

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Thématique vibro acoustique des équipements techniques

Marie Laure COCOUAL ALHYANGE ACOUSTIQUE - 6 Cité de l'ameublement 750112 mcocoual@alhyange.com

L'objet est ici de présenter tout d'abord les contraintes réglementaires et normes en vigueur à ce jour concernant la thématique vibro acoustique des équipements techniques, puis de faire un état des lieux des problématiques rencontrées au quotidien en présentant des résultats de mesures vibratoires sur des cas concrets, avant et après travaux d'amélioration. Il s'agit d'aborder les thèmes de mises en œuvre de groupes froids sur ossature métallique en toiture de laboratoire, de l'impact vibratoire du fonctionnement de groupes électrogènes dans un site sensible tel un data center, ou encore des installations de groupes pompes en chaufferie d'immeubles....

1 Introduction

Alhyange Acoustique intervient depuis 12 ans en tant que **Conseil** des maîtres d'ouvrage, **Partenaire** Expert des maîtres d'œuvre, **Acteur** auprès des entreprises de construction. Notre intervention dans les projets se situe, de ce fait, aussi bien en phase Conception, et Construction, que durant la phase d'Exploitation des sites.

Le présent article concerne nos missions en phase d'Exploitation des sites, phase pendant laquelle les maîtres d'ouvrage, et/ou exploitants, nous font appel pour des problèmes de nuisance Bruit/Vibrations sur leurs bâtiments existants.

2 Réglementation en vigueur

Il n'existe pas de réglementation relative aux vibrations induites par les machines tournantes. Cependant il est d'usage de se baser sur la norme allemande DIN 4150 [1] [2] qui précise un ensemble de critères de vitesses vibratoires à ne pas dépasser à l'intérieur des constructions.

Thèmes abordés en matière de critères :

- **Le danger d'apparition de dégâts structurels**

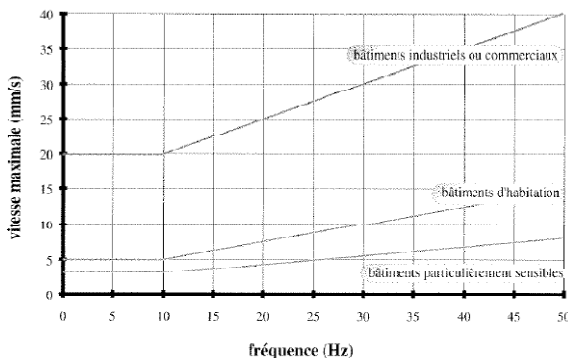
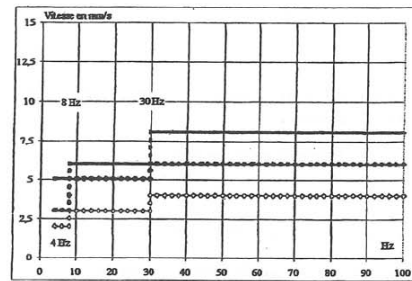


Figure 1 : Influence des vibrations sur les constructions : les seuils de dégâts – DIN 4150 (1999)

La circulaire française en date du 23 juillet 1986 relative aux vibrations émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement précise également les critères suivants :



Trait supérieur (plein) Constructions résistantes
 Trait médian (ronds pleins) Constructions sensibles
 Trait inférieur (losanges évidés) Construction très sensibles

Figure 2 : Valeur Limites de la vitesse particulière en fonction de la fréquence observée

- **La gêne ressentie due aux vibrations**

En matière de vibrations dans les constructions, la pratique des cas rencontrés révèle une majorité de problèmes liés à des vibrations de faibles amplitudes et présentant un caractère permanent (quoiqu'éventuellement intermittent), comme les vibrations générées par les différents trafics (routier, ferroviaire, tram, métro, TGV, ...). Ou encore les équipements techniques.

