

IV - DÉTERMINATION D'UNE SUSPENSION ÉLASTIQUE

Afin de déterminer une suspension élastique, il est indispensable de connaître avec précision les caractéristiques essentielles de la machine à suspendre.

Il est de la plus haute utilité de disposer d'un plan (même schématique) indiquant la position du centre de gravité et des points de fixation prévus.

Ce plan permet, en outre, d'évaluer, éventuellement, certains paramètres que les constructeurs ou les utilisateurs ne connaissent souvent pas (moments d'inertie par exemple).

Dans le cas d'une suspension indirecte, il faut obtenir le maximum de renseignements sur les vibrations extérieures susceptibles de perturber la machine.

De toute façon, pour les cas complexes (oscillations suivant plusieurs axes de liberté, excitations multiples...), il est conseillé de consulter les services techniques PAULSTRA.

Dans les cas simples (un seul degré de liberté, ou deux mouvements de liberté et centre de gravité près du plan de pose) on pourra déterminer la suspension, comme indiquée ci-après moyennant un minimum de connaissance de la machine et de la perturbation.

Informations à connaître sur...	...pour déterminer les paramètres fondamentaux de la suspension
...la MACHINE et... Centre de gravité Poids Nombre et position des points de fixation (prévus ou possibles)	Charge appliquée sur chaque support
la PERTURBATION... Fréquence perturbatrice (ou vitesse de rotation)	Flèche des supports suivant l'atténuation désirée
Direction principale de l'effort perturbateur	Elasticité prépondérante du support

IV.1 - DÉTERMINATION DU CENTRE DE GRAVITÉ

IV.1.1 - Recherche auprès du constructeur

Dans la plupart des cas, le Constructeur de la machine doit être en mesure de fournir la position exacte du centre de gravité ainsi que son poids. Consultez-le.

IV.1.2 - Recherche graphique du centre de gravité d'un ensemble

Cas des groupes composés de différents ensembles dont on connaît pour chacun poids et centre de gravité

• Remarque importante

- Dans le cas de la recherche graphique, il importe de représenter les distances suivant une échelle bien déterminée, et les poids par des droites verticales de longueur proportionnelle à la grandeur du poids (exemple : prendre 1 cm pour 10 daN).
- Si les centres de gravité, considérés dans ce paragraphe, ne sont pas dans le même plan vertical, les raisonnements proposés ci-après seront faits suivant deux vues : vue de face et vue de profil, avec des cotes correspondant à chacune des vues.

- Cas d'un ensemble composé de 2 appareils

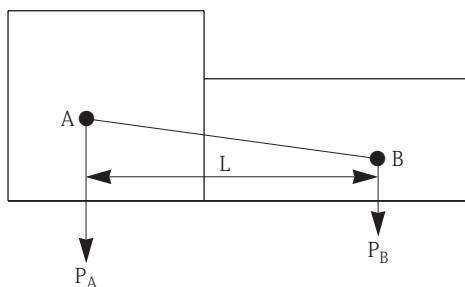


Fig. 8

Soit deux appareils de poids respectifs P_A et P_B et de centre de gravité A et B et distants de L.

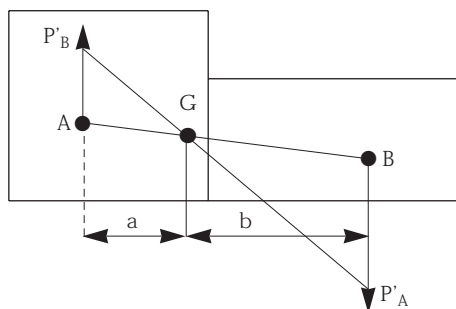
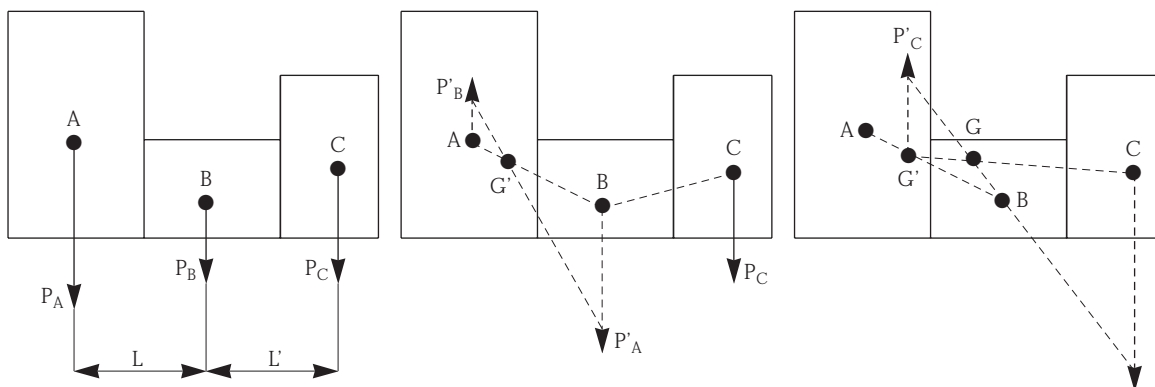


