



Les essais en vibrations ne concernent pas que les équipements destinés à subir de fortes sollicitations mécaniques, mais tous ceux qui sont continuellement soumis à des vibrations susceptibles, à la longue, d'altérer leur qualité ou leur durée de vie...

MESURES MÉCANIQUES

Essais en vibrations

▼ Parce qu'ils permettent de comprendre le comportement dynamique des équipements, de prévoir leur mode de défaillance et d'améliorer leur fiabilité, les essais en vibrations sont incontournables. Dans leur principe, il n'y a rien de plus simple. La pièce est placée sur un banc de test, et soumise à un profil d'essai défini et reproductible. Mais en pratique, un essai en vibrations nécessite de prendre de nombreuses précautions, notamment pour bien définir son besoin et dimensionner correctement son essai. Pascal Cornu, directeur de la filiale française de LDS, revient ici sur les principes de base de ces essais, et rappelle les précautions élémentaires...

Savez-vous qu'avant de prendre place dans votre voiture, votre autoradio avait été durement mis à l'épreuve? Pourtant, on ne peut pas dire qu'il soit utilisé dans des conditions difficiles, ni soumis à de fortes sollicitations mécaniques justifiant d'en tester auparavant la robustesse... Mais à l'image de la majorité des équipements qui nous entourent, il est continuellement soumis à des vibrations susceptibles, à la longue, d'altérer sa qualité ou de réduire sa durée de vie. Pour prévenir les défaillances des équipements, améliorer leur fiabilité ou s'assurer qu'ils ne seront pas endommagés durant leur transport, il est indispensable de prévoir l'effet de ces vibrations. Pour cela, il faut les soumettre à une vibration définie et reproductible, et suivre leur comportement. C'est tout l'objet des **essais en vibrations**.

L'essentiel

- ▶ Les essais en vibration permettent de prévoir les modes de défaillance d'une structure ou d'un équipement, d'en suivre le comportement dynamique et d'améliorer leur fiabilité.
- ▶ Leur mise en œuvre nécessite de prendre de nombreuses précautions, notamment dans le choix du vibreur.
- ▶ Avant de se lancer, il faut aussi connaître les limites de fonctionnement du système d'essai que l'on utilise.

Suivant les besoins, un système d'essai en vibrations peut être utilisé pour reproduire un environnement vibratoire réel, pour générer des contraintes jusqu'à l'apparition d'une défaillance, ou encore pour étudier le comportement dynamique d'une structure. D'une situation à l'autre, les spécifications de l'essai n'ont rien de comparable. Il faut adapter la force maximale avec

laquelle l'échantillon est sollicité, le type d'excitation, la gamme de fréquences, le type de montage... et réaliser un savant dosage de ces paramètres pour s'assurer que l'on ne sollicite ni trop, ni pas assez, la pièce à tester. Dimensionner correctement un essai en vibrations est donc loin d'être aussi simple qu'il n'y paraît. Avant de se lancer, il faut connaître le matériel, ses limites de fonctionnement, et suivre une démarche rigoureuse.

Quelles que soient les applications auxquelles il est destiné, un système d'essais en vibrations est toujours constitué d'un vibreur, d'un amplificateur de puissance, d'un contrôleur et de capteurs.

Le vibreur (que l'on appelle aussi excitateur ou pot vibrant) est l'élément le plus important. C'est lui qui applique à l'échantillon la sollicitation définie par le profil d'essais. Un vibreur fonctionne suivant un principe électromagnétique. Le mouvement qu'il engendre est provoqué par celui d'une bobine traversée par un courant électrique et placée dans un champ magnétique. Le champ est généré par un aimant permanent dans le cas des petits excitateurs (jusqu'à 500 N de force nominale) ou par un électroaimant dans les plus importants. Suivant les cas, on parle alors de vibreur à aimant permanent ou de vibreur à bobine de champ.

La force F résultant du passage du courant dans la bobine s'exprime par la relation $F = BIL$, dans laquelle B représente l'induction magnétique (en teslas), I le courant (en ampères) et L la longueur du conducteur constituant la bobine mobile (en mètres).

L'amplificateur de puissance fournit le courant électrique nécessaire à l'alimentation de la bobine. De ce courant dépend la force déli-

vrée par le vibreur et l'accélération communiquée à l'équipage mobile. La vitesse vibratoire, en revanche, est proportionnelle à la tension appliquée.