Par voie de conséquence et eu égard précisément à ce caractère permanent et aux faibles amplitudes de vibrations, le thème le plus important en pratique est la gêne occasionnée par les vibrations des personnes occupant les bâtiments ;

Il convient de préciser qu'à ce jour, aucun texte officiel français n'existe sur le sujet et nous nous référons encore ci-dessous à la norme allemande

Les critères de la norme allemande sont repris dans le tableau ci-dessous en mm/s :

| CLASSE | ZONE | JOUR | | | NUIT | | |
|--------|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | A ₀ | A ₅ | A _T | A ₀ | A ₅ | A _T |
| 1 | Zone exclusivement industrielle | 0.40 | 6 | 0.20 | 0.30 | 0.60 | 0.15 |
| 2 | Zone principalement industrielle | 0.30 | 6 | 0.15 | 0.20 | 0.40 | 0.10 |
| 3 | Zone mixte | 0.20 | 5 | 0.10 | 0.15 | 0.30 | 0.07 |
| 4 | Zone d'habitats | 0.15 | 3 | 0.07 | 0.10 | 0.20 | 0.05 |
| 5 | Zone protégée | 0.10 | 3 | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.05 |

Figure 3 : Valeur Limites selon la norme DIN 4150 partie 2

Les paramètres mesurés et calculés

La norme DIN 4150 a une approche en termes de dose ou de « moyenne » temporelle des vibrations (en mm/s). En ce qui concerne l'interprétation finale de conformité, la norme DIN propose les étapes suivantes :

Trois seuils sont donnés : Au, Ao, Ar en fonction du jour et de la nuit et de la nature de la zone. Par exemple pour le cas important d'un site rural habité et pour la période de jour, on a Au = 0.15, Ao = 3 et Ar = 0.07.

L'interprétation des résultats de mesure est simple :

- si l'amplitude du paramètre de base (vitesse vibratoire en mm/s) sur l'ensemble de la période n'a pas dépassé la première valeur Au, on conclut directement au respect de la norme
- si l'amplitude, sur l'ensemble de la période, a dépassé la valeur Ao, on conclut directement au non-respect de la norme ;
- si, sur l'ensemble de la période, l'amplitude est restée comprise entre Au et Ao, il faut évaluer la vibration moyenne sur l'ensemble des périodes de 30 secondes (valeur moyenne au sens énergétique) ; cette valeur moyenne doit être comparée au troisième seuil et on conclut au respect ou au non-respect de la norme selon le résultat de cette comparaison.

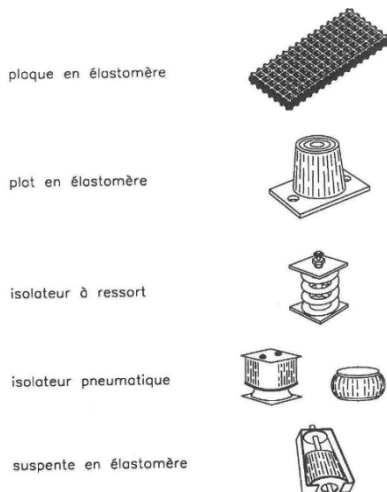
3 Equipements techniques des bâtiments et exemples de dispositifs anti-vibratiles

3.1 Equipements techniques

Les équipements rotatifs habituellement rencontrés sur les projets bâtiments sont les suivants :

- Chaudières
- Groupes frigorifiques (compresseurs et ventilateurs)
- Aéroréfrigérants
- Pompes
- Centrales de traitements d'air
- Extracteurs
- Groupes électrogènes
- Unités de climatisation, etc...

3.2 Dispositifs anti vibratiles



suspente à ressort



Figure 4 : Schéma de principe des gammes de systèmes anti-vibratiles [4]

3.3 Caractérisation des dispositifs anti vibratiles

Les paramètres nécessaires au dimensionnement du dispositif anti vibratile sont les suivants :

- a. Charge maximale autorisée [kg] :

$$C_{max} = \sum_i C_{unit_i} \times N_{t_i} \quad (1)$$

avec Cunit la charge maximale par plot [kg]

- b. Raideur totale [daN/cm]

$$K_{totale} = \sum_i K_{unit_i} \times N_{t_i} \quad (2)$$

avec Kunit la raideur par plot [daN/cm]

