

Vibrations de machines

Version du 2015-08-18

1. Introduction

L'étude des vibrations est un sujet très vaste qui s'étend du domaine microscopique jusqu'aux structures géantes comme les ponts, les tours, en passant par les moteurs, les fuselages d'avions et les coques de navires. Ces structures ont en général plusieurs modes de vibrations possibles. L'analyse modale permet de les identifier et en même temps d'évaluer leur sensibilité aux excitations de toutes sortes. Une telle étude peut être effectuée dans le but de s'assurer que la structure aura une résistance adéquate aux déformations, ou que sa longévité sera suffisante en dépit de la fatigue du métal, ou pour minimiser le bruit, etc.

La présente expérience portera sur les vibrations dans les machines tournantes. Ces vibrations doivent en général être minimisées car, en plus de produire du bruit, elles peuvent perturber les structures avoisinantes et surtout entraîner une usure très rapide des coussinets. Cependant, même avec des rotors bien équilibrés, des vibrations persistent toujours. Il est souvent utile de les mesurer périodiquement, car ceci permet d'évaluer l'usure normale en fonction du temps et prévenir ainsi un bris inattendu et potentiellement catastrophique.

Par exemple, les moteurs à turbine (avion, centrales d'énergie, etc.) sont pratiquement tous équipés pour que l'analyse de leurs vibrations puisse être faite de façon routinière, ou même de façon continue. Les techniques d'analyse sont maintenant assez perfectionnées pour permettre de dire, par exemple, qu'une certaine vibration anormale provient d'un roulement à billes en particulier, et qu'en plus, elle est causée par une imperfection sur une des billes, ou sur la couronne intérieure ou sur la couronne extérieure du roulement.

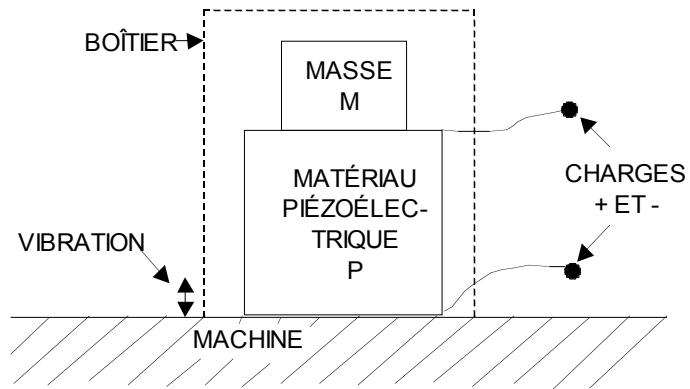
2. Équipement de mesure

Pour mesurer la vibration en un point d'une machine, il existe des capteurs de déplacement ou de vitesse ou encore d'accélération. Les accélémètres sont de loin les plus utilisés et c'est là la justification du choix fait pour les senseurs de la présente expérience.

Les vibrations sont rarement des sinusoïdes pures; elles comportent le plus souvent des harmoniques pouvant atteindre des fréquences élevées. Le capteur doit avoir une réponse en fréquence assez large pour reproduire fidèlement ce genre de signaux. Présentement, les accélémètres qui ont la réponse en fréquence la plus étendue sont ceux basés sur l'effet piézoélectrique.

Vibrations – 5.2

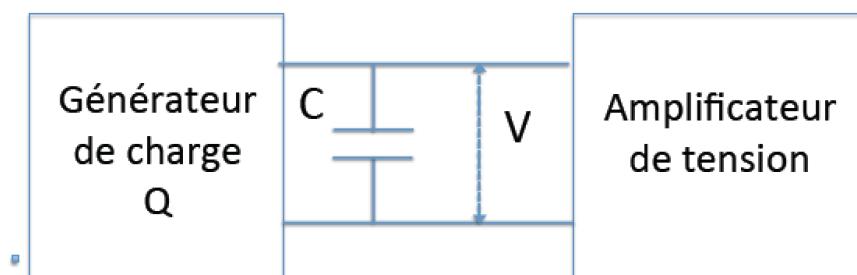
1.1 Accéléromètre piézoélectrique



Lorsqu'un bloc de matériau piézoélectrique subit une déformation, des charges électriques + et - apparaissent sur les faces opposées. La quantité de charges est proportionnelle à la déformation et la polarité change selon qu'il s'agit d'une compression ou d'une extension. Le boîtier de l'accéléromètre étant fixé sur la surface en vibration, on constate que la masse M, de par son inertie, impose des contraintes dans l'élément piézoélectrique P. Les charges électriques qui apparaissent sont directement proportionnelles à l'accélération instantanée à la surface de la machine.