Fig. 9

Mener : $AP'_B = BP_B$ Joindre P'_A et P'_B
 $BP'_A = AP_A$
 Le centre de gravité G se trouve à l'intersection des droites P'_A P'_B et AB.
 Mesurer a et b.

- Cas d'un ensemble de 3 (ou plus) appareils

Procéder de proche en proche comme dans le paragraphe précédent sur des groupes de deux sous-systèmes de centre de gravité et poids connus ou calculés.
 Application à 3 appareils.



IV.1.3 - Recherche expérimentale du centre de gravité d'un ensemble

Cette recherche s'applique lorsque les deux précédentes s'avèrent impossibles ou délicates (forme géométrique complexe).

- Recherche à l'aide d'un rouleau

Pour un sens donné (longueur, largeur et hauteur), le centre de gravité est placé dans le plan vertical passant par l'axe du rouleau pris au moment du basculement. Le centre de gravité se trouve à l'intersection des 3 plans (longueur, largeur, hauteur) ainsi définis.

- Recherche par "pendaison" de l'ensemble

Suspendre la machine à l'aide d'un câble, le centre de gravité se situe sur le prolongement de la verticale. Pour connaître la position exacte du centre de gravité, répéter deux fois cette opération, en utilisant à chaque fois un point d'attache différent.

IV.1.4 - Détermination analytique du centre de gravité d'un ensemble de plusieurs masses

On considère un ensemble de plusieurs masses m_1, m_2, \dots, m_n situées dans l'espace. Les coordonnées du centre de gravité de chacune de ces masses dans un repère orthonormé quelconque sont supposées connues.

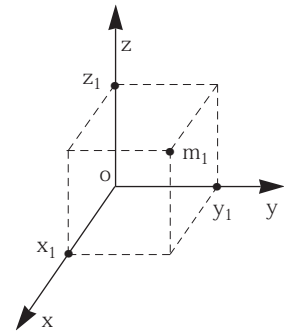
$$m_1 \begin{cases} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{cases} \quad m_2 \begin{cases} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{cases} \quad m_n \begin{cases} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{cases}$$

La masse de l'ensemble $M = m_1 + m_2 + \dots + m_n$ sera repérée par les coordonnées du centre de gravité de celui-ci : x, y, z

$$x = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_n x_n}{M}$$

$$y = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2 + \dots + m_n y_n}{M}$$

$$z = \frac{m_1 z_1 + m_2 z_2 + \dots + m_n z_n}{M}$$



Remarque importante : les coordonnées des centres de gravité peuvent être négatives et doivent être considérées avec leur signe.

IV.2 - DÉTERMINATION DE LA CHARGE PAR SUPPORT

IV.2.1 - Le nombre et la position des points de fixation ne sont pas imposés

Dans ce cas on déterminera le nombre et la position des points de fixation de telle manière que la charge de chaque support soit la même pour tous les points de fixation.

Exemple : supposons une machine avec un axe de symétrie.

G : centre de gravité

P : poids de la machine

Calculons la position de 6 points de fixation pour que la charge en ces points soit égale à P_1

$$P_1 l'_1 + P_1 l'_2 = P_1 l_1$$

$$\text{d'où } l_1 = l'_1 + l'_2 \text{ et la charge par point} = \frac{\text{Poids}}{6}$$

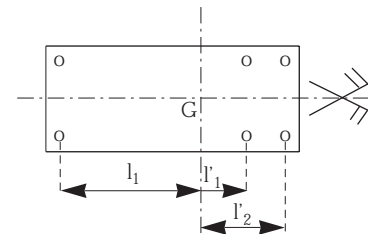


Fig. 13

IV.2.2 - Le nombre et la position des points de fixation sont imposés

Dans ce cas, les charges en chaque point peuvent ne pas être identiques.