- c. Déflexion [mm] :

$$d = \frac{P_t}{K_t} \times 10 \quad (3)$$

avec Pt le poids total en Kg et Kt la raideur totale [daN/cm]

- d. Fréquence fondamentale ou propre du système [Hz] :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{9.81}{d \times 10^{-3}}} \text{ en Hz} \quad (4)$$

L'assise est estimée suffisamment rigide lorsque :

$$\frac{f_0}{f_{plancher}} \leq \frac{1}{10}$$

- e. Fréquence excitatrice de la machine [Hz]:

$$f_e = \frac{N_{machine}}{60} \quad (5)$$

avec N la vitesse de rotation [tr/min]

4 Démarche usuelle des Etudes vibrations

Les facteurs influençant la transmission vibratoire sont les suivants :

- vitesses de rotation des composantes de l'équipement
- le poids des équipements et leur mode de fixation
- nature de la structure support de l'équipement
- constitution de la structure du bâtiment

La transmission des vibrations via la structure support puis la structure du bâtiment peuvent se traduire par la génération d'un niveau de bruit par le rayonnement de la

structure, mais aussi par la mise en résonance des structures.

Il est nécessaire de caractériser avant tout la « signature vibratoire » de l'équipement, puis de quantifier sa résultante au niveau de la structure porteuse.

Une étude doit être menée pour chaque type de structure support.

A partir de la mesure des vitesses vibratoires induites par un équipement, le niveau de pression acoustique rayonné par les parois d'un local peut être estimé par :

$$L_p = L_v + \Delta L + 10\log(\sigma) + 10\log(4.S.Tr / 0,16.V) \quad (6) \text{ en dB}$$

Avec :

- L_p : Niveau de pression acoustique en dB référence 2.10⁻⁵ Pascal,
- L_v : Niveau de vitesse vibratoire en dB référence 5.10⁻⁸ m/s,
- ΔL : Atténuation du matériau résiliant,
- σ : Coefficient de rayonnement des parois,
- Tr : durée de réverbération du local en secondes,
- V : Volume du local en m³,
- S : somme des surfaces rayonnantes en m².

Le calcul est effectué pour chaque bande de tiers d'octave.

Ce calcul étant fortement soumis à des hypothèses de mise en œuvre et à des abaques de coefficients de rayonnement de parois (limités), il est communément admis de figer un taux de filtration minimum des plots (95 %) ainsi qu'une rigidité du support bien supérieure à celle des système anti-vibratiles afin d'éviter tout rayonnement des parois.

5 Quelques cas concrets de niveaux de vibrations mesurés en bâtiments [4]

5.1 Pompes en chaufferie d'un immeuble de bureaux



Figure 5 : Pompes chaufferie – Fixations rigides

a. Contexte

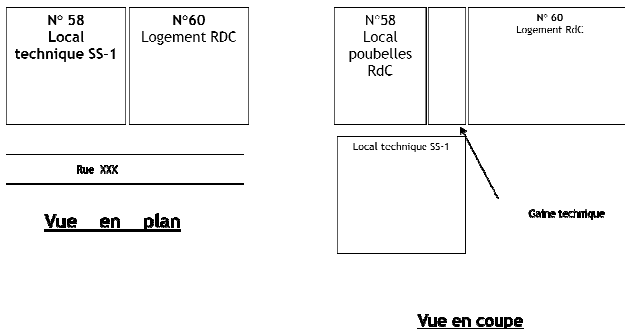


Figure 6 : Schéma de principe - Localisation des locaux

b. Diagnostic Bruit de voisinage

Une campagne de mesures a d'abord été réalisée selon la réglementation des bruits de voisinage [5] pour quantifier les critères réglementaires et dépassements de seuil objet de la gêne.

| Point de mesure | Niveau sonore résiduel, équipements à l'arrêt en dB(A) | Niveau sonore ambiant, équipements en fonctionnement en dB(A) | Critère d'émergence à respecter en dB(A) | Emergence mesurée en dB(A) | Conformité |
|------------------------------------|--|---|--|----------------------------|------------|
| Centre du Séjour du logement (RdC) | 31.0 | 41.5 | 3.0 | 10.5 | NON |