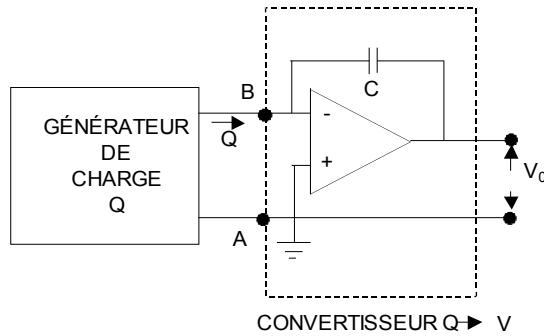
2.2 Conditionnement du signal

L'accéléromètre piézoélectrique produit un signal un peu particulier car il ne s'agit pas d'une tension, ni d'un courant, mais d'une charge électrique. Il faut le transformer en un signal de tension.



La manière la plus simple et la plus immédiate consiste à injecter la charge sur une capacitance C. Il apparaît alors une différence de potentiel $V=Q/C$. Ce signal de potentiel peut ensuite être amplifié d'une façon conventionnelle.

Vibrations – 5.3



Le procédé fonctionne assez bien mais son usage tend à diminuer car il exige que la capacitance soit non seulement connue avec précision mais aussi demeure très stable. Or, dans la pratique, ces deux conditions sont difficiles à satisfaire car C est fortement influencé par la capacitance distribuée des connexions entre l'accéléromètre et l'amplificateur. Il s'agit donc d'une capacitance un peu aléatoire. Il existe un circuit qui donne une meilleure précision : le convertisseur Charge à Tension (souvent appelé aussi «préamplificateur de charge»).

Le principe est simple mais son étude n'entre pas dans le cadre de cette expérience. Il est possible de prouver les deux aspects suivants :

1. Il apparaît une tension de sortie V_0 donnée par : $V_0 = Q/C$. La capacitance étant maintenant une composante interne, il est facile de lui donner une valeur stable et connue.
2. La rétroaction de l'amplificateur opérationnel maintient une tension nulle entre les bornes d'entrée A et B. Par conséquent, toute capacité placée entre ces deux points, comme celle des connexions, n'a pas d'effet puisqu'elle ne se charge pas. Elle peut donc avoir n'importe quelle valeur (ce qui permet entre autres d'utiliser des connexions très longues si on en a besoin) ou même être instable.

2.3 Traitement du signal

Les sections précédentes ont décrit l'équipement de base pour faire la mesure des vibrations : un capteur et un conditionnement approprié. Selon les renseignements recherchés, le signal ainsi obtenu peut être soumis à différents traitements. Les plus fréquents sont : l'amplification, le redressement, l'intégration, le filtrage, l'analyse spectrale, les traitements mathématiques.

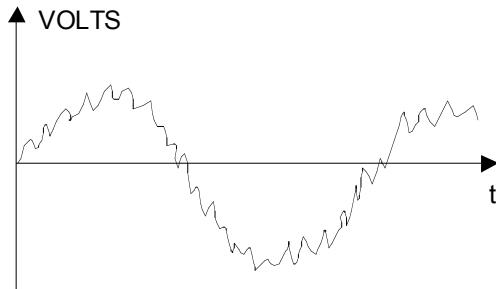
2.3.1 L'amplification

Les capteurs piézoélectriques produisent ordinairement des signaux relativement faibles, soit de l'ordre du millivolt ou même moins. Il faudra en général utiliser un amplificateur de tension. Ce dernier n'a pas besoin d'avoir des caractéristiques particulières mais il est bon de se souvenir que la plus petite vibration qui peut être détectée est celle dont le signal commence à se confondre avec le bruit de fond de l'équipement. Si c'est ce type de vibration qui vous intéresse, il sera impératif de choisir un amplificateur à faible bruit. Il est bon de se souvenir aussi que les connexions qui partent de l'accéléromètre subissent des vibrations qui peuvent faire apparaître des tensions parasites entre les conducteurs. Certains types de câbles coaxiaux sont moins sensibles que d'autres à ce phénomène.

