

Comportement dynamique des mats, vieillissement

Alain Michaud FRA46 septembre 2017

Liminaire ...

« comportement dynamique des mats » ... invariablement, quand des sujets de ce type me viennent en tête, je pense à mon ami Pierre Mondétéguy, FRA2, qui nous a quitté il y a 2 ans ... Prof à l'ENSAM de Bordeaux Talence, il travaillait au labo de Méca et ses domaines de prédilection étaient la dynamique des fluides et le comportement des matériaux. Il était tout jeune prof quand j'étais moi-même élève à l'ENSAM, ... combien de manip nous avons pu mettre en route !!!!! Le virus de la manip de physique ne m'a jamais quitté et dans ma vie professionnelle au CEA, outre les évaluations de structures en calcul thermodynamique, j'ai été durant quelques années responsable du Labo Expérimentation (tests statiques et thermodynamiques de structures). Maintenant à la retraite, ça commence à être loin, mais rien n'est effacé, et je ne peux m'empêcher de trouver dans le domaine du Finn un super champ d'expérimentations !

Dire s'il y a vraiment utilité à tout modéliser et analyser, à "faire de la science", je ne sais pas, ... certainement pas. Le talent de nos champions et leur capacité à percevoir le comportement du matériel sont tels que je ne sais quel "plus" peuvent leur apporter les élucubrations de quelques fêlés comme moi !!! Et puis, la démarche en Finn n'est pas tout à fait la même que celle suivie pour concevoir une Formule 1 ou un bolide de l'America Cup, mais enfin ...

Enoncé du problème

Bref, revenons à nos moutons ...

Promenons-nous et écoutons, sur les parkings, au bar, avant et après les régates : combien de commentaires passionnés sur le matériel : coques, voiles et ... et mats, en particulier ! Invariablement, une fois évoquées les caractéristiques classiques (les incontournables "côtes du mat"), l'évolution de leur comportement après des mois voire des années de navigation dans des conditions un peu rudes arrive dans la discussion. Autrefois, on trouvait que les mats en bois se "fatiguaient" (un peu ...), puis idem avec la génération suivante, en alu (les Needle par exemple), et maintenant, c'est au tour de nos mats actuels en carbone / époxy de ne pas échapper aux mêmes soupçons d'atteinte par les sévices de l'âge.

Laissons de côté mon sentiment premier sur le sujet (en première approche, avec le niveau de précision demandé à leurs caractéristiques, je suis perplexe ... et penche surtout sur le facteur psychologique : mon mat commence à avoir de la bouteille, « **donc** » il ne marche plus comme avant ... et en bon ingénieur pragmatique attaquons de front le problème. C'est toujours riche d'enseignement et amusant de creuser un tel sujet. On va donc essayer de trouver une méthode simple pour confirmer ou infirmer cette hypothèse.

C'est somme toute assez simple, le mat travaille sous deux types de sollicitations : une sollicitation de chargement statique et une sollicitation dynamique autour du point de fonctionnement statique. Quant aux « conditions limites », encore plus simple, une poutre prise entre deux rotules.

Concernant ses caractéristiques intrinsèques, là aussi, on a vite fait le tour :

- sa "**raideur statique**", découlant de l'inertie locale de section et des caractéristiques mécaniques locales (dépendantes des caractéristiques du composite)

- le **facteur "amortissement"**, dès lors qu'on aborde les sollicitations dynamiques.

Dans son jargon, le finniste parle d'un mat plus ou moins "raide" ... et rajoute parfois le qualificatif de "nerveux" quand il évoque la sensation de rapidité de réaction, par exemple lors d'une brusque variation de la pression dans la voile (lors d'une survente, durant celle-ci et surtout, le retour lorsque la surcharge cesse, lors d'un coup de frein au passage d'une vague, ...). Difficile de faire comprendre que, en dehors de toute autre considération, plus un mat est "**raide**", **au sens statique du terme**, plus il est "**nerveux**" **au sens dynamique** ... et que donc, avec un mat souple, on a de fait un comportement "plus mou" en régime dynamique transitoire Maintenant, si effectivement un « facteur d'amortissement » non négligeable entre en ligne de compte, sans pour autant mettre à mal le bien fondé de la remarque précédente, le comportement du mat en régime dynamique va en être affecté.