Figure 7 : Tableau récapitulatif de l'émergence globale

| Niveaux sonores mesurés en dB | Bandes d'octave en Hz | | | | | |
|----------------------------------|-----------------------|------|------|------|------|------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Niveau sonore résiduel | 38.5 | 33.0 | 28.5 | 21.5 | 19.5 | 12.5 |
| Niveau sonore ambiant | 55.0 | 45.5 | 30.0 | 22.0 | 19.0 | 12.0 |
| Emergences mesurées | 16.5 | 12.5 | 1.5 | 0.5 | - | - |
| Critère d'émergences à respecter | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Conformité | NON | NON | OUI | OUI | OUI | OUI |

Figure8 :Tableau récapitulatif des émergences spectrales

c. Niveaux de vitesse vibratoires dans le logement avant travaux

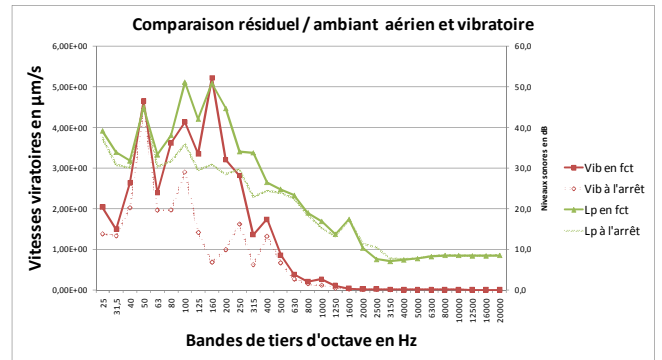


Figure 9 : Spectres vibrations et bruit aérien dans le logement

L'impact acoustique/vibratoire présenté ici est le niveau ambiant mesuré Equipement en fonctionnement auquel est soustrait le niveau mesuré Equipement à l'arrêt, afin de s'affranchir du bruit de fond.

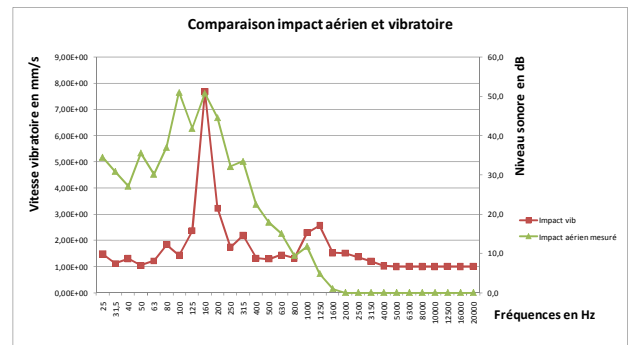


Figure 10 : Spectres vibrations et aérien dans le logement corrigés aux bruits aériens et vibratoires de fond

L'impact vibratoire ciblé sur 160 Hz, lié à la vitesse de rotation de la pompe, génère un rayonnement de la structure

sur une très large bande de fréquences (25 – 1000 Hz ici)
Solutions techniques retenues

1ère étape :

- Ouverture de la gaine technique pour vérification des modes de fixation des canalisations et la paroi sur laquelle elles sont fixées
- Mise en place de plots anti-vibratiles à ressorts sous les pompes.
- Mise en place de manchons souples entre les pompes (équipements vibrants) et les canalisations de type DILATOFLEX ou équivalent
- Reprise des traversées de parois des canalisations avec interposition de fourreaux résilients ARMAFLEX ou équivalent

2ème étape

- Mise en place de colliers résilients sur les fixations de l'ensemble des canalisations issues des pompes qui sont fixées dans la gaine
- Mise en place (et / ou remplacement) de suspentes antivibratiles au plancher haut du LT sur l'ensemble des canalisations en provenance des pompes.

d. Mesures de réception après travaux de l'étape 1 :