• Cas de quatre points de fixation

A, B, C et D sont les points de fixation

G le centre de gravité

P le poids total suspendu

P_A, P_B, P_C et P_D seront les charges aux points A, B, C et D.

$$P_A = \frac{m_2}{b} \cdot \frac{l_2}{a} \cdot P \quad P_B = \frac{m_1}{b} \cdot \frac{l_2}{a} \cdot P$$

$$P_C = \frac{m_1}{b} \cdot \frac{l_1}{a} \cdot P \quad P_D = \frac{m_2}{b} \cdot \frac{l_1}{a} \cdot P$$

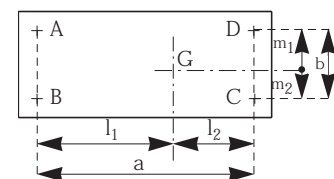


Fig. 14

Si P_A, P_B, P_C et P_D sont notablement différents, il faudra théoriquement choisir quatre supports différents donnant la même flèche sous les dites charges.

• **Cas de plus de quatre points de fixation (fig. 15)**

Dans ce cas, il est préférable que la symétrie par rapport à un plan vertical soit respectée. Ceci sera supposé respecté pour ce qui suit.

A gauche de G se trouvent 2 supports identiques.

A droite de G se trouvent 2 supports identiques mais éventuellement différents des 2 supports de gauche.

Le problème consiste à différencier les supports gauches et droits, de manière que la flèche sous charge de $2n + 2p$ supports soit la même.

Dans ces conditions tous les supports situés à gauche de G supporteront la même charge Q et tous ceux de droite la même charge R .

On aura :

$$Q (l_1 + l_2 + \dots + l_n) = (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p)$$

$$2 n Q + 2 p R = P$$

d'où la charge des supports :

$$Q = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_p}{2 n (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p) + 2 p (l_1 + l_2 + \dots + l_n)} \cdot P$$

$$R = \frac{l_1 + l_2 + l_n}{2 n (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p) + 2 p (l_1 + l_2 + \dots + l_n)} \cdot P$$

Si Q et R ne sont pas trop différents, on pourra choisir des supports de même dimensions mais de dureté différente.

Exemple de calcul (Fig.16)

Soit une machine possédant un axe de symétrie, un centre de gravité G non centré et 6 points de fixation, d'où :

$n = 2$ et $p = 1$.

Il vient :

$$Q = \frac{\lambda}{4 \lambda + 2 (l_1 + l_2)} \cdot P$$

$$R = \frac{l_1 + l_2}{4 \lambda + 2 (l_1 + l_2)} \cdot P$$

Si la machine pèse 500 daN

et que $\lambda = 0,4 \text{ m}$; $l_1 = 0,3 \text{ m}$; $l_2 = 0,9 \text{ m}$, il vient $Q = 50 \text{ daN}$ et $R = 150 \text{ daN}$.

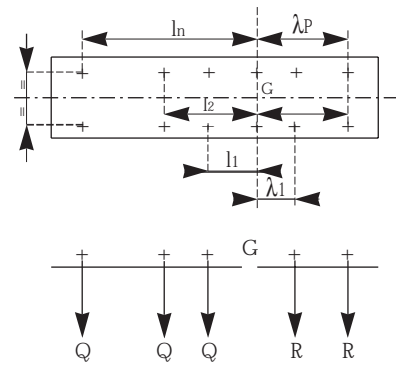


Fig. 15

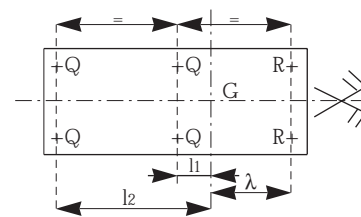


Fig. 16

IV.2.3 - Remarques importantes

Si les supports de même dimension, mais de dureté différente sont choisis, le risque d'intervention des supports est grand et peut entraîner une dégradation de l'atténuation de la suspension. Le montage se fera donc avec soin.

Il y a cependant intérêt à réaliser des suspensions sur des supports identiques. Si les points de fixation imposés du châssis ne permettent pas directement une suspension centrée, une bonne solution consiste à fixer sur ces points un faux châssis, le plus rigide possible, sur lequel on fixera des supports élastiques identiques en nombre et position voulus. Si ce faux châssis est une dalle en béton (ou dalle d'inertie) la masse à suspendre sera augmentée, ce qui améliorera la qualité de la suspension (cf. Définition et Généralités Théoriques § 1.3.1).