Le but de la démarche suivie est donc :

- lister les différentes causes d'amortissement de l'ensemble "mat/voile" en situation réelle et "peser" l'importance des différents paramètres en jeu.
- définir un protocole de test visant à caractériser un mat en régime dynamique (celui-ci pouvant être éloigné de celui d'un mat en situation réelle, mais permettant tout de même de déterminer les caractéristiques dynamiques).
- passer des mats en test et mettre (ou pas !) en évidence une évolution du comportement après quelques années d'utilisation.

Si la sensation d'évolution dans le temps du comportement du mat est un fait réel et non un fantasme, ... nul doute qu'on doit mettre en évidence sur banc d'essai une variation des caractéristiques.

Quelques rappels de Mécanique des Solides

Considérons notre mat comme une poutre encastree (plus exactement, pris entre deux rotules), il se comporte comme une lame de ressort. Soumis à un effort statique, un lest en tête par exemple, il fléchit proportionnellement à la charge et inversement proportionnellement à sa caractéristique globale de raideur (dans le plan considéré) ($x=F/K$).

Donnons maintenant une impulsion en tête, ou, par exemple, imposons un déplacement A_0 et lâchons ... il va alors se mettre à osciller selon une loi sinusoïdale autour du point d'équilibre. Mais petit à petit, l'amplitude diminue et le mouvement s'arrête à la position d'équilibre statique. Cette oscillation est caractérisée par les deux paramètres :

- la fréquence
- l'amortissement

La fréquence dite « fréquence de résonance » pour le mode de vibration concerné. Ici, c'est le premier mode de vibration qui nous intéresse, celui qui déforme le mat de façon quasi identique à la déformée statique sous une charge en tête (N.B. 1). Elle est directement liée à **la raideur** (au sens statique du terme) et à **la masse** mise en mouvement (celle de la masse placée en tête dans le cadre de notre essai, mais également à la masse de tout le mat et à la position (ou répartition) de celle-ci). Plus la raideur est élevée, plus la fréquence de la vibration est élevée. Plus la ou les masses entraînées sont élevées, plus la fréquence est basse. Le paramètre suivant, l'amortissement, a également une influence sur la fréquence (à la baisse), très faible pour des faibles amortissements, de plus en plus sensible pour des amortissements élevés ...

L'amortissement, dans la situation évoquée, est dû aux caractéristiques intrinsèques du matériau (ici composite carbone/époxy) et aux facteurs extérieurs (frottement de l'air ambiant lors du mouvement du mat, et idem en navigation, avec en plus le grand panneau que constitue la voile.

Ces deux paramètres peuvent évoluer au cours du temps, plus ou moins vite selon les matériaux et l'environnement que les structures ont subi : environnement thermique, UV, sollicitations mécaniques ...

On trouve pléthore de publications scientifiques sur le sujet. Le vieillissement dans le temps d'un composite carbone/époxy (en fatigue et hors sollicitations extrêmes) est la conséquence d'une dégradation progressive des caractéristiques de la matrice (époxy) et de ses liaisons avec les fibres : effet nocif des UV et des sollicitations mécaniques dynamiques. La fibre par elle-même est super stable : ou elle conserve ses caractéristiques ou elle casse ... et là, c'est grave !!! Les conséquences de ces micro-dégradations se traduisent par une diminution de la cohésion d'ensemble. On doit donc constater une légère baisse du module (caractéristique du matériau qui détermine la raideur) et une augmentation de l'amortissement (par hypothèse, de type visqueux ...), tout ça dû aux ruptures de liaisons dans les chaînes de la matrice et des liaisons de celle-ci sur les fibres.

Mais je suis perplexe ... pour avoir travaillé à la conception du mat d'Aquitaine Innovation (le bateau de Parlier pour le Vendée Globe), et fait beaucoup de mesures j'ai constaté l'inverse ! après un an de navigation pas franchement type « promenade », le mat était plus raide qu'à la sortie du chantier ... pas beaucoup, mais un peu plus raide : certainement une fin de polymérisation de la résine sous l'action du temps de la chaleur au soleil et des UV ? ... faut dire que le profil de température lors de la polymérisation avait été plutôt folklo dans le chantier où le mat avait été fabriqué !!! ... mais c'est un autre processus physique masquant peut-être celui qui nous préoccupe. Quant à l'amortissement, pour ce type de mat super haubané : hors sujet, on n'a même pas songé à le caractériser !