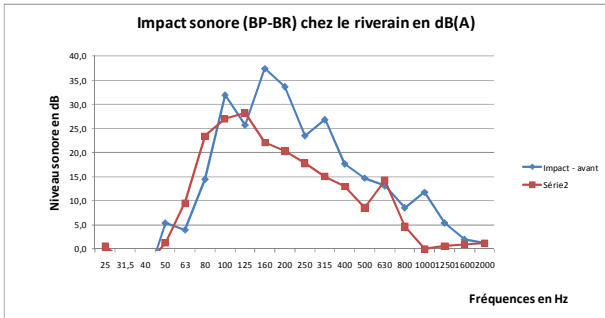


Figure 11 : Spectres bruit aérien dans le logement avant et après travaux de l'étape 1

| APRÈS 1 ^{ère} PHASE | Équipements en fonctionnement | Niveaux sonores par bandes d'octave - en dB | | | | | | Niveau sonore Global en dB(A) |
|---------------------------------|---|---|--------|--------|---------|---------|---------|-------------------------------|
| | | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | |
| Bruit ambiant | Pompes (*) | 49,0 | 36,0 | 24,0 | 16,0 | 11,5 | 11,5 | 33,5 |
| Bruit résiduel | Equipements à l'arrêt | 39,0 | 32,5 | 21,0 | 16,0 | 13,5 | 11,5 | 27,5 |
| Émergences calculées | L _{aeq} (Bruit ambiant) L _{aeq} (Bruit résiduel) | 10,0 | 3,5 | 3,0 | - | - | - | 6,0 |
| Émergences maximales autorisées | | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3,0 |
| Conformité | Pompes (*) | NON | OUI | OUI | OUI | OUI | OUI | NON |

Figure 12 : Tableau récapitulatif des émergences spectrales correspondant

Le riverain a constaté une nette amélioration et considère que la gêne est fortement diminuée à l'issue de cette 1ère phase de travaux (gain de 8dB(A) au global). Cependant, malgré ces gains importants, les seuils maximums réglementaires sont dépassés impliquant les travaux décrits dans la 2ème étape.

5.2 Exemple des transmissions vibratoires d'un ascenseur neuf sur site en réhabilitation

a. Contexte

En raison de l'implantation d'une cage ascenseur contiguë à un bâtiment de logements, une campagne de mesures vibratoires a été demandée pour vérifier le respect de la quiétude du voisinage, l'ascensoriste ne fournissant pas les caractéristiques techniques des machineries et des systèmes anti-vibratiles mis en œuvre. Le mur mitoyen est

en pierre de 30 à 40 cm d'épaisseur, les dalles du projet sont des dalles alvéolées de 13+5 cm. Enfin la cage ascenseur est en béton et parpaings pleins perforés selon les zones

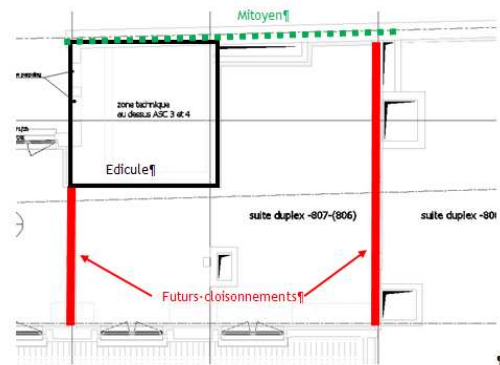


Figure 13 : Vue en plan de l'implantation de la cage ascenseur



Figure 14 : Supportage de la machinerie sur patin acoustique



Figure 15 : Vue sur la machinerie en cages ascenseur

b. Diagnostic vibratoire

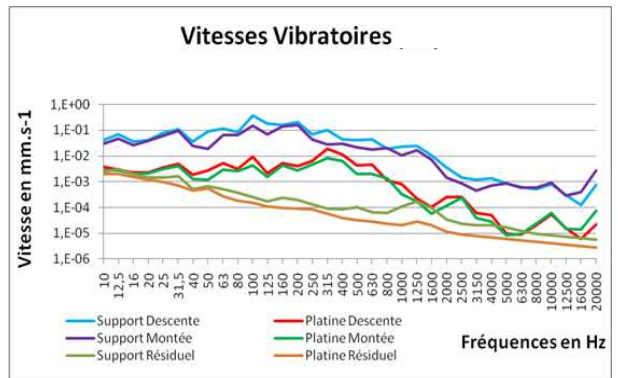


Figure 16 : Comparaison des vitesses vibratoires mesurées sur support machinerie et Platine sous résilient