Les amplificateurs offrent généralement un gain en tension de l'ordre de 100 (ils délivrent donc une tension de 100 volts pour 1 volt d'entrée) et leur puissance est d'environ 1 watt par newton de force fournie.

Le contrôleur (ou console de pilotage) permet de garantir que le signal vibratoire mesuré par l'accéléromètre est égal à tout instant au signal programmé, autrement dit que l'essai est conforme à la spécification. Pour cela, il asservit le niveau vibratoire délivré en corrigeant l'écart entre le signal mesuré et le signal de consigne.

Ce rôle est loin d'être aussi simple qu'il ne paraît. Outre les problèmes classiques propres à tous les systèmes d'asservissement (tels que le compromis entre la précision et la rapidité de la réponse), le contrôleur doit tenir compte des comportements dynamiques de l'échantillon, de sa fixation et du vibreur. Comme chacun d'entre eux a une réponse vibratoire particulière, les phénomènes de résonance ne surviennent pas dans les mêmes gammes de fréquences, ni avec les mêmes niveaux de surtension. Il faut alors considérer les fonctions qu'offre le contrôleur (et notamment le taux de compression du signal, en dB/s) pour s'assurer qu'il est bien adapté à l'application.

Enfin, le contrôle de l'excitation vibratoire est d'autant plus difficile que le produit ou la structure testée sont de forme et de nature complexes. Il faut alors parfois définir une stratégie de contrôle basée sur une mesure des vibrations en plusieurs points de l'échantillon.

: B.A.-BA et ABC...



Qu'il soit utilisé pour reproduire un environnement vibratoire réel, générer des contraintes jusqu'à l'apparition d'une défaillance ou étudier le comportement dynamique d'une structure, un système d'essai en vibrations est toujours constitué d'un vibreur, d'un amplificateur de puissance et d'un contrôleur... C'est la force à laquelle l'échantillon est excité qui détermine ensuite le type de vibreur et le montage nécessaire.

Le capteur. Bien que l'amplitude d'une vibration soit aussi bien définie en termes de déplacement, de vitesse ou d'accélération, le capteur utilisé est toujours un accéléromètre. C'est le contrôleur qui convertit ensuite le signal accélérométrique en vitesse vibratoire (par intégration) ou en déplacement (par double intégration).

Reste à placer le capteur "au bon endroit" pour que le résultat de l'essai soit significatif. Pour cela, il faut éviter, même si la tentation est grande, de le placer au sommet de l'échantillon (qui se comporte comme un ensemble de ressorts et d'amortisseurs). En règle générale, il suffit de placer l'accéléromètre aussi près que possible du centre de la tête du vibreur. Si l'échantillon est de forme complexe, le contrôle sera basé sur la moyenne des mesures en plusieurs points.

Pour dimensionner correctement un système d'essai, deux types d'informations sont nécessaires : les caractéristiques de la pièce à tester (sa masse, sa forme, la position de son centre de gravité, etc.), et celles de l'essai proprement dit, et notamment du mode d'excitation qu'il doit reproduire. La plupart du temps, l'excitation est de type sinusoïdal ou aléatoire.

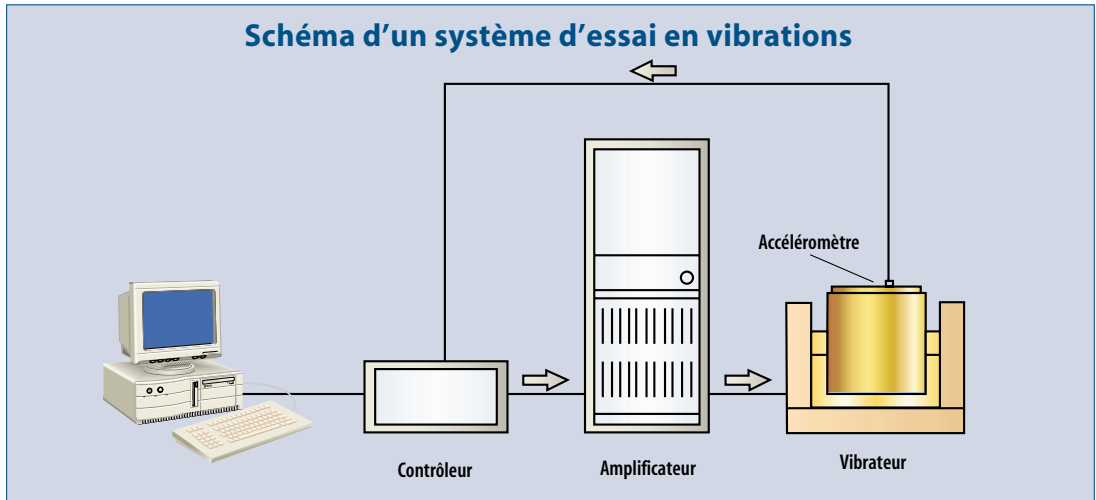
L'excitation sinusoïdale est la plus répandue. Comme son nom l'indique, elle consiste à appliquer au vibreur un signal sinusoïdal de fréquence variable. Le déplacement, la vitesse et l'accélération sont donc trois fonctions sinusoïdales du temps. Cependant, ces grandeurs ne varient pas en phase. La vitesse est en quadrature avec le déplacement (elles sont en déphasage de 90°), tandis que le déplacement et l'accélération sont en

