

A chaque profession ses sources de bruit : Comment les traiter

Jean-François Lalanne,
D. Richard,
R. Tyack,
Société S.A.I.,
38, rue de Wissous,
91320 Wissous,
Tél. : 01 69 30 90 10,
Fax : 01 69 30 89 21

La première démarche consiste à répertorier et analyser les sources de bruit.

A partir d'un environnement existant, débute alors la réflexion de l'acousticien :

Pour un objectif final imposé par l'environnement ou par un cahier des charges, quelles sont les sources à traiter et de quels moyens dispose-t-on pour y parvenir ?

L'objectif étant précisé, les vraies difficultés commencent, et nous allons essayer de dresser une liste non exhaustive des moyens dont dispose l'acousticien pour réduire les bruits en milieu industriel.

Schématiquement, tout problème de prévention des émissions du bruit passe par l'identification d'un système à trois variables :

- la source ou l'émetteur,
- la voie de transmission ou le chemin de transfert,
- le récepteur ou le point de réception.

La source

La source est la partie du système d'où émane l'énergie vibratoire et acoustique. Dans la plupart des cas, on distingue deux modes de génération du bruit :

- Les bruits de choc engendrés par les vibrations des corps solides :
 - par choc,
 - par frottement,
 - par forces alternatives (le courant alternatif provoque un changement de polarité qui crée des déformations alternatives de carcasse et enroulement).

- Les bruits d'origine aérodynamique résultant des mouvements de gaz, de vapeur ou de liquides, de la turbulence d'un écoulement, ou de la détente de gaz ou de vapeur.

Les bruits de choc se retrouvent dans les moteurs électriques, les presses, les marteaux pilons, les emboutisseuses... Les bruits d'origine aérodynamique sont générés par les ventilateurs, les compresseurs, les surpresseurs, les pompes, la distribution d'air comprimé...

L'identification de la source se révèle quelquefois très ardue du fait de la complexité des machines.

Prenons pour exemple le cas d'un ventilateur entraîné par un moteur. On y décèle des bruits dont l'origine peut être :

- l'aspiration,
- le refoulement,
- la carcasse ventilateur,
- la carcasse moteur,
- la turbine de refroidissement moteur,
- le châssis recevant l'ensemble,
- les paliers.

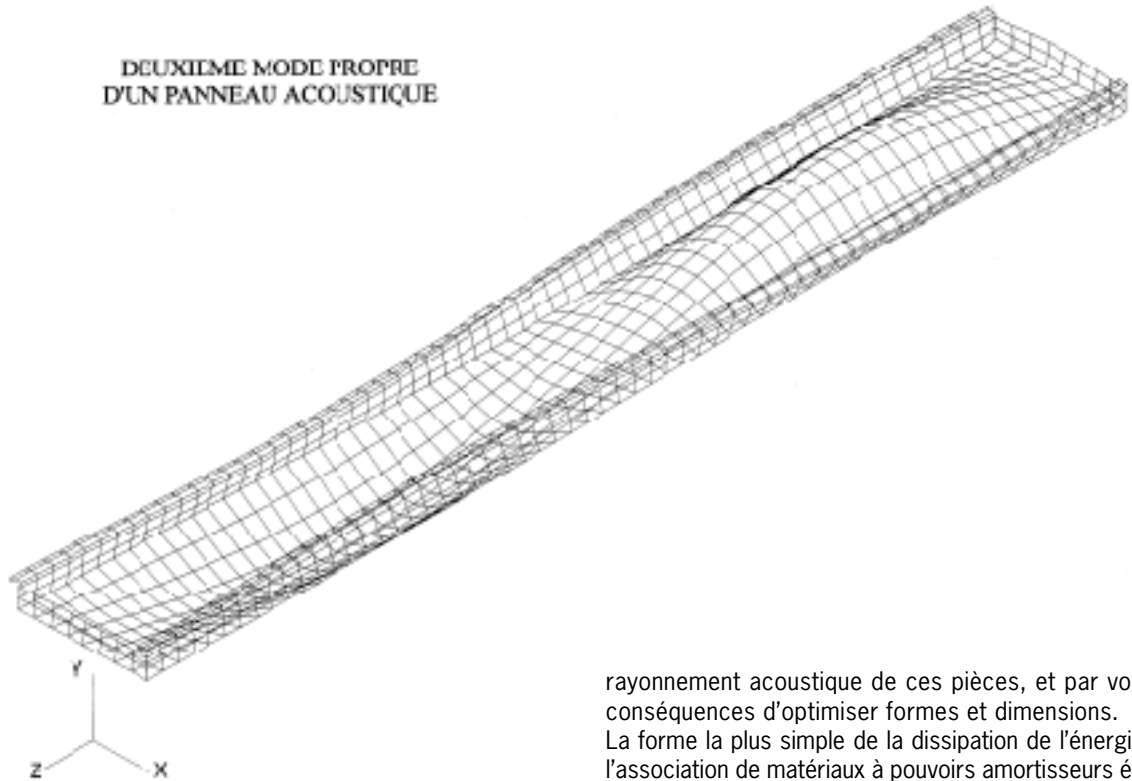
Quelquefois, seul l'un de ces bruits va être prépondérant par rapport aux autres. On voit l'importance de bien évaluer l'origine de la source de bruit.