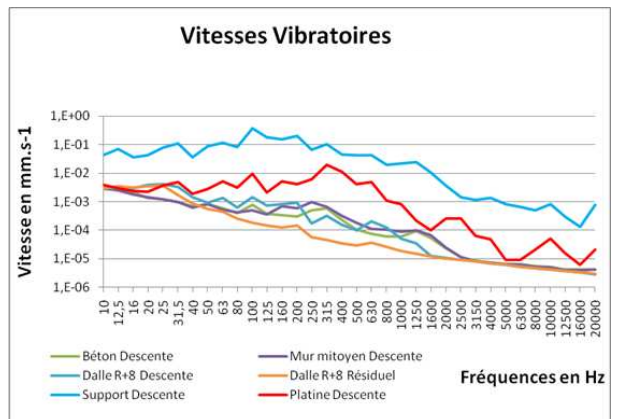


Figure 17 : Comparaison des vitesses vibratoires mesurées sur support machinerie, dalles et murs mitoyens

Les mesures ont mis en avant des vitesses vibratoires inférieures à 0.01 mm/s sur les dalles du projet et sur le mur mitoyen, soit des vitesses vibratoires non perceptibles.

5.3 Exemple des transmissions vibratoires d'un groupe électrogène vers les salles informatiques d'un DATA Center

a. Contexte

Un Bâtiment DATA Center, structure béton, dispose d'un local Groupe électrogène contigu à une salle de baies informatiques. Afin de limiter les coûts de mise en œuvre, la dalle du Local Groupe Electrogène (GE) n'a pas été dissociée des autres locaux. Il a été demandé, en phase chantier, de vérifier le respect des critères de vibrations fixés pour le bon fonctionnement des unités informatiques. Une campagne de mesures a donc été réalisée.

b. Critères

Vibrations maximales supportées par un disque dur de la marque Seagate :

- 0.5g entre 5 et 500 Hz en fonctionnement –
- 5g entre 22et350Hz à l'arrêt

Soit, avec accélérations $1g = 9.81m/s^2$ et $V = \frac{a}{2\pi f}$

- 7.8 mm/s à 100 Hz –
- 0.6 mm/s à 630 Hertz)



Figure 18 : Salles des baies informatiques

a. Diagnostic vibratoire

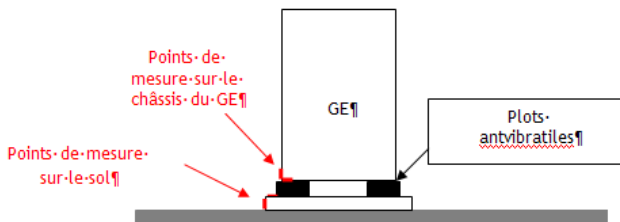


Figure 19 : Principe de pose du Groupe Electrogène (GE) sur plots à ressorts – Points de mesures

| Configuration de fonctionnement | localisation | Point de mesures | Vitesse moyenne mesurée (mm/s) |
|---------------------------------|--------------|------------------|--------------------------------|
| GE à l'arrêt | Sol | Vertical | 0.002 |
| | | Horizontal | 0.002 |
| 3 GE à 100% | Châssis GE | Vertical | 10.651 |
| | | Horizontal | 22.332 |
| | Sol | Vertical | 0.096 |
| | | Horizontal | 1.626 |