Alors pour en avoir le cœur net, mettons en place un essai dynamique sur banc pour évaluer tout ça.

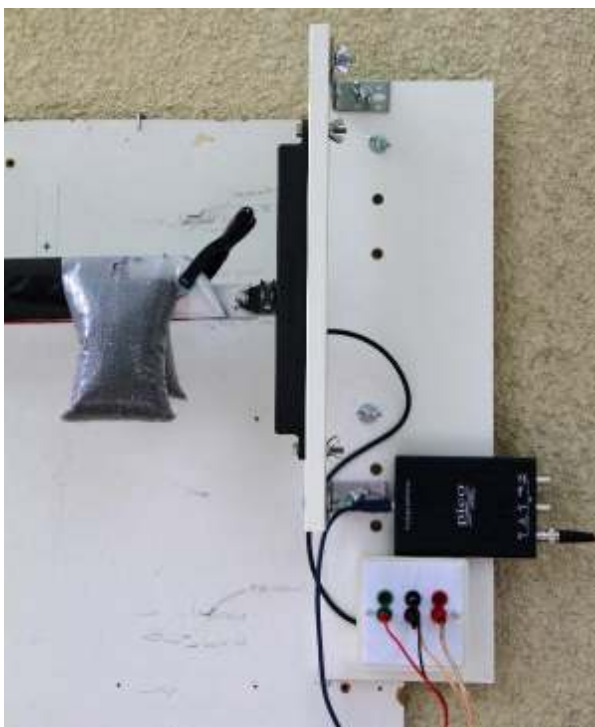
Protocole de test

Hors de question de porter un mat dans les labos du CEA ou autre Labo d'essai en environnement, de le modéliser en EF (Eléments Finis) et de le passer sur banc pour analyse modale et autre torture, ... je ne suis plus dans la place !

Alors, dans une première approche, un test permettant une simple « signature » du comportement dynamique sous charge, pouvant mettre en évidence ce fichu facteur "amortissement" et l'évaluer avec un paramètre pertinent devrait suffire. Le mat étant placé dans le banc de mesures statiques, un test de vibrations libres par la méthode du "lâcher" devrait mettre en évidence le premier mode de vibration sous une charge donnée et une décroissance exponentielle (N.B. 2) de l'amplitude. La mesure du paramètre $t_{1/2 \text{ vie}}$ par exemple, pourrait être pertinente. Cette mesure consiste à déterminer le temps au bout duquel l'amplitude est devenue la moitié de l'amplitude initiale ($A_0/2$).

La méthode expérimentale :

- le mat est mis sur le bâti de test traditionnel.



- un lest (N.B. 3) de 5 kg est placé en tête (pourquoi 5 kg ? : parce que ça ne sollicite pas beaucoup le mat et donne un premier mode propre aux alentours de 1 Hz ... mais on aurait pu choisir tout autre valeur).

- on impose une amplitude initiale A_0 : 40 mm environ ... et on lâche (N.B. 4).