opposition de phase (déphasage de 180°). Toutes les spécifications d'essais en balayage sinusoïdal doivent au moins préciser la plage de fréquence, le niveau imposé dans chaque plage de fréquence, la vitesse et la loi de variation de la fréquence, ainsi que la durée de l'essai (ou le nombre de balayages). La plupart du temps, les profils d'essais suivent une loi logarithmique. La vitesse de balayage est alors définie en octaves par minute. Le nombre d'octaves N entre deux fréquences f_1 et f_2 est donné par la relation :

$$N = \frac{\log(f_2/f_1)}{\log 2}$$

Cette loi de variation permet de soumettre l'échantillon à une fatigue équivalente à chaque fréquence. En effet, lorsque la fréquence augmente, le temps passé à "balayer

Schéma d'un système d'essai en vibrations



L'amplificateur d'un système d'essai fournit le courant électrique nécessaire à l'alimentation du vibreur. Ce dernier soumet l'échantillon à une excitation sinusoïdale ou aléatoire. Grâce aux accéléromètres placés sur l'échantillon, le contrôleur garantit alors que le signal vibratoire est égal à tout instant au signal programmé.

chaque hertz" diminue : à 10 Hz, il faut une seconde pour appliquer 10 cycles de contraintes, alors qu'il ne faut que 100 ms pour appliquer les mêmes cycles à 100 Hz... En revanche, si l'on balaye une plage de fréquences allant de 15 à 1000 Hz avec une vitesse de 1 octave/minute, on parcourt un intervalle de 6,0589 octaves... en 6,0589 minutes.

L'excitation aléatoire. Sur un intervalle de temps donné, un signal aléatoire peut être assimilé à la somme de nombreuses composantes sinusoïdales dont l'amplitude et la phase sont aléatoires.

Pour analyser un tel signal, on pourrait bien sûr utiliser un jeu de filtres passe-bande afin d'isoler chaque composante. Les analyseurs actuels arrivent au même résultat en utilisant l'algorithme de la Transformée de Fourier (FFT ou Fast Fourier Transform). Celui-ci permet

d'obtenir la décomposition spectrale du signal temporel, autrement dit de quantifier le signal pour chaque fréquence d'analyse. Le résultat obtenu est proportionnel à la puissance du signal (sa valeur efficace au carré), et exprimé en fonction de la résolution d'analyse. Ainsi, avec une résolution de 1 Hz, chaque valeur du spectre s'exprimera en g^2 efficaces dans une bande passante de 1 Hz, autrement dit en g^2/Hz . Cette valeur est la densité spectrale de puissance (PSD ou Power Spectral Density). Elle exprime la puissance moyenne du signal dans une bande de 1 Hz, à une fréquence donnée.

On peut alors connaître la puissance totale d'un profil d'essais aléatoire en sommant les puissances contenues dans chaque bande de fréquence élémentaire...

La pièce à tester. Elle est fixée sur la table du vibreur à l'aide d'un outillage spécifique. Toute la difficulté réside alors dans la conception d'un mode de fixation qui transmette la vibration sans perturber les paramètres de l'essai...

Autre règle fondamentale, placer le centre de gravité de la charge (la pièce et sa fixation) dans l'axe de symétrie de la tête du vibreur. Ce dernier est en effet conçu pour générer une poussée suivant l'axe vertical de la bobine. L'ajout d'une charge décalée par rapport à cet axe provoque un mouvement de rotation de la tête du vibreur, et risque d'endommager ses parties mobiles.