Vibrations – 5.4

2.3.2 Le redressement

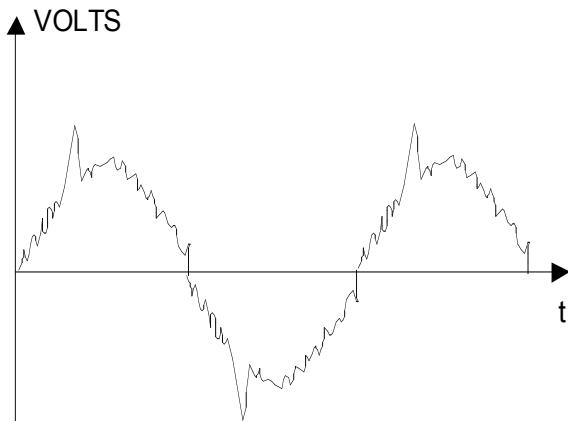
Il arrive fréquemment que l'on ne soit pas intéressé à étudier les vibrations d'une machine d'une façon détaillée, mais plutôt d'une façon globale, c'est-à-dire on désire simplement savoir si elle "vibre trop" ou non.



Un signal typique de vibration, tel que vu à l'oscilloscope, est comme celui indiqué ci-dessus. Il est formé en général de plusieurs vibrations dont certaines sont des harmoniques et d'autres qui n'ont aucun lien de "parenté" en ce qui concerne les fréquences. L'oscilloscope n'étant pas un appareil qui peut être laissé branché en permanence sur une machine, il convient de trouver un moyen pour attribuer une valeur numérique à cette forme d'onde.

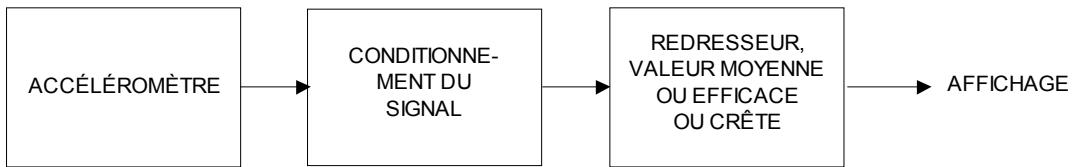
Puisque les oscillations ont toujours une valeur moyenne nulle, il faut évidemment redresser le signal avant de chercher à le mesurer. Le redresseur pourra être du type sensible à la valeur crête, ou à la valeur moyenne redressée, ou à la valeur efficace.

Il revient à l'utilisateur de l'équipement de décider quel type de redressement est le plus approprié à ses besoins. Par exemple, si la vibration comporte de grands signaux de type impulsif, c'est-à-dire des chocs, et que ce sont précisément eux qu'il faut mesurer, il convient d'utiliser un redresseur de valeur crête car les autres sont relativement insensibles à ce genre de signaux.



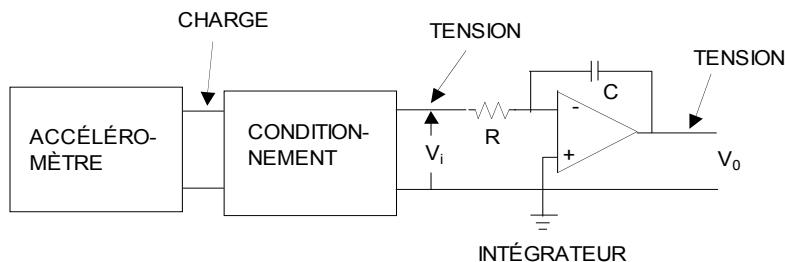
L'expérience ayant démontré que, dans bien des cas, le niveau moyen de vibrations est un bon indice de l'état d'usure d'une machine tournante, il est fréquent de voir de ces machines équipées d'un module de surveillance dont le schéma en bloc est indiqué ci-dessous.

Vibrations – 5.5



2.3.3 L'intégration

Dans l'étude d'une vibration, il est quelquefois intéressant de s'attarder non pas à son accélération mais plutôt à sa vitesse.