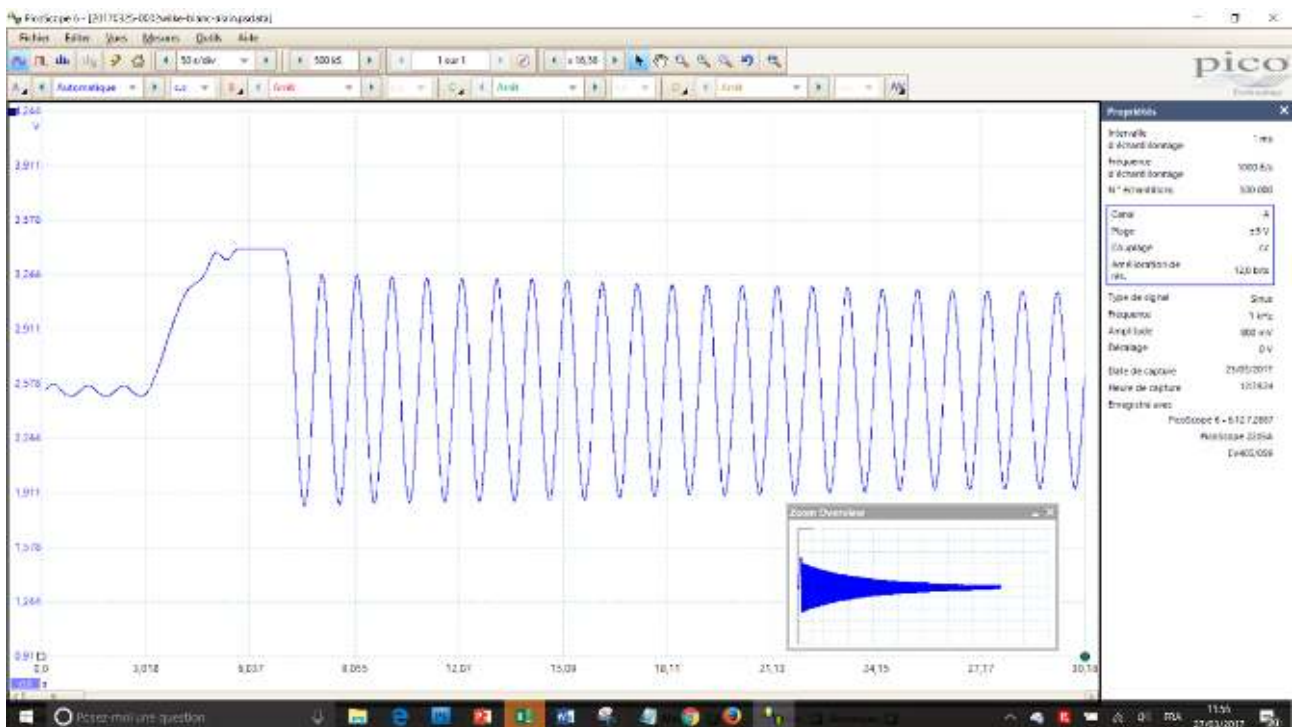
La mesure :



- le déplacement de la tête du mat est mesuré avec un capteur de déplacement linéaire sans contact (225 mm d'étendue de mesure, précision 0.1 mm).

- l'acquisition de la mesure se fait via un oscillo USB connecté sur un PC

Traitement des mesures :



- traitement lors de l'acquisition (N.B. 5)

- sauvegarde des blocs d'acquisition par logiciel de pilotage de l'oscillo en fichier .txt (500 000 points de mesure environ)

- reprise du fichier .txt sous Excel et traitement (passage des Volts en mm, annulation de la dérive, recentrage ...)

- calculs associés (N.B. 6):

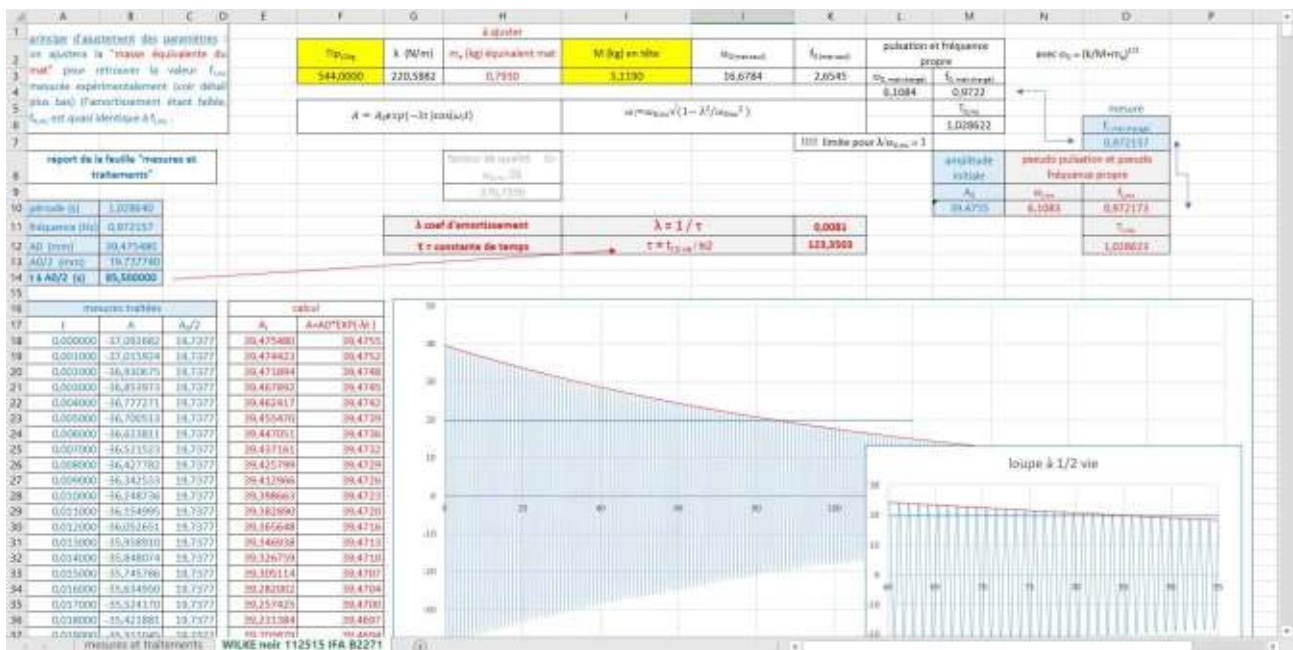
PS : dans tous les graphiques suivants, en ordonnée l'amplitude des vibrations (en mm), en abscisse le temps (en s)