De même, la pièce ne doit pas être soumise à une vibration transverse excessive. Pour s'affranchir de cet inconvénient, il est toujours possible de consacrer un accéléromètre

à la mesure de l'accélération transverse, et de prendre en compte son signal dans la stratégie de pilotage (cette méthode est connue sous le terme de "notching" dans les procédures de pilotage multipoints).

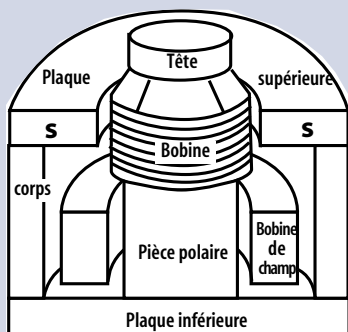
De multiples précautions

En pratique, la mise en œuvre d'un essai en vibrations nécessite de prendre un grand nombre de précautions... La première d'entre elles concerne le montage et l'isolation du système d'essai. Le vibreur, qui applique à l'échantillon une poussée verticale, soumet au sol une force de réaction égale et opposée. Si l'on n'y prend garde, les objets entourant le vibreur et le bâtiment lui-même peuvent donc entrer en résonance et provoquer des dégâts humains et matériels.

Pour s'en affranchir, il faut alors monter le vibreur sur une masse sismique (un bloc de béton isolé du reste du bâtiment) dont le poids est au moins égal à dix fois la force nominale de l'excitateur. Un vibreur qui génère une force maximale de l'ordre de 100 kN doit ainsi être placé sur une masse sismique de 100 tonnes...

Une autre solution consiste à utiliser un système de suspension constitué de coussins gonflables ou de supports spécifiques (en caoutchouc ou en matériaux composites). Mais un système souple ajoute une contrainte supplémentaire. Lorsque la table du vibreur applique une force dirigée vers le haut, la force de réaction déplace le corps du vibreur vers le sol. Le déplacement absolu de la pièce, qui se retranche de celui du vibreur, diminue alors d'autant...

Vibreur à bobine de champ



Avant de mettre en œuvre un essai en vibrations, il faut donc connaître le déplacement absolu maximum de l'équipage mobile. Sa valeur dépend de la masse mobile (M_m) et de celle du corps du vibreur (M_v) suivant la relation :

$$D = \frac{S \cdot M_v}{M_m + M_v}$$

où S est la course nominale du vibreur. Enfin, comme tous les équipements d'essais, un système d'essai en vibrations possède un certain nombre de limites de fonctionnement qu'il est indispensable de bien connaître.

Prendre conscience des limites

Les conditions qui limitent l'utilisation d'un système d'essai en balayage sinusoïdal sont les plus simples à appréhender. Il faut notamment vérifier la valeur crête maximale de la force, qui résulte en première approximation du produit de la masse totale en mouvement par l'accélération crête maximale. D'autres limites proviennent de l'utilisation d'un transformateur de couplage entre l'amplificateur de puissance et le vibreur. Celui-ci permet d'augmenter la tension appliquée au système, et donc d'obtenir une vitesse vibratoire supérieure à la vitesse nominale, mais il limite le courant électrique, et par conséquent la force appliquée. . . Enfin, le système présente une valeur limite d'accélération, ainsi que des limites en basses et hautes fréquences (suivant les caractéristiques du vibreur).

En mode aléatoire, la force maximale générée par le système d'essai est définie par une procédure normalisée (dans l'ISO 5344). Elle est spécifiée pour un spectre d'excitation offrant une pente de 20 dB/décade de 20 à 100 Hz, et plat de 100 à 2 000 Hz. Ce n'est pas une valeur crête (comme dans le cas d'une excitation sinusoïdale), mais une valeur quadratique moyenne (valeur RMS ou efficace).

Attention tout de même à ne pas sous-estimer le comportement dynamique de la charge réelle (qui ne peut pas toujours être assimilé à celui d'une masse pure, comme dans les essais réalisés par le constructeur pour caractériser son vibreur). Comme les charges réelles ne sont vraiment solidaires du vibreur qu'à basses fréquences, l'accélération efficace en certains points de l'échantillon est souvent plus grande que s'il s'agissait d'une masse pure. . .