IV.3 - DÉTERMINATION DE LA FLÈCHE

IV.3.1 - Flèche et sous-tangente

Si l'on considère la courbe caractéristique charge/flèche d'un support donné, la flèche et la sous tangente sont graphiquement définies comme indiquées. Fig. 17.

Pour une charge statique donnée, la flèche correspond à l'écrasement du support sous cette charge, mais l'élasticité autour de la position sous charge est définie par la sous-tangente qui intervient dans la détermination de la rigidité du support.

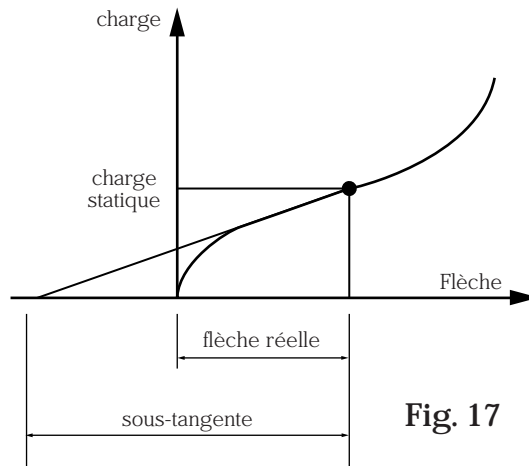


Fig. 17

Pour la plupart des supports PAULSTRA, la caractéristique charge/flèche est presque linéaire dans la zone des charges statiques (fig.18) et de ce fait, la sous-tangente et la flèche sont voisines.

La courbe de la fig. 17 est caractéristique des supports EVIDGOM.

Dans ce cas, il est intéressant de travailler au point d'inflexion de la courbe pour obtenir la sous-tangente la plus grande possible, donc la fréquence propre la plus basse possible.

La flèche n'indique pas les amplitudes des oscillations de la machine.

IV.3.2 - Zones de fonctionnement

La zone OM est la zone des charges statiques. La flèche y est sensiblement proportionnelle à la charge.

Dans les fiches techniques, les coordonnées du point M sont données par la CHARGE STATIQUE NOMINALE.

La zone MP est la zone des charges dynamiques correspondant à des cas courants de chocs répétés sous réserve que la cadence et la flèche totale restent dans les limites normales.

Dans la zone PZ, qui correspond à des chocs exceptionnels et accidentels, la courbe s'infléchit vers le haut ! Il y a raidissement progressif, ce qui a pour effet de réduire l'amplitude du mouvement. Il est à noter que du fait de l'amortissement caoutchoutique cet infléchissement dépend par ailleurs de la vitesse d'impact.

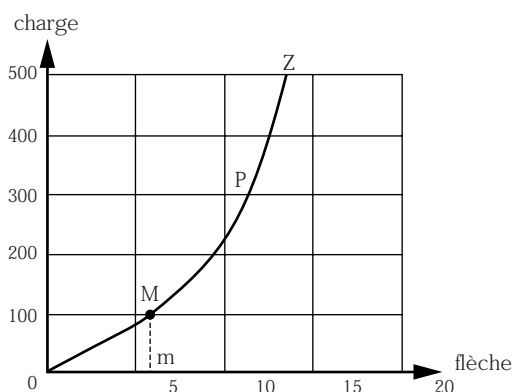


Fig. 18

IV.3.3 - Atténuation - fréquence d'excitation

A une fréquence d'excitation donnée ω , l'atténuation dépend de la fréquence propre de la suspension.

Avec la plupart des machines tournantes, la fréquence d'excitation en cycles par minute peut être prise égale au nombre de tours par minute.

Comme indiqué au § III.2.1.2. sur l'abaque fig 6, dans le cas d'une fréquence d'excitation de direction déterminée, on cherchera à obtenir la plus grande atténuation possible en tenant compte des possibilités charge/flèche des supports.

Le fait de choisir une flèche importante ne doit pas se faire au détriment de la stabilité de la suspension.

Il est conseillé de consulter les Services Techniques PAULSTRA lorsque le point d'utilisation ne se trouve pas dans la zone d'isolement vibratoire.

