J'espère que cet article mettra en garde les expérimentateurs et les encouragera à approfondir le sujet avant de se lancer et de risquer d'y perdre leur temps et beaucoup d'argent.



Démonstration des effets de la résonance de torsion : un tasseau de 50 x50 x 100 (2 x 4 pouces) ayant une inertie semblable à celle d'une hélice, est entraîné par une chignole sans fil au moyen d'une corde à piano de 2,4 mm (3/32 de pouce) , (c'est un système lâche). Une extrémité de la corde à piano est courbée à 90° et solidement fixée sur le bois. L'énergie est envoyée par impulsions courtes en appuyant par petits coups sur la gâchette pour imiter les impulsions du moteur. On peut voir et entendre le glissement de la tige dans le mandrin : effets dus à la torsion et aux inversions de couple.

[Complément d'article](#)

[Répondre à cet article](#)