Un accéléromètre peut fournir cette information; il suffit de faire passer son signal dans un intégrateur en fonction du temps. La tension V_0 est proportionnelle à la vitesse instantanée de la vibration car

$$V_0 = -\frac{1}{RC} \int V_i dt$$

Dans d'autres cas, c'est plutôt le déplacement en fonction du temps qui est intéressant. Cette information peut être obtenue facilement en faisant passer le signal de vitesse dans un autre intégrateur.

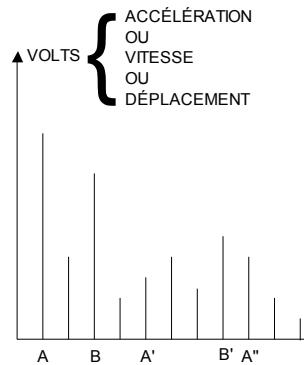
Notons qu'en général, un signal intégré dans le temps apparaît plus simple, à l'oscilloscope, que l'original. Cette simplicité n'est toutefois qu'apparente; certaines oscillations qui sont devenues invisibles pour l'œil humain n'en demeurent pas moins présentes dans la trace. Il appartient encore une fois à l'utilisateur de

l'équipement de décider lequel des trois signaux est le plus approprié. Le plus souvent, ce sera l'accélération.

2.3.4 Le filtrage

Le signal de l'accéléromètre peut être considéré comme étant la superposition de plusieurs oscillations périodiques. Il est donc possible de le représenter par un spectre dans le domaine des fréquences. Souvent la composante la plus intense est celle dont la fréquence correspond à la fréquence de rotation de la machine et elle est due à un équilibrage imparfait de la partie tournante; il est évident qu'une masse non équilibrée produit une oscillation à chaque tour. Elle est représentée par la raie A dans le spectre ci-haut. De plus, en général, l'oscillation n'est pas une sinusoïde pure, de sorte que la raie A est accompagnée de son cortège d'harmoniques A', A'', etc.