- détermination de la "masse équivalente" du mat pour l'intégrer dans les formules simple "masse/ressort/amortissement" (approximation de Rayleigh) (N.B. 7)

- détermination d'un paramètre significatif du comportement : j'ai opté pour $t_{1/2 \text{ vie}}$... cad le temps qu'il a fallu depuis le lâcher pour que l'amplitude initiale A_0 des oscillations soit divisée par 2. C'est commode car on en déduit directement le "coef d'amortissement" et c'est immédiat à déterminer graphiquement sur le tracé des mesures.

- détermination calcul, en regard de cette valeur de $t_{1/2 \text{ vie}}$, des autres paramètres de l'équation théorique du mouvement.

- tracé de l'enveloppe théorique (la décroissance exponentielle), à titre de vérification, pour comparaison avec le tracé expérimental ... ce qui, dans notre cas, confirme la validité de l'hypothèse d'amortissement de type visqueux (N.B. 6). Ça permet également de voir s'il n'y a pas eu une anomalie lors du test (dans un des essais par exemple, on constate un petit écart local entre théorie et expérience (perturbation certainement due à une bouffée de vents lors du test, ou un frottement imprévu).



Dans le cas présenté, avec 5,119 kg de lest en tête de mat, un équivalent masse pour le mat évalué à 0,793kg, la fréquence du premier mode de flexion en longi est de $f = 0.972$ Hz (pour 2.654 Hz mat non chargé). L'enregistrement expérimental (après traitement) est en bleu. On relève pour $A_0/2$ la valeur de $t_{1/2 \text{ vie}}$ (85.5 s), on en déduit la constante de temps τ et de là, le coef d'amortissement $\lambda = 0,0081$. A partir de là, on trace « pour le fun » l'enveloppe théorique de décroissance (en rouge).

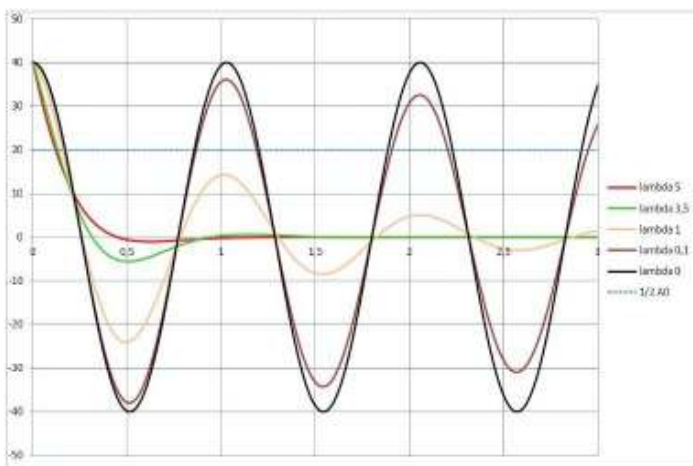
La vraie question qui m'interpelle : l'amortissement qu'on constate est-il bien celui du mat, tout autre facteur étant négligeable ... ou celui du mat plus l'amortissement dû à la trainée du mat dans l'air ambiant ?