Moyens pour agir sur la source

On peut :

- Investir dans la source la plus silencieuse dans sa catégorie ;
- Réduire l'amplitude des forces engendrées :
 - réduire les impacts ou les impulsions,
 - équilibrer les pièces en mouvement,
 - réduire les frottements par lubrification ou par alignement des paliers,
 - utiliser un absorbeur dynamique ;
- Réduire le rayonnement de la machine
 - en modifiant les fréquences propres,
 - en augmentant la dissipation d'énergie (par amortissement),
 - en changeant l'épaisseur, en désolidarisant,
 - en modifiant les dimensions de l'enveloppe,
 - en changeant la directivité,
 - en utilisant des matériaux à facteurs de perte élevés ;
- Moduler les heures de fonctionnement
- réduire ou éliminer le fonctionnement de nuit.

Pour illustrer notre propos, reprenons le cas du ventilateur employé dans le contexte aéroréfrigérant. Il est fréquent de voir des ventilateurs dont les pales sont embouties à partir de tôles planes, puis serties sur une collerette. En revanche dans une même configuration industrielle, l'adoption d'une turbine à ailettes profilées pour des conditions de fonctionnement identiques apporte une amélioration de 10 à 15 dB(A).

DEUXIEME MODE PROPRE
D'UN PANNEAU ACOUSTIQUE

La réduction de la vitesse des impacts s'illustre dans le problème de choix d'une presse : l'énergie acoustique est dépendante du facteur MV^2 .

Pour une énergie équivalente (MV^2 constant), on peut jouer sur la masse ou sur la vitesse. Une vitesse élevée engendre des impacts et des niveaux sonores importants, à vitesse plus faible mais avec une masse plus importante (presse hydraulique), le niveau sonore peut être réduit de 15 à 20 dB(A).

L'équilibre des pièces en mouvement se justifie par la différence observée sur une machine tournante, chargée ou non en poussière ou en saleté.

La réduction du rayonnement est un des paramètres sur lequel les constructeurs et les concepteurs devraient se pencher plus sérieusement. Après avoir optimisé le processus technologique de la machine, il faudrait sélectionner les matériaux les plus appropriés pour les pièces en mouvement ou recevant les impacts (des matériaux de type "polyéthylène" sont couramment utilisés sur des lignes d'embouteillage : leur élasticité procure un amortissement important).

Pour éviter une coïncidence fâcheuse entre les fréquences du spectre de fonctionnement de la machine et les fréquences propres de l'accessoire (fréquences propres ou naturelles sur lesquelles va vibrer l'accessoire soumis à une sollicitation dynamique), il peut être nécessaire de modifier les fréquences propres du châssis et du carter par des renforts ou des changements de formes et dimensions. Il est bon de signaler à l'attention des concepteurs que de nouveaux logiciels de calculs par éléments finis permettent par le couplage fluide-structure d'évaluer le

rayonnement acoustique de ces pièces, et par voie de conséquences d'optimiser formes et dimensions.