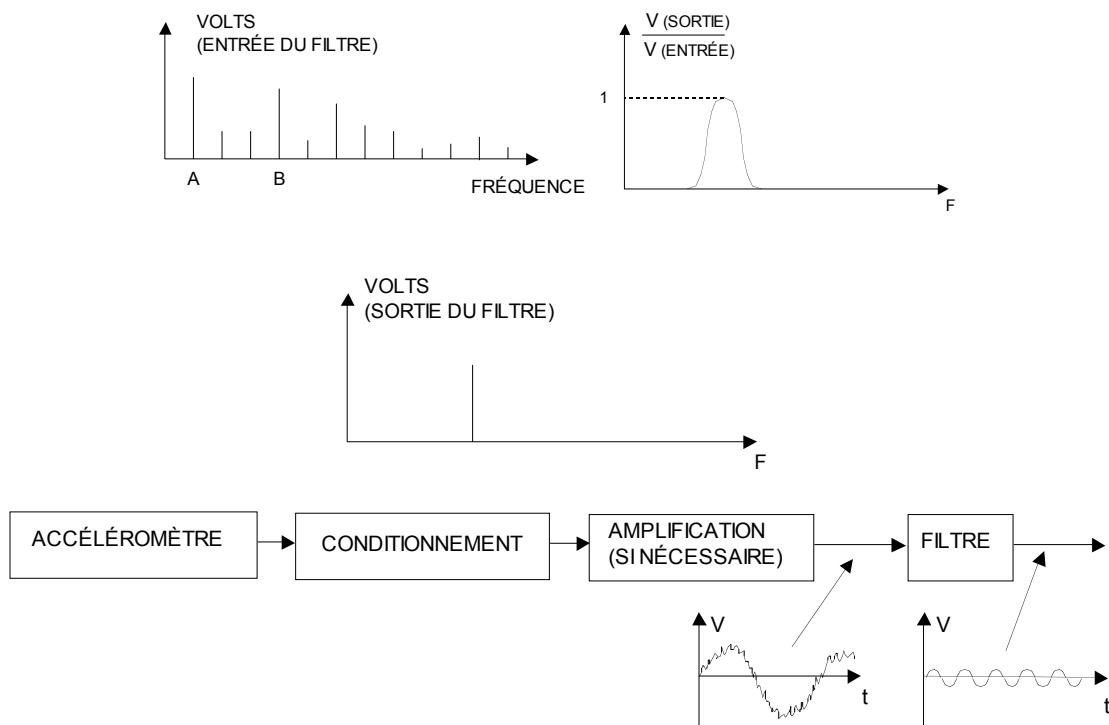
Vibrations – 5.6



Les autres raies du spectre peuvent correspondre à des oscillations d'origines très variées. Par exemple, si la machine comporte un roulement à billes, la rotation d'une bille imparfaite peut donner lieu à un spectre de vibration représenté par les raies B, B', B'', etc. De même, si la machine comporte des engrenages, on aura des spectres basés sur la fréquence d'engrènement. La mesure de ces spectres permet de déterminer l'usure de l'engrenage ou la présence d'une dent endommagée.

Si l'étude consiste à mesurer une raie de vibration particulière et si sa fréquence est connue, il est possible de « nettoyer » considérablement le signal avant de le mesurer en le faisant passer par un filtre qui rejette les composantes spectrales dont la fréquence n'est pas intéressante. On utilise un filtre de type passe-bas, ou passe-haut, ou passe-bande.

Le schéma ci-dessous illustre l'effet d'un filtre passe-bande destiné à ne laisser passer que la raie B. Il est bon de se souvenir que chaque raie d'un spectre représente une sinusoïde pure. Il faut donc s'attendre à ce que le signal de sortie du filtre soit sensiblement sinusoïdal et par conséquent plus facile à mesurer qu'une forme complexe.

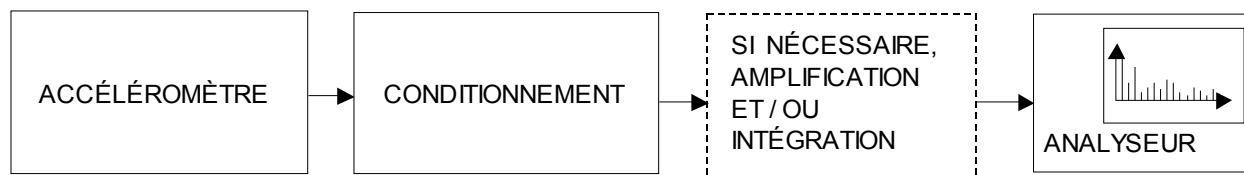


Vibrations – 5. 7

Le scénario précédent est un peu idéalisé. En réalité, les filtres laissent passer un peu les composantes indésirables et, de plus, les raies spectrales sont quelquefois tellement rapprochées qu'il est difficile d'en isoler une complètement des autres. Le filtrage n'en demeure pas moins un procédé très valable qui facilite grandement la recherche des causes d'une vibration.

2.3.5 Analyse spectrale

Le spectre décrit dans la section précédente peut être obtenu et affiché directement au moyen d'un "analyseur spectral". Cet outil extrêmement puissant accepte le signal de forme complexe provenant de l'accéléromètre (après conditionnement et, si désiré, une ou deux intégrations) et en extrait l'amplitude et la fréquence de chaque raie. Depuis l'avènement des microprocesseurs de haute performance, cette opération se fait par transformée de Fourier. L'analyseur est en voie de devenir l'appareil standard pour le diagnostic des vibrations. Lorsqu'il s'agit de décortiquer une superposition complexe de vibrations, il est de loin supérieur aux filtres. Cependant, pour des cas moins difficiles, ces derniers offrent une simplicité inégalée.



3. Manipulations

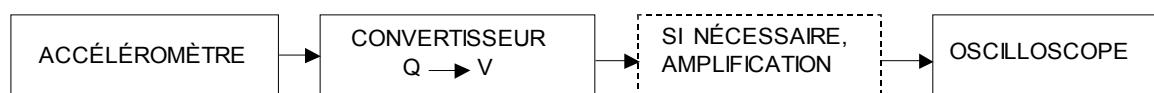
Les manipulations ont pour but d'illustrer les sujets 1, 2, 3, 4 et 5 discutés précédemment (Section 2.3) ainsi que la recherche des modes de vibrations mentionnés en introduction.