Dans ce cas, quelle est la part de chacun des termes d'amortissement ? difficile de répondre, sauf à procéder à une modélisation bien plus complexe.

D'autre part, sur l'eau, en navigation, (et c'est évident en latéral par exemple), en marge des forces de pression dues au vent et à la portance de la voile, l'amortissement aérodynamique lors des phases transitoires ne doit certainement pas être négligeable !!! on n'a jamais vu un mat partir en vibration (sur son premier mode) !!! ... pour mieux comprendre, faisons donc un détour vers les différents cas de figure d'un système vibrant amorti, en fonction de l'amortissement.

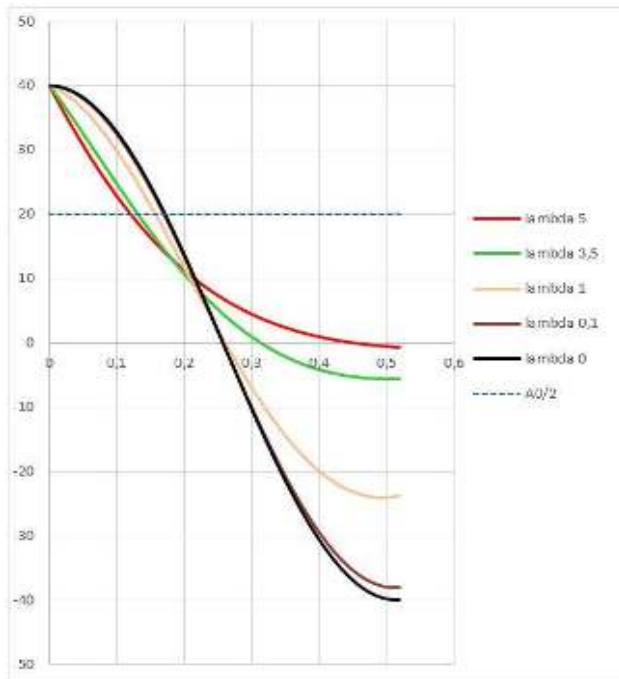
Un exemple simple : votre voiture. Entre le châssis de la voiture et chaque roue, on trouve la suspension : un ressort et un amortisseur en parallèle. Amortisseur en bon état, la roue passe un ralentisseur en restant collée à la route, vous sentez la bosse, sans plus. Amortisseur en mauvais état, vous sautez au plafond et sentez la voiture qui se met à osciller plus ou moins longtemps, comme les « deudeuches » d'autrefois ! Le rôle de l'amortisseur est de filtrer les oscillations en pompant l'énergie du choc et donc de limiter plus ou moins l'amplitude des oscillations (c'est un filtre « passe-bas »).

Regardez ce que deviennent les oscillations d'un système mécanique « masse-ressort-amortisseur » en fonction de la valeur de l'amortissement (modèle calculé sur la base des caractéristiques de raideur de notre mat, sous 5kg de charge, pour différentes valeurs d'amortissement) :



- amortissement nul : en noir (régime périodique)
- amortissement faible ; en marron (régime pseudopériodique)
- amortissement moyen : en beige (régime pseudopériodique)
- fort amortissement : en vert, rouge) presque plus d'oscillations puis plus d'oscillation (régime pseudopériodique puis apériodique)

Revenons à notre mat. Nous avons déterminé son amortissement intrinsèque, il est très, très, faible ! ($\lambda = 0.0079$). Maintenant, sur l'eau, en navigation, quel est son comportement ? Simple, tout au moins à schématiser ... Mais il n'est pas tout seul ! La voile qui y est accrochée, avec les efforts aérodynamiques dus à la pression de l'air (vent et mouvements du bateau) joue le rôle d'un propulseur, soit, mais également d'un super amortisseur !!! Avez-vous vu votre gréement se mettre à osciller frénétiquement comme si vous étiez dans une vieille 2chevaux ? Non. On est donc clairement en régime apériodique ou très proche, comme simulé par les courbes en vert ou rouge.