La forme la plus simple de la dissipation de l'énergie est l'association de matériaux à pouvoirs amortisseurs élevés (visco-élastique, plomb...) avec les tôles d'acier jusqu'à 3 mm d'épaisseur. Les gains apportés sont de l'ordre de 3 à 10 dB(A).

La directivité, en terme d'ingénierie, désigne la représentation visuelle de la taille, de la forme et de l'orientation de la surface radiante d'une source.

Sa connaissance précise facilite les prévisions acoustiques et permet, à l'occasion, de modifier l'orientation des sources de telle sorte que la partie la plus bruyante ne soit pas orientée vers la zone sensible de perception du bruit.

Ainsi dans l'exemple d'une mise à l'atmosphère d'un fluide en pression, le fait d'orienter le jet à la verticale permet de réduire le traitement d'environ 10 dB par rapport à un écoulement horizontal.

Le chemin de transfert

Le bruit et les vibrations requièrent un support ou un médium pour se propager, qu'il soit liquide, solide ou gazeux.

Le chemin de transfert est la voie par laquelle l'énergie acoustique parvient au point d'écoute. Le **domaine industriel** est principalement concerné par la transmission aérienne et par la transmission solidienne. La transmission aérienne concerne les ondes sonores allant d'un point à un autre en empruntant l'air comme support. La transmission solidienne s'applique à l'énergie vibratoire voyageant dans les structures en dur du type métallique ou béton armé.

Au même titre qu'il est malaisé d'identifier avec exactitude toutes les sources de bruit d'une installation, la reconnaissance de tous les chemins de transfert n'est pas chose

facile. Une installation dont le critère final de bruit n'a pas été atteint, pêche souvent par une mauvaise évaluation d'un chemin de transfert.

L'exemple type est celui d'une paroi d'isolation théorique donnée, dont la performance est réduite par la présence d'énergie vibratoire mal filtrée, et restituée sous forme de bruit.

Moyens pour agir sur le chemin de transfert

- Augmentation de la distance,
- Modification du cheminement par écran,
- Implantation de la source dans un bâtiment,
- Isolation :
 - construction en dur,
 - encoffrement acoustique,
 - Absorption, revêtement de paroi,
 - Coupure élastique,
 - manchette souple,
 - plot antivibratile,
 - joint souple,
 - dalle flottante,
 - Silencieux réactifs et dissipatifs,
 - Résonateur,
 - Revêtement intérieur de :
 - gaine de ventilation,
 - chambre de détente,
 - Matériau amortisseur,
 - Désaccord d'impédance.

Pour une source de dimension normale, l'énergie décroît comme l'inverse du carré de la distance. Dans une étude à priori, il est utile d'éloigner les sources de bruit du point d'écoute en accentuant les distances les séparant. Ce procédé est surtout applicable pour une situation en extérieur

L'installation d'un écran sur le trajet des ondes sonores est une solution qu'il faut manier avec de grandes précautions : dans un atelier réverbérant, on ne peut guère espérer mieux que 2 à 3 dB(A). En revanche en extérieur, un écran placé judicieusement par rapport à la hauteur de la source permet des gains courants de 8 à 12 dB(A).

Dès lors que la source sélectionnée a atteint son degré d'isolation optimum par les moyens cités ci-dessus, s'impose alors la solution de dernier recours : l'installation de la source dans un bâtiment du type construction en dur ou encoffrement. Ceci nous amène à introduire la notion d'isolation que l'on confond bien souvent avec l'absorption.

L'isolation représente la qualité d'un matériau à résister à la transmission du son : c'est la réduction d'énergie sonore obtenue par un matériau (paroi) séparant deux espaces. Le terme indice d'affaiblissement acoustique représente une valeur normalisée qui s'applique aux parois et qui rend compte de l'aptitude inhérente de ces parois de résister à la transmission du son.

Le degré d'isolation d'une paroi est gouverné par des paramètres tels que :

- la masse,
- l'homogénéité et l'uniformité,
- la raideur,
- les discontinuités,
- le facteur de rayonnement, etc.