Note :

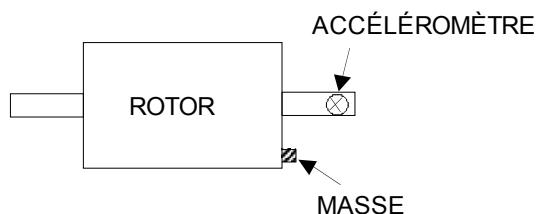
Dans les manipulations 1 et 3, ne tenir compte que de la composante principale des vibrations, c'est-à-dire celle dont la fréquence correspond à la vitesse de rotation.

3.1 Mesures d'accélérations

1. En utilisant un seul des deux accéléromètres, réaliser le montage suivant :

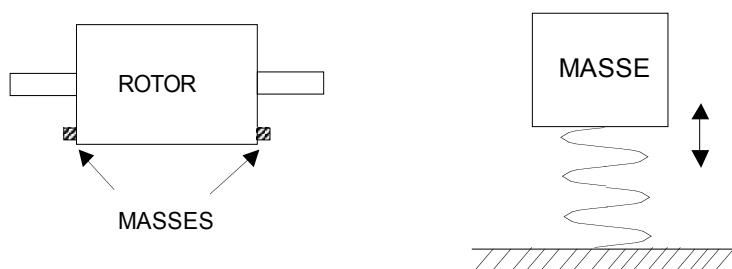


2. Pour obtenir une forte vibration, installer une masse non équilibrée comme indiqué ci-dessous. D'après l'oscilloscope, quelle est l'accélération maximum que subit la machine lorsqu'elle tourne à 1000 RPM?



3. Le rotor a été réalisé avec le plus grand soin afin qu'il soit équilibré le mieux possible. Après avoir enlevé la masse non équilibrée installée précédemment, que reste-t-il comme vibration? Le bruit de l'équipement électrique nuit-il à cette mesure?

4. Introduire deux masses non équilibrées, comme indiquées ci-dessous
- 5.



Vibrations – 5.9

La machine ainsi déséquilibrée, en conjonction avec ses supports plus ou moins flexibles, peut être assimilée au système masse-ressort indiqué à droite. On sait qu'un tel système a tendance à osciller et possède une fréquence de résonance qui peut être très préjudiciable pour la machine.

En faisant varier la fréquence d'excitation, c'est-à-dire la vitesse du moteur, observer la résonance et déterminer sa forme. Dans cette perspective, **prenez suffisamment de point de mesures** pour déterminer aussi bien la valeur précise en fréquence comme l'allure de la courbe.

À quelle vitesse de rotation se produit-elle et quelle est l'accélération crête?

Dans ces conditions, connaissant la masse de la machine, quelle est la force maximum qui apparaît dans chaque support, pendant un tour? Est-ce que cette force peut engendrer des problèmes, selon vous?

3.2 Recherche de modes de vibration

Une structure peut vibrer de plusieurs façons et il est souvent difficile de les identifier. Une technique pour essayer de résoudre ce problème consiste à utiliser deux ou plusieurs accéléromètres et comparer leurs signaux en amplitude et en phase.

Le montage précédent est muni d'un deuxième accéléromètre.

1. Avec une vitesse de rotation quelconque, comparer les amplitudes des signaux et la phase de l'un par rapport à l'autre. Le mode de vibration est-il bien celui d'une machine qui vibre comme un tout, de haut en bas?

Le rotor précédent était déséquilibré statiquement et, à plus forte raison, dynamiquement. Or, il est possible d'avoir un équilibre statique mais en même temps un déséquilibre dynamique.

Un exemple est illustré ci-dessous. Avec deux masses égales, un déséquilibre n'apparaît que si elles sont mises en rotation.



2. Réaliser ce montage et comparer les signaux des deux accéléromètres.

La phase indique-t-elle un mode de vibration différent du précédent? Est-ce que l'amplitude est la même? Pourquoi?

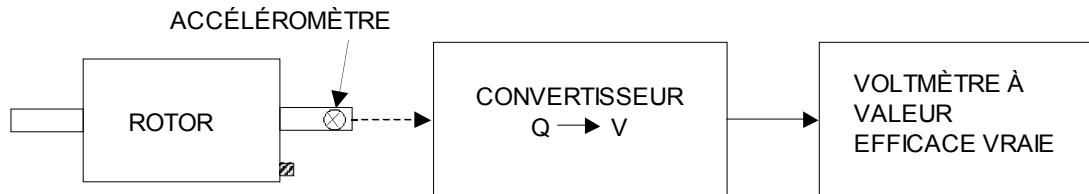
Dans un plan vertical, celui des accéléromètres, comment cette machine vibre-t-elle? Faire un dessin dans votre cahier de laboratoire pour l'illustrer. Pouvez-vous observer le phénomène de battements?