Alors quand on parle de « nervosité », que veut-on dire ? ... on veut exprimer en fait la vitesse avec laquelle, sur une variation rapide de pression dans le voile, le mat réagit (N.B. 8). Cela se traduit sur notre graphique par la pente de la courbe après le « lâcher » ou par exemple, le temps au passage à $A=0$. Grosso modo, pour un système de fréquence propre 1 hertz, non amorti, ça se passe en 25/100 s. Pour le même système, très très amorti, 50/100 s. Pour un amortissement de 1, pas de différence sensible avec un amortissement nul !

Dans tous ces cas, la part due à l'amortissement intrinsèque du mat seul, est vraiment très faible ! Avec son $\lambda = 0.0081$, elle est négligeable.

La figure ci-dessus est une loupe sur la première $\frac{1}{2}$ alternance après la brusque sollicitation, le « lâcher ».

C'est le facteur « raideur » du mat, qui, avec la ou les masses mises en mouvement, détermine la fréquence de résonance, donc la vitesse de la réaction à une brusque sollicitation. L'impact de l'amortissement intrinsèque du mat, n'a qu'une très faible incidence sur celle-ci. Par contre, des éléments extérieurs, eux, peuvent définir un ensemble mécanique global dans lequel le mat est « un des constituants ». Ces éléments extérieurs peuvent, entre autres effets, avoir un rôle d'amortisseur important sur le comportement global de l'ensemble.

Alors ? je laisse chacun méditer ...

Conclusion

Arrivé à cet endroit de la lecture, beaucoup doivent rester sur leur faim ... En attendant donc les essais complémentaires d'ici deux ou trois ans, quelques points pour résumer :

À quoi il faut-il penser en évoquant le « vieillissement » :

C'est indéniable que sous sollicitations alternées, « en fatigue » dans le jargon des mécaniciens, tout matériau évolue, ... pour aboutir même à la ruine de la structure (encore faut-il que ces sollicitations soient importantes en regard des caractéristiques de la structure et durent « le temps qu'il faut » !).

Concernant nos composites hightech, cela se traduit :

- Par des micro ruptures des liaisons dans les chaînes moléculaires de la matrice de la résine.

- Par des micro ruptures des liaisons entre matrice et fibres de carbone.
- Plus grave, mais là, on arrive à des situations extrêmes dues à des chocs ou à des efforts violents anormaux, délaminages entre couches de drapage et même, rupture des fibres de carbone.

Tous ces phénomènes se traduisent par une évolution des caractéristiques mécaniques de la structure :

- Diminution du module d'Young (qui détermine la raideur).
- Augmentation du facteur « amortissement » et peut-être évolution du mode d'amortissement (visqueux, sec, ...).

La variation de la raideur, facteur essentiel et toujours en première ligne concernant ce problème, peut être constatée par un simple test statique au banc.

Si celle-ci est sensible, lors d'une sollicitation brusque, cela va se traduire par une diminution de la fréquence du premier mode de flexion, des amplitudes plus grandes ... et donc un temps de réponse plus long.

C'est pourquoi :

- **Un mat raide sera toujours plus nerveux (ou réactif) qu'un mat souple.**
- **À raideur identique, un mat léger dans la partie haute sera plus nerveux qu'un mat devant entraîner plus de masse en haut. De même, avec une voile plus légère, surtout en partie haute, l'ensemble sera plus réactif (N.B. 9).**
- **L'amortissement, ... on a vu et on reverra lors des tests complémentaires dans quelques années !**
- **Un essai statique « traditionnel » doit donc apporter réponse à nos interrogations.**

Merci à ceux qui sont arrivés là. J'ai dû en em... nnuyer plus d'un avec mes délires, mais le sujet en valait la peine et il m'était difficile de parler de ces choses sans faire tous ces détours. J'ai tout au long de mon propos essayé de simplifier les choses (!), soit en utilisant des approximations connues des spécialistes, soit en élaguant volontairement de tout ce qui me semblait, à l'évidence, secondaire pour le strict besoin. **Je suis, bien sûr, ouvert à toute controverse et prêt à remettre en question certaines démarches et conclusions !** à l'ENVSN, Paul Iachkine a commencé un programme expérimental sur le sujet. C'est toujours en cours, peu de conclusions à ce jour, affaire à suivre donc.