A titre d'information, signalons les valeurs d'isolation moyenne de quelques matériaux courants dans les épaisseurs usuelles :

Contre plaqué 6 mm	17 dB
Tôle 15/10 mm	25 dB
Feuille de plomb 100 mm	32 dB
Parpaing plein 100 mm	42 dB
Béton armé 200 mm	52 dB

Pour assurer la performance des panneaux, il est nécessaire de les désolidariser des sources d'excitation dans le but de minimiser la transmission des vibrations en provenance de la machine vers ces panneaux, qui restituent les vibrations sous forme de bruit.

La réalisation d'une bonne désolidarisation nécessite l'emploi de joints souples travaillant à la compression et au cisaillement tenant à la température, aux U.V., à la pression ou dépression.



Le système de fixation (boulons, crapauds...) altère peu ou prou l'efficacité de la désolidarisation, il y a donc lieu d'utiliser un système respectant le principe d'une bonne coupure élastique.

Le manque d'isolation d'une paroi composite constituée avec une tôle d'acier associée avec un matériau absorbant trouve souvent son origine dans la présence de vibrations résiduelles indésirables qui ne peuvent être filtrées. C'est pourquoi l'adjonction d'un matériau amortisseur collé sur la tôle d'acier réduit les vibrations de la paroi et augmente sa masse, donc sa performance.

- **L'absorption acoustique** relève d'un concept différent, et n'agit pas directement sur la transmission. Elle représente la quantité d'énergie dissipée sous forme de chaleur par un matériau par opposition à celle qui est réfléchiée.

Les matériaux absorbants les plus performants actuellement disponibles sur le marché sont à base de fibres minérales, laine de verre et laine de roche. A un degré moindre, les mousses de polyuréthane à cellules ouvertes s'imposent dans certaines applications, notamment l'industrie alimentaire où le produit doit supporter l'épreuve du lavage.

Pour mieux cristalliser cette dualité entre absorption et isolation, comparons les performances de deux matériaux courants :

Un matelas de laine de roche de 20 mm d'épaisseur, et un panneau de bois étanche d'épaisseur 20 mm.

	Isolation	Absorption
Matelas 20 mm	3 dB	70 %
Panneau 20 mm	30 dB	3 %

L'application de matériaux absorbants en plafond, soit en baffles suspendus, soit en faux plafond, et sur les parois verticales s'avère être une solution intéressante dans de nombreux cas. Toutefois, il y a lieu d'être prudent sur l'amélioration d'un tel traitement : elle se situe généralement entre 3 et 9 dB(A), à quelques exceptions près.

Pour le traitement de paroi, il peut être intéressant d'utiliser la technique du résonateur. Ce dernier est constitué par un ou plusieurs volumes intégrés dans une paroi et communiquant avec le milieu par l'intermédiaire de petites ouvertures. Le volume d'air enfermé dans le col exerce une action de piston sur le volume de la cavité, ce qui a pour effet de transformer en chaleur une partie de l'énergie acoustique. Cette technique permet une absorption dans les gammes de fréquences plus basses.

Une application courante en milieu industriel concerne l'encoffrement acoustique qui associe les deux principes. Sa définition et son efficacité dépendent de nombreux paramètres :

- dimension de la source,
- directivité de la source,
- volume de l'encoffrement,
- isolation des parois,

- absorption des parois,
- ouvertures et passages de gaines, tuyauteries, canalisations et câbles électriques,
- oculi, hublots, parois vitrées,
- portes,
- dimension des parois donc nombre de joints,
- ventilation naturelle ou forcée,
- sollicitation dynamique des parois par les vibrations de la source encoffrée ou d'une source annexe,
- présence de sources annexes non encoffrées,
- isolation aux vibrations,
- position lorsqu'il est placé dans un atelier réverbérant.

La détermination du degré d'isolation s'opère à partir des données constructeurs ou de mesures in situ, à savoir :

- soit le niveau de puissance acoustique en dB(A) ou en bande d'octave,
- soit le niveau de pression acoustique à 1 m, ou 3 m, ou sur contour.

L'appréciation de l'efficacité des encoffrements peut se faire en fonction de trois principes différents :

- "Réduction du bruit" (Noise reduction) qui est la différence entre le niveau de pression acoustique à l'intérieur de l'encoffrement et celui au point d'écoute extérieur,
- "Indice d'affaiblissement acoustique" (Transmission Loss) qui est le rapport entre puissance acoustique transmise à travers l'encoffrement et la puissance acoustique émise par la source de bruit,
- "Différence par insertion" (Insertion Loss) qui représente la différence de niveau de pression acoustique avec ou sans encoffrement aux mêmes points de mesures.