Par ailleurs, aucun système d'excitation n'offre une réponse en fréquence parfaitement linéaire. A basse fréquence (moins de 500 Hz), on constate alors souvent une baisse du niveau

Petit ABC des essais en vibrations*

- **Accélération.** Dérivée de la vitesse vibratoire. Elle s'exprime en m/s^2 ou en g ($1 g = 9,80665 m/s^2$).
- **Aléatoire.** Se dit d'un signal qui ne peut être décrit que par ses propriétés statistiques (contrairement à un signal déterministe).
- **Amplitude.** Quantifie le niveau d'une vibration. L'amplitude peut être une valeur crête, crête à crête, efficace ou moyenne.
- **Anti-résonance.** Se manifeste lorsque la réponse de la structure présente un minimum à excitation constante.
- **Décade.** Intervalle compris entre deux fréquences dont le rapport est de 10.
- **Décibel (dB).** Permet d'évaluer l'augmentation ou la diminution de l'amplitude d'un signal à partir d'un rapport logarithmique.
- **Densité spectrale de puissance (DSP ou PSD).** Quantifie la puissance d'un signal aléatoire dans une bande de fréquence élémentaire. Elle est obtenue en calculant le rapport entre le carré de l'accélération efficace et la largeur de la bande de fréquence. Elle s'exprime généralement en g^2/Hz .
- **Facteur de crête.** Rapport entre la valeur crête et la valeur efficace d'un signal. Dans le cas d'un signal sinusoïdal, le facteur de crête est égal à $\sqrt{2}$.
- **Force.** La force requise pour un essai de vibrations est égale au produit de la masse totale mobile par l'accélération maximale requise.
- **Harmonique.** Multiple de la fréquence fondamentale d'un signal périodique.
- **Octave.** Intervalle compris entre deux fréquences dont le rapport est de 2. Le nombre d'octaves entre deux fréquences est donné par la relation :

$$N = \frac{\log(f_{\max}/f_{\min})}{\log 2}$$
- **Périodique.** Un signal périodique se répète identiquement à lui-même et ses valeurs peuvent être prévues à l'avance. C'est le cas par exemple d'un signal sinusoïdal.
- **Résonance.** Se manifeste lorsque la réponse d'une structure présente un maximum à excitation constante.
- **RMS (Root Mean Square).** Racine carrée de la moyenne du carré. Permet de calculer la valeur efficace d'un signal.
- **Sous-harmonique.** Composante de fréquence sous-multiple de la fréquence fondamentale d'un signal périodique
- **Transverse.** Se dit de tout mouvement dont la direction n'est pas celle de la force d'excitation du vibreur.
- **Vibration.** Un corps ou un point vibre lorsqu'il effectue un mouvement alternatif autour de sa position d'équilibre.
- **Vitesse.** La vitesse vibratoire est la dérivée du déplacement. Elle s'exprime en mètres par seconde ou en millimètres par seconde.

*Vous pourrez retrouver ces définitions, et bien d'autres, sur notre site Internet www.mesures.com (rubrique glossaire).



Les analyseurs permettent de définir un certain profil d'essai, et de suivre le comportement de l'échantillon en fonction de la sollicitation qui lui est appliquée.

vibratoire, que l'on peut compenser à l'aide d'un transformateur de couplage. Dans tous les cas, la mise en œuvre d'un essai en vibrations doit donc faire l'objet d'une démarche rigoureuse. Une fois que l'on connaît la force maximale du système, ses limites de fonctionnement et la charge statique maximale qu'il peut supporter, il faut encore envisager les conditions de mise en

œuvre et l'environnement de l'essai : utiliser en général un système de refroidissement, vérifier que la puissance électrique disponible est suffisante, quantifier les bruits et les vibrations engendrés par le système, et même dans certains cas associer l'essai en vibrations avec des essais acoustiques ou climatiques. . . Il existe enfin quelques règles d'or. . . En matière de vibrations, mieux vaut toujours compter une marge de sécurité de 20 à 30 % lors du dimensionnement de l'essai, afin de ne jamais faire travailler le système trop près de ses limites. Ne pas oublier, également, qu'il faut compter dans la masse totale en mouvement tous les éléments solidaires de la partie mobile du vibreur (à savoir la pièce, mais aussi le dispositif de fixation, les capteurs, les câbles, etc.) . . . et qu'il vaut toujours mieux, en cas de doute, demander l'avis d'un spécialiste.

Pascal Cornu
LDS Test & Measurement
MLZ