Bien entendu, dans quelques années, je passerai à nouveau les mats qui ont subi les tests (statiques et dynamiques) et nous verrons bien si une évolution des caractéristiques est constatée, et si oui, lesquelles !

Cet article, une fois publié dans notre revue IFA France, sera accessible, avec éventuellement corrections et compléments sur notre site finn-france.fr, menu « Le Finn/Technique/... »

Enfin, un grand merci à Marc, notre Président de l'IFA France, de m'avoir autorisé le financement du matériel nécessaire à la réalisation de cette étude.

Les quelques explications complémentaires en N.B. :

- (1) *En fait, une structure peut « vibrer » sous une infinité de « mode de vibration ». Certains sont excités, d'autres non ... selon les conditions aux limites et les modes d'excitation.*
- (2) *Si du moins l'hypothèse d'un amortissement du type « visqueux » est bien fondée (?).*
- (3) *Le lest est constitué par de la grenaille de plomb mise dans un sac souple. Il est posé et fixé à cheval sur la tête de mat. Ceci pour éviter que les oscillations d'une masse pendu en bout de*

mat viennent provoquer un couplage avec le premier mode propre de celui-ci, et par la suite, compliquer inutilement l'interprétation des mesures.

- (4) Le "lâcher" de la tête de mât depuis la position imposée A0 doit se faire sans induire d'impulsion parasite pouvant entraîner une excitation des autres modes de vibration (torsion, latéral, ...). Un système simple de mise en tension bien dans l'axe vertical via un fil nylon guidé sur un support, puis coupé, améliore bien cette étape.
- (5) Les méthodes utilisées sont classiques : utilisation de filtres quasiment plats à moyenne mobile ou simple filtre passe-bas bien choisi (traitements réalisés au détriment des fréquences élevées mais seul le premier mode nous intéresse et il n'est en aucune façon affecté par les traitements utilisés).
- (6) Partant de l'hypothèse que l'amortissement était du type visqueux, ... ce qui est
- (7) Le fun, c'est de définir un modèle simplifié de notre mat et d'essayer de faire coller l'expérience avec les équations analytiques d'un système "masse-ressort-amortisseur". Le pb: notre mat est loin d'être un système idéalisé "ressort de flexion de masse nulle chargé en bout", ni même, un peu plus compliqué, une "poutre encastrée à inertie constante" ... Toutefois, quelques approximations connues (approximation de Rayleigh, ...) montrent qu'en attribuant au mat une masse "équivalente" placée en bout, on a une très bonne concordance (pour le premier mode de résonance) entre réalité expérimentale et modélisation par calcul simplifiée et déformée statique (on peut faire l'analogie avec le couple "Masse ponctuelle, Rayon de giration" pour les tests des coques au pendulum). Pour vérifier l'hypothèse, j'ai passé en test le même mat sous 5 chargements différents, de 0 à 5 Kg, et trouvé une bonne cohérence sur le paramètre "fréquence d'oscillation" entre essai et calcul en introduisant dans ces derniers la même masse "équivalente" pour le mat (déterminée par itérations successives jusqu'à retrouver la fréquence de résonance mesurée expérimentalement, et ce à moins de 0.2 % près !!!!! Bon, ça, c'est pour s'amuser, ce côté "théorique" n'est pas nécessaire. Pour notre besoin, qui est de faire des comparaisons entre différents mats ou sur un même mat à quelques années d'intervalle, on peut simplement se satisfaire de la détermination graphique du $t_{1/2 \text{ vie}}$ (t quand l'amplitude initiale est divisée par 2).
- (8) Et là encore, souhaitons-nous le même comportement selon les sollicitations instantanées suivantes ? (on perçoit qu'on arrive à certaines contradictions dans ce que l'on cherche ...) :
 - On prend une grosse risée, bien sèche et méchante
 - On tombe dans un brusque "dévent"
 - On donne un bon coup de rein dans une phase de départ
 - ...Dans le cas simulé sur le banc de test, on peut imaginer que le « lâcher » simule un retour brutal et instantané de la force du vent dans le régime permanent après le passage dans une risée.
- (9) D'aucuns ne manqueront pas de faire l'analogie avec le comportement dynamique de nos coques dans l'eau clapoteuse et l'importance du facteur « rayon de giration » (dépendant de la répartition des masses).