Figure 20 : Résultats des mesures dans le Local GE

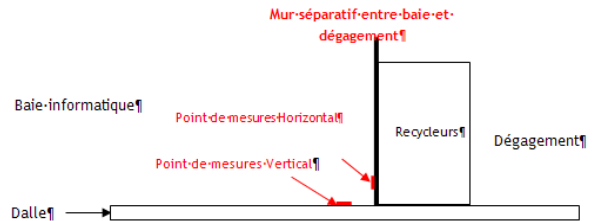


Figure 21 : Localisation points de mesure dans la salle des baies informatiques

| Configuration de fonctionnement | Point de mesures | Vitesse moyenne mesurée (mm/s) |
|------------------------------------|------------------|--------------------------------|
| Recycleurs Vitesse 1 + 3 GE | Vertical | 0.003 |
| | Horizontal | 0.003 |
| Recycleurs Vitesse 1 + 3 GE + 1 GF | Vertical | 0.003 |
| | Horizontal | 0.003 |
| Recycleurs Vitesse 2 + 3 GE + 1 GF | Vertical | 0.004 |
| | Horizontal | 0.004 |
| Recycleurs Vitesse 2 + 1 GF | Vertical | 0.003 |
| | Horizontal | 0.004 |
| Recycleurs Vitesse 1 + 1 GF | Vertical | 0.003 |
| | Horizontal | 0.003 |

Figure 22 : Résultats des mesures dans la salle informatique en global

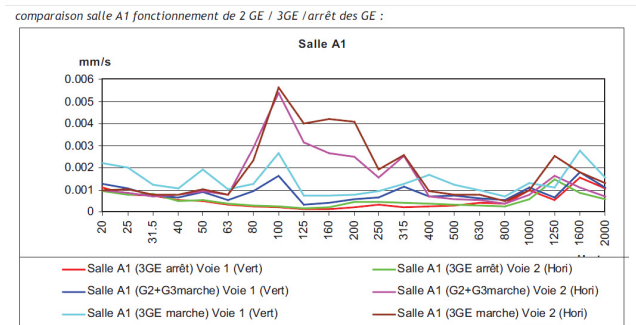


Figure 23 : Résultats des mesures dans la salle informatique en bandes de fréquences

Les mesures sur support des baies informatiques sont très inférieures aux critères demandés par les fabricants d'équipement informatiques.

5.4 Exemple des transmissions vibratoires d'un ensemble de groupes froids en terrasse vers les zones de laboratoires du niveau inférieur

a. Contexte

En raison des pertes de charges disponibles limitées pour les groupes frigorifiques, et des contraintes de maintenance en sous face, les équipements choisis par

L'entreprise doivent être implantés à 1m80 de hauteur. Des longrines béton ont ainsi été mises en œuvre pour supporter une ossature métallique en support de chacun des futurs équipements



Figure 24 : Longrines à 1m80 de hauteur pour accueillir l'ossature métallique support des groupes froids

b. Etude vibratoire prévisionnelle basée sur un objectif de taux de filtration minimal