Vibrations – 5.10

3.3 Mesure d'une vibration globale

Si on n'est pas intéressé à identifier des modes ou des causes de vibrations, alors la valeur efficace du signal d'accélération constitue une bonne mesure de la vibration dans son ensemble.

1. Réaliser le montage suivant :



Si la précision du voltmètre ne vous satisfait pas, vous pouvez le remplacer par un oscilloscope qui a une meilleure précision.

Une masse non équilibrée provoque évidemment des vibrations dont l'intensité croît avec la vitesse de rotation.

2. Tracer une courbe de la “vibration efficace” (en mètres/s²) en fonction de la vitesse de rotation.
3. Refaites les mêmes mesures qu'en 2, mais pour une configuration symétrique des masses. Que remarquez-vous au sujet de l'accélération efficace et du bruit? Pourquoi en est-il ainsi?

3.4 Mesure de la vitesse et du déplacement

1. Remplacer le voltmètre du montage précédent par un oscilloscope.
2. Enlever une des masses sur le rotor, comme sur la figure dans le haut de la page suivante.
3. Effectuer une intégration du signal afin de mesurer la vitesse.

Lorsque la machine tourne à 1200 RPM, quelle est la vitesse maximum (en mètres/s) de la surface sur laquelle est monté l'accéléromètre? Faire attention parce que le convertisseur ajoute un facteur multiplicatif de 100 à la mesure.

Vous n'avez pas de deuxième intégrateur pour extraire un signal de déplacement mais, dans le cas présent, le signal de vitesse étant tellement simple (vous pouvez l'assimiler à une sinusoïde), il peut être utilisé pour calculer le déplacement.

De combien la machine se déplace-t-elle, dans le sens vertical, lorsqu'elle tourne à 1200 RPM? Pensez-vous que ce déplacement est dangereux pour la machine?

4. Faire la même mesure plus près de la résonnance et calculer le déplacement.
Est-ce que ce déplacement pourrait briser la machine?

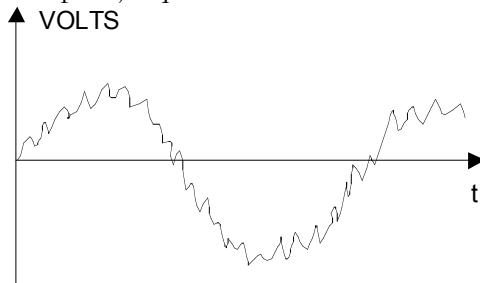
3.5 Filtrage du signal

1. Réaliser le montage ci-dessous :

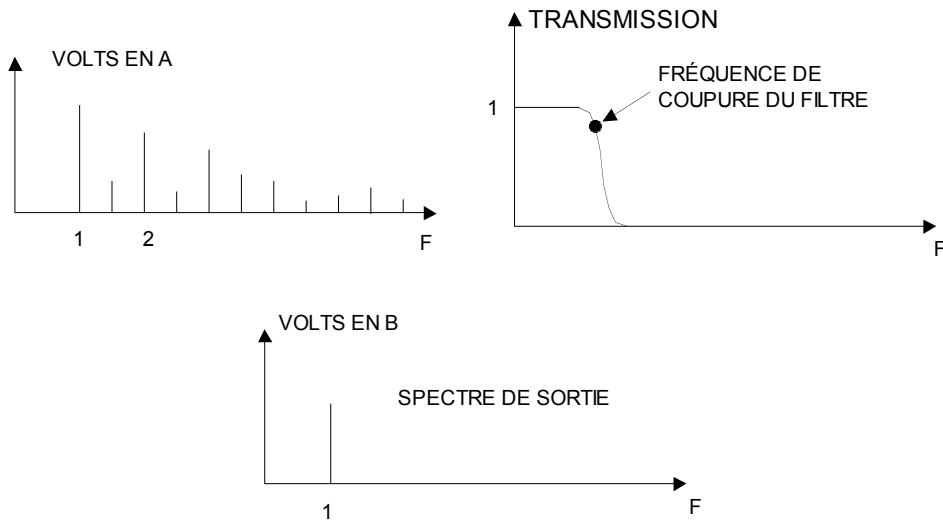
Vibrations – 5.11



2. En faisant tourner la machine à une vitesse constante, par exemple 1500 RPM, le signal sans filtrage (au point A) apparaîtra comme indiqué plus bas. Il est bon d'ajuster l'amplification pour obtenir au moins 1 volt; le filtre peut accepter jusqu'à 5 volts.