La troisième définition, dans une étude a posteriori, nous semble répondre le mieux aux exigences de l'utilisateur, en lui donnant un moyen de contrôle incontesté.

En revanche, la seconde se révèle plus appropriée dans une étude a priori où toutes les précautions ont été prises en compte.

Passons en revue tous les facteurs qui entrent en jeu dans une opération d'isolation de groupe électrogène destiné à la cogénération.

- Définition de la charpente devant intégrer les paramètres suivants :
 - tenue aux vents, à la neige, aux poids morts, aux surcharges dues à une poutre roulante,
 - tenue au séisme.
- De nombreux programmes de calculs par éléments finis assurent ce genre d'opération.
- Définition des panneaux suivant les caractéristiques acoustiques des machines fournies par le constructeur :
 - niveau de puissance acoustique de chaque source,
 - niveau de pression acoustique à garantir à 1 m des parois.

- Définition des portes avec système d'ouverture antipanique optimisant la compression des joints.

En effet, il faut noter que des essais de compression de joints sur une porte donnant une isolation de 40 dB(A) ont fait apparaître une perte d'isolation de 15 dB(A) lorsque le joint de la porte n'était comprimé qu'à 20 % de sa charge nominale.

- Définition du système de ventilation pour l'évacuation des calories avec niveau de puissance acoustique à garantir à chaque bouche.
- Il n'est pas inutile de rappeler l'importance d'une ventilation appropriée pour le bon fonctionnement de la machine (débit nécessaire pour évacuer les calories, perte de charge acceptable, positionnement des bouches d'entrée et de sortie d'air permettant d'assurer un bon balayage...).

Toutes les entrées d'air froid, et les sorties d'air chaud sont traitées à l'aide de silencieux dissipatifs.

Les silencieux

L'énergie acoustique est dissipée par friction dans les matériaux absorbants. La caractéristique essentielle des silencieux de ce genre est qu'ils assurent une atténuation à large bande. On les trouve sous deux formes : rectangulaires ou circulaires.

Les facteurs de conception qui influencent performances et prix sont :

- la longueur,
- la largeur de la voie d'air,
- l'épaisseur et la capacité d'absorption du matériau absorbant,
- la protection mécanique du matériau absorbant.

En plus de ces éléments de base viennent se rajouter de nombreux paramètres :

- perte de charge disponible et vitesse de passage,
- fluide véhiculé et température,
- pression intérieure en fonctionnement (notamment pour les compresseurs à vis),
- niveau sonore à garantir à la sortie ou à l'entrée.

Lorsque le niveau sonore à garantir est faible, il est impératif de vérifier que la vitesse de passage dans les voies d'air n'engendre pas une régénération de bruit supérieure à la valeur à garantir.

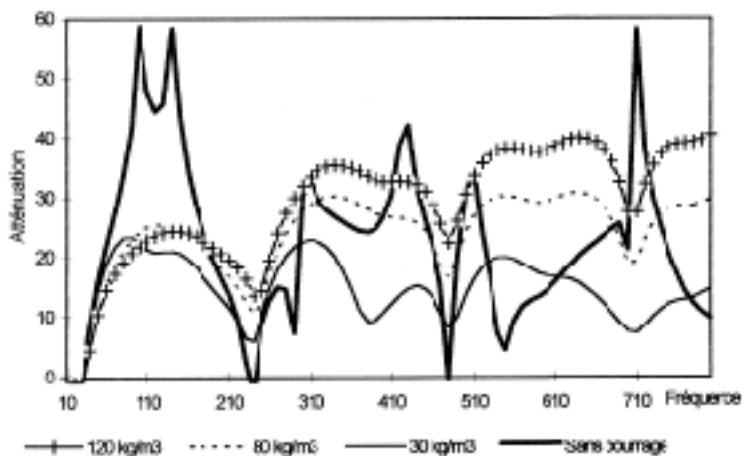
Ainsi, il est impossible de garantir un niveau de pression acoustique de 85 dB(A) à 1 m de la bouche de refoulement d'un silencieux, dont la vitesse de passage dans les voies d'air est de 40 m/s.