| AFFECTATION : groupe froid RTAC 300 LN | | | | | | |
|---|----------------|------------------------------|--|--------------------------------|------------|------------|
| | | | | Dimensions de dalle ou machine | | |
| | | Longueur | Largeur | Hauteur | | |
| | | 10057 | 2250 | 2570 | | |
| | | Nombre de plots rhéologique: | | | | |
| | | 5 | 2 | 10 | | |
| Poids de la machine : | 10336 | daN | | | | |
| Vitesse de rotation : | 730 | tr/min | | | | |
| Poids de la dalle béton : | 0 | daN | | | | |
| Poids total : | 10336 | daN | | | | |
| Localization | Référence plot | Raideur unit. | Qté | Ht libre | Charge man | Hauteur |
| Masse | | (daN/cm) | | | Unitaire | s/s Charge |
| 1065 | 4M 1400-27 | 467 | 1 | 124 | 1400 | 101 |
| 1022 | 4M 1400-27 | 467 | 1 | 124 | 1400 | 102 |
| 1088 | 4M 1400-27 | 467 | 1 | 124 | 1400 | 101 |
| 1044 | 4M 1400-27 | 467 | 1 | 124 | 1400 | 102 |
| 1110 | 4M 1400-27 | 467 | 1 | 124 | 1400 | 100 |
| 1067 | 4M 1400-27 | 467 | 1 | 124 | 1400 | 101 |
| 1133 | 4M 1400-27 | 467 | 1 | 124 | 1400 | 100 |
| 817 | 3M 1050-27 | 350 | 1 | 124 | 1050 | 101 |
| 1156 | 4M 1400-27 | 467 | 1 | 124 | 1400 | 99 |
| 834 | 3M 1050-27 | 350 | 1 | 124 | 1050 | 100 |
| Hauteur sous charge moyenne des plots : 100mm | | | | | | |
| Charge max autorisée : | 13300 | daN | | | | |
| Raideur verticale totale : | 4436 | daN/cm | Raideur totale des plots : 4500 daN/cm (arrondi) | | | |
| Déflexion : | 23 | mm | | | | |
| Hauteur sous charge : | 101 | mm | | | | |
| Fréquence fondamentale : | 3.3 | Hz | | | | |
| Fréquence excitatrice : | 12.2 | Hz | | | | |
| Filtrage vibratoire : | 92 | % | Objectifs : 95% | | | |
| Département Ingénierie Vibratoire - Filtration - Bruits Solidiens | | | | | | |

Nota : le taux de filtrage vibratoire dépendant de la vitesse de rotation des groupes. Pour une vitesse de rotation de 730Tr /min, on ne pourra dépasser 92 % de filtrage.

Figure 25 : Note de calcul de détermination des systèmes anti vibratiles en fonction des répartitions de poids des groupes frigorifiques

La raideur de la structure métallique, supportant les groupes frigorifiques (GF), imposée, est dix fois supérieure à celle des plots anti vibratiles (sous les GF) pour assurer l'efficacité des plots. Pour deux types de plots différents, Les critères de l'ossature métallique Support des Groupe froids et le taux de filtration en découlant étaient les suivants :

| Raideur totale estimée pour les plots sélectionnés | Raideur châssis support groupes nécessaire | Taux de filtration vibratoire calculé |
|--|--|---------------------------------------|
| Plots néoprène constructeur | 140 000 daN/cm | 72 % (*) |
| Plots antivibratiles à ressorts 4 500 daN/cm | 45 000 daN/cm | 92 % |

Il a donc été imposé à l'entreprise la mise en œuvre de plots à ressorts. Les critères de rigidité de l'ossature métallique support a été par ailleurs validée par le bureau d'étude structure du projet.

6 Conclusion

Le cas de la chaufferie présenté en premier lieu reflète les trop nombreux cas pour lesquels la thématique acoustique/vibrations n'est pas prise en compte en phase conception des projets. Ces situations mènent régulièrement à des travaux importants que nous essayons de hiérarchiser pour limiter les coûts de travaux. Une conséquence du manque de réglementation en vibrations ? Non, dans la plupart des cas, puisque la majorité des transmissions vibratoires sont génératrices de bruits aériens rayonnés par les parois gênants pour le voisinage, et des réglementations existent en la matière pour traiter les sujets. Quelques cas spécifiques apparaissent cependant pour les équipements très sensibles type systèmes de mesures des laboratoires ou baies informatiques où les vibrations transmises peuvent conduire à de grands dysfonctionnements de l'activité propre des sites. Enfin, peu d'informations techniques sont disponibles à ce jour sur les niveaux de vibrations générés par les divers équipements (types ascenseurs, etc...), Ces éléments permettraient dès la phase conception de prévoir plus précisément les solutions acoustiques à mettre en œuvre.

7 Références

- [1] Norme Allemande DIN 4150 (1999)
- [2] Bulletin CRR 1/2001 (Centre de recherche routière – Belgique)
- [3] Circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations émise dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement
- [4] Bruit des équipements Collection AICVF 1997.
- [5] Arrêté du 31/08/2006 relatif à la lutte contre les bruits de voisinage
- [6] Campagnes de mesures réalisées par Alhyange acoustique sur projets internes