IV.3.4 - Rigidité statique - Rigidité dynamique - Fréquence propre

La flèche et la sous-tangente se définissent à partir de la courbe de rigidité statique de la pièce. En revanche, la fréquence propre est associée à la rigidité dynamique. Dans le cas des pièces en élastomère, les rigidités statique et dynamique peuvent différer. Le rapport de rigidité dynamique/statique dépend de l'amplitude, de la fréquence, de la charge et du type d'élastomère. Dans le catalogue, la fréquence propre est donnée à titre indicatif pour la charge nominale. Pour une charge différente, la fréquence propre peut être approchée au moyen de la formule suivante :

$$F_p (\text{Charge réelle}) = F_p (\text{Charge nominale}) \times \sqrt{\frac{\text{charge nominale}}{\text{charge réelle}}}$$

Ceci à condition que la charge réelle ne diffère pas trop de la charge nominale, c'est-à-dire que la charge réelle se trouve dans la partie linéaire de la courbe Effort/déformation (Fig. 17 et 18).

IV.4 - EXEMPLES DE CHOIX

Les supports PAULSTRA sont classés en fonction de leur caractéristique élastique.

Ainsi après avoir déterminé comme indiqué ci-dessus, le nombre et la flèche des supports, le choix se fera en tenant compte de la direction de la perturbation.

- Supports équiréquents : élasticité sensiblement identique horizontalement et verticalement.
- Supports à élasticité axiale prédominante : élasticité axiale importante - rigidité ou guidage radial.
- Supports à élasticité radiale prédominante : élasticité radiale importante tout en supportant des charges axiales.
- Supports basse fréquence : sous-tangente importante pour avoir une fréquence propre très basse (quelques Hz)

IV.4.1 - Suspension d'un ventilateur

• Caractéristiques de la machine :

- Poids : 3000 daN.
- Vitesse de rotation : 1200 tr/mn.
- Machine montée sur un châssis de 2,50 x 3 m sans points de fixation imposés.
- Centre de gravité connu.

Nombre de points de fixation : après des essais, par approche successive pour équilibrer les moments d'inertie, le nombre de points de fixation est fixé à 12.

Charge par support = $3000/12 = 250$ daN.

Fréquence propre des supports (voir abaque).

Pour une fréquence d'excitation de 1200 tr/mn, la fréquence propre maximum est de 14 Hz.

Une fréquence propre de 7 Hz permet d'obtenir une atténuation correcte de l'ordre de 85%.

Nous recherchons donc des supports ayant une fréquence propre de 7 Hz sous 250 daN. La machine étant rotative et ne présentant pas d'autres conditions particulières, il sera choisi des supports équiréquents.

Dans le guide de choix, nous trouvons un support PAULSTRADYN.

La fiche technique supports PAULSTRADYN nous indique que sous 250 daN le support PAULSTRADYN Ø 100 G3 possède les caractéristiques demandées.

• Caractéristiques de la suspension :

- 12 supports PAULSTRADYN référence 533712.

- Rapport $\frac{\text{charge réelle}}{\text{charge nominale}} = \frac{250}{260} = 0,96$

- Atténuation : 85% \cong *

- Hauteur sous charge : 32,5 mm \cong *

*valeurs obtenues sur les abaques de la fiche technique Paulstradyn.

IV.4.2 - Suspension d'un groupe moteur-thermique et asservissement fixé sur une pelleteuse hydraulique

• Caractéristique du groupe :

- Poids : 1200 daN.
- Vitesse de rotation : 1500 tr/mn.
- Centre de gravité connu.
- Nombre de points de fixation : 6.

Charge par support : $1200/6 = 200$ daN.

Flèche des supports (voir abaque).

Pour une fréquence de 1500 tr/mn, une flèche de **3 mm** permet de prévoir une atténuation d'environ 85%.

Les excitations sont à prédominance verticale et l'ensemble à besoin d'être maintenu latéralement lors des secousses provoquées par le travail de l'engin. On choisira des supports à élasticité axiale prédominante.

Dans le guide de choix des supports PAULSTRA, nous trouvons un support STABIFLEX donnant 5 mm de flèche pour 210 daN de charge. La fiche technique supports STABIFLEX nous indique qu'il s'agit d'un support STABIFLEX 530622 dureté 45 - à base carrée.

• Caractéristiques de la suspension (sous 1200 daN à 1500 tr/mn)

6 supports STABIFLEX - référence 530622 Δ 45.