D'une manière générale, sous réserve de ce qui précède, plus la perte de charge disponible est importante, plus petite sera la dimension du silencieux.

La perte de charge occasionnée par la présence de ces silencieux est souvent compensée par des ventilateurs de type centrifuge ou hélicoïde selon la pression à fournir. Ces ventilateurs sont sources de bruit et de vibrations qu'il faut isoler et filtrer, en les désolidarisant à l'aide de plots élastiques, et de manchettes souples amont et aval.

La perte de charge varie habituellement entre 5 mmCE et 30 mmCE.

En complément de la gamme de silencieux dissipatifs, vient s'ajouter la gamme des silencieux réactifs. Cette gamme couvre le domaine des basses fréquences. Le silencieux réactif fonctionne selon le principe de changement d'impédance (changement de



section, réflexion d'ondes) conçu de manière à atténuer certaines fréquences particulières. la combinaison de silencieux réactifs et absorbants favorise le traitement acoustique de machines émettant du bruit en basse, moyenne et haute fréquences. Les pertes de charge évoluent aisément entre 50 et 200 mmCE, ce qui limite leur application aux machines pouvant fournir de fortes pressions, telles surpresseurs et dépresseurs ROOTS, compresseurs à palettes, compresseurs à pistons, groupes électrogènes.

L'évolution des moyens informatiques a permis de déve-

lopper des programmes de calculs numériques présentant souplesse, précision et rapidité dans les simulations.

Le silencieux réactif rencontre un concurrent sérieux avec le silencieux actif dont le principe consiste à analyser la fréquence, l'amplitude et la phase d'un signal sonore et à réinjecter un signal de mêmes caractéristiques mais en opposition de phase pour annuler une partie du signal source. Les premières installations industrielles de ce genre font leur apparition.

Les gains actuels varient de 15 à 25 dB(A) sur des installations à tonalités très marquées (jusqu'à 30 dB pour une fréquence pure située dans la gamme 50 à 500 Hz) comme les groupes électrogènes

Un dernier type de silencieux couvre un domaine à forte nuisance, celui des mises à l'atmosphère et des décharges en ligne. Ces appareils sont placés en aval de soupapes ou de vannes de détente susceptibles de donner naissance à des niveaux de puissance acoustique pouvant atteindre 160 dB(A).

Les conditions d'utilisation exceptionnelles (pression, température, gaz véhiculé...) requièrent des technologies très sophistiquées entraînant des coûts élevés. Ces silencieux fonctionnent suivant le principe d'une transformation et d'une translation de l'énergie acoustique vers les hautes fréquences au cours d'un passage dans un pot de détente, après lequel il est aisé d'absorber l'énergie à travers des éléments absorbants.

La coupure élastique

La définition d'un système de traitement acoustique performant sous-entend que les transmissions solidiennes soient étudiées avec le même sérieux que les transmissions aériennes. Nous ne répéterons jamais assez que bruit d'origine aérienne et bruit d'origine solidienne ne peuvent être dissociés. Nous connaissons trop d'exemples où l'oubli de systèmes de filtration de vibrations rend les solutions inefficaces, impossibles à corriger a posteriori.

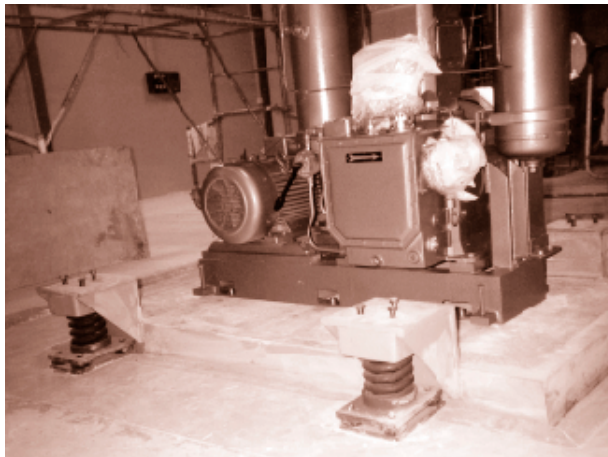
Les trois cas de figures les plus couramment rencontrés sont :

- la réduction de la transmission des vibrations d'une machine à une structure (c'est ce que l'on appelle une isolation active),
- l'isolation d'une machine par rapport à une structure soumise à des vibrations (c'est une isolation passive),
- la réduction des vibrations d'une machine montée sur un système élastique.