Le but de la manipulation est d'arriver à mesurer séparément les amplitudes des deux composantes sinusoïdales les plus importantes de cette vibration.



3. La composante fondamentale, dont la fréquence est la même que celle de rotation, peut être isolée facilement au moyen d'un filtrage passe-bas car le signal ne contient pas de fréquences plus basses. La tension filtrée est une sinusoïde facilement mesurable. Utiliser un filtre passe-bas ajustable pour mesurer son amplitude et sa fréquence.

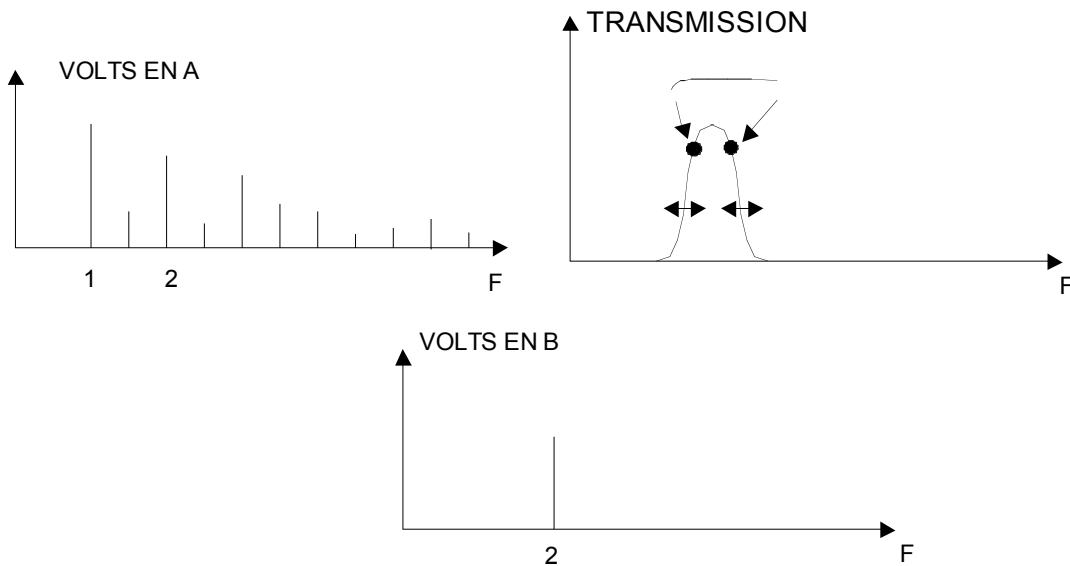
Attention : le filtre doit être ajusté avec une fréquence de coupure plus élevée que celle du signal, car à la coupure, la transmission n'est plus que $1/\sqrt{2}$ au lieu de 1.

La deuxième composante est plus délicate à isoler car il faut rejeter tout ce qui est plus élevé et tout ce qui est plus bas dans le domaine des fréquences; on utilisera donc un filtrage passe-bande.

Vibrations – 5.12

4. La fréquence étant inconnue a priori (quoique l'oscilloscope permet d'en avoir une estimation), il faudra procéder par essais en déplaçant les fréquences de coupures haute et basse de manière à faire apparaître au point B la sinusoïde recherchée.

Quelle est son amplitude (en volts) et sa fréquence?
Pouvez-vous imaginer une cause pour cette vibration?



3.6 Analyse spectrale du signal

Utiliser le même montage que précédemment mais en remplaçant le filtre et l'oscilloscope par un analyseur spectral.

Après avoir obtenu le spectre (l'assistant de laboratoire peut vous aider), comparer les amplitudes et les fréquences des deux raies principales avec celles qui ont été trouvées dans la partie précédente.

Quelle est la meilleure méthode pour analyser la vibration de machines?