- Flèche : 4,7 mm.
- Atténuation théorique : 85% soit 16 dB.

IV.4.3 - Suspension d'un crible

• Caractéristiques de la partie vibrante :

- Poids : 400 daN.
- Fréquence de vibration (horizontale) : 1200 cycles/mn ou 20 Hz.
- Centre de gravité connu.
- Nombre de points de fixation : 6.

Charge par support : $400/6 = 66$ daN.

Flèche des supports (voir abaque).

Pour une fréquence de 20 Hz, une flèche de 6 mm permet de prévoir une atténuation d'environ 70 %.

On va chercher :

- 1) des supports qui tiennent la charge verticale ;
- 2) des supports dont l'élasticité radiale est très supérieure à l'élasticité axiale (support à élasticité radiale prédominante) ;
- 3) réaliser l'isolement vibratoire dans le sens vertical (axial) ce qui, compte tenu du (2), assurera l'isolement vibratoire horizontalement.

Dans le guide des supports PAULSTRA, nous trouvons un plot cylindrique RADIAFLEX donnant une flèche de 8 mm pour une charge de 70 daN.

La fiche technique Plot RADIAFLEX nous indique qu'il s'agit d'un plot \varnothing 30 hauteur 30 mm que nous choisirons avec 2 vis de fixation (réf. 521312).

Nous vérifions également que l'élasticité radiale (cisaillement) soit bien supérieure à l'élasticité axiale (compression).

• Caractéristiques de la suspension

- 6 plots cylindriques RADIAFLEX 2 vis - référence 521312 (atténuation vibratoire théorique : 80% soit 14 dB).

IV.4.4 - Suspension d'un groupe moto-compresseur

• Caractéristiques du groupe :

- Poids : 6000 daN.
- Vitesse de rotation : 400 tr/mn.
- Centre de gravité connu.
- Nombre de points de fixation : 8.
- Charge par support : $6000/8 = 750$ daN.

• Flèche des supports :

Pour une fréquence de 400 tr/mn, la flèche minimum pour être dans la zone d'isolement vibratoire est de 12 mm. Dans le guide de choix des supports STANDARD PAULSTRA nous choisirons des supports basse fréquence qui permettent d'obtenir des flèches suffisamment importantes (26 mm).

La fiche technique des supports EVIDGOM nous indique qu'il s'agit d'un support EVIDGOM Ø 125, hauteur 140 mm 810784 qui donne 26 mm de flèche sous 800 daN.

• Caractéristiques de suspension :

- 8 supports EVIDGOM 810784 Ø 125 - hauteur 140.
- Flèche 26 mm.
- Atténuation 37% soit 4 dB.

Remarque : les supports basse fréquence étant hauts, pour certaines applications (efforts latéraux perturbateurs) il peut être nécessaire de prévoir des butées latérales.

IV.4.5 - Suspension d'un matériel accroché au plafond (faux plafond, groupe de ventilation, tuyauterie...)

- Pour de faibles charges 15 à 135 kg par pièce prévoir le montage en direct de nos supports TRAXIFLEX.

Exemple d'application :

Faux plafond - charge par point 50 kg - Fréquence excitatrice 25 Hz - Choix du support : 535 611 en dureté shore 45 - Déflexion sous charge 4 mm - Atténuation vibratoire théorique 77% soit 13 dB.

- Pour de fortes charges il peut être utilisé des supports de type PAULSTRADYN, STABIFLEX ou EVIDGOM mis en place avec un montage sécuritif.

Exemple d'application :

1. Suspension d'un groupe de ventilation - Poids 1000 daN - Fréquence 25 Hz - Montage de 4 supports PAULSTRADYN Ø 200 référence 533718.
Fréquence propre ≈ 7 Hz.
Atténuation théorique : 90% soit 20 dB.
2. Suspension d'une machine spéciale de 5 Tonnes nécessitant un bon positionnement radial - Fréquence 20 HZ - Montage de 4 supports STABIFLEX 530652 en dureté shore 60 - Déflexion sous charge 8 mm - Atténuation vibratoire théorique 84% soit 16 dB.
3. Suspension d'une citerne de 20 Tonnes se dilatant en longueur.
Fréquence excitatrice de 15 Hz - Montage de 4 supports EVIDGOM 810733 en dureté shore 60 - Déflexion sous charge de 50 mm - Atténuation vibratoire théorique 95 % soit 26 dB.

Exemples de suspensions :