Chaque cas résulte d'une approche différente, mais tend également vers une bonne filtration.

Prenons le cas d'un compresseur monopiston vertical double effet dont la particularité est d'engendrer des forces dynamiques verticales importantes, en l'occurrence 1 120 kg à la vitesse de rotation de 825 tr/mn. L'objectif de l'utilisateur est très précis : pas de vibrations remontant dans le laboratoire distant de 7 m équipé d'instruments avec visée laser. La machine, quant à elle, ne tolère pas plus de 85 microns d'élongation crête à crête sur son





socle. Ces deux conditions conduisent à des solutions peu compatibles :

- la première impose de prévoir une filtration de très basse fréquence du fait de la fréquence de rotation de 13,75 Hz nécessitant des plots antivibratiles très souples, pouvant engendrer un système instable,
 - la deuxième recommande d'avoir un système stable pour minimiser les vibrations du socle,
- La solution retenue est un massif d'inertie conçu à partir d'un châssis métallique rempli d'un béton baryté de densité 3,2.

L'ensemble repose sur quatre ressorts travaillant à 1 250 kg associés en série avec 16 plots Radiaflex assurant la filtration des hautes fréquences pouvant traverser les spires des ressorts. La fréquence propre de l'ensemble suspendu est de 2,2 Hz selon le mode vertical. Le rapport poids massif d'inertie sur poids machine est de 3,5 à 1.

Les résultats étant jugés satisfaisants, l'utilisateur a décidé d'installer un deuxième groupe.

L'adjonction d'un massif d'inertie a beaucoup d'effets bénéfiques :

- meilleure stabilité du système (augmentation de la masse et de l'inertie),
- abaissement du centre de gravité de la machine,
- meilleure répartition des charges sur les plots antivibratiles,
- limitation de l'amplitude de vibrations au passage de la résonance,
- limitation des effets de balance au cours de la mise en route et de l'arrêt de la machine.

L'ensemble défini ci-dessus peut être modélisé par un des multiples programmes disponibles sur informatique. La valeur d'élongation crête à crête calculée et vérifiée est inférieure à 80 microns.

Il n'est pas inutile de rappeler que toutes les tuyauteries de raccord d'une installation montée sur plots antivibratiles doivent être équipées de manchons souples ou présenter des formes (type lyre) autorisant des déplacements équivalents à ceux des plots antivibratiles. Le non-respect de cette règle de base risque d'entraîner des ruptures sur les tuyauteries, très dommageables pour l'installation.

Le récepteur

Il est schématisé soit par un individu seul, soit par les occupants d'un local, soit par le voisinage d'une usine, ou même par une machine très sensible au bruit et aux vibrations.

Dans une usine ou un atelier, l'opérateur devant sa machine est le prototype du "récepteur" ou "point d'écoute".

Moyens pour traiter le récepteur

- Casque de protection,
- Cabine, écran,
- Contrôle de l'exposition par rotation de personnel.

Le casque de protection ainsi que les cabines et écrans sont des techniques bien connues de l'utilisateur. En revanche, la rotation du personnel l'est beaucoup moins, sous réserve d'une mise en œuvre possible. Elle consiste à utiliser la possibilité de faire tourner sur plusieurs postes de travail un opérateur de machine. Ainsi s'il est exposé à 88 dB(A) pendant 33 % de son temps, à 83 dB(A) pendant 12 % du temps, et à 75 dB(A) pendant 55 % du temps, son niveau d'exposition global sera de 84 dB(A), en parfaite conformité avec la législation.

Conclusion

La mise en œuvre de solutions efficaces nécessite une connaissance approfondie des technologies, mais aussi une réflexion globale aboutissant à une véritable stratégie de lutte contre le bruit, qui ne peut être mise en œuvre que par des professionnels ayant une solide connaissance des phénomènes et de leur interaction.