

OPTIMISATION DU COMPORTEMENT AU BRUIT D'UN VEHICULE FERROVIAIRE LEGER (METRO)

Vincent CHRITIN

Laboratoire d'Electromagnétisme et d'Acoustique, Département d'Electricité
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 LAUSANNE, Suisse
Tel +41 21 693 4626 Fax +41 21 693 2673

This paper presents the methodology used to optimize the noise behavior of an urban public transport vehicle which is currently in the development phase. A series of measurements determined the interior and exterior noise characteristics of a first generation vehicle. A simplified mathematical model, which takes in account aerial geometric propagation, coupled with a complete acoustic decomposition, lead to the identification and contribution of individual noise sources of the future vehicle. The validity and limits of such an approach will be determined by acoustical qualification tests on the first vehicle constructed.

La méthodologie présentée a été élaborée dans l'objectif de permettre, pendant sa phase de développement, l'optimisation du comportement au bruit d'un véhicule urbain de transport de passagers. Une campagne de mesures a permis de dresser le bilan de bruit intérieur et extérieur d'un véhicule de même type, de première génération. A partir d'une part d'un modèle simplifié de transmission ne prenant en compte que les contributions aériennes, et d'autre part d'une décomposition caractéristique complète du nouveau véhicule, les allocations de bruit de tous les composants identifiés ont été déterminées. La validité et les limites de cette démarche seront établies par des essais de qualification acoustique sur le premier véhicule construit.

1. OBJECTIF

Les performances acoustiques d'un nouveau véhicule sont planifiées dès les premiers stades de la conception, en termes de niveaux énergétiques équivalents ou maxima — grandeurs utilisées pour représenter la gêne produite par les transports ferroviaires sur les populations (1) — à respecter en différents points d'observation à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule. Pour satisfaire ces objectifs globaux, il est nécessaire de maîtriser les multiples contributions dont ils résultent. On propose à cet effet une méthodologie permettant la détermination des spécifications individuelles à toutes les sources participant au bilan de bruit, à partir des données constructives disponibles au début de la phase de conception. Seules des caractéristiques générales des composants du véhicule étant connues (dimensions, emplacement, nombre, etc.), une caractérisation fréquentielle de leurs comportements respectifs, encore moins à fortiori de la résultante de l'ensemble des contributions, n'est pas envisageable. Une description de type énergétique est donc utilisée.



Fig 1: Métro léger, doublet sur pneumatiques, structure aluminium, 45 tonnes par véhicule, vitesse maximale 80 km/h.

METRO: OPTIMISATION DU COMPORTEMENT AU BRUIT

2. MESURES DE BRUIT SUR UN VEHICULE EXISTANT

Bruit intérieur (ci-dessous) et extérieur (page suivante) d'un métro léger de génération précédente au véhicule en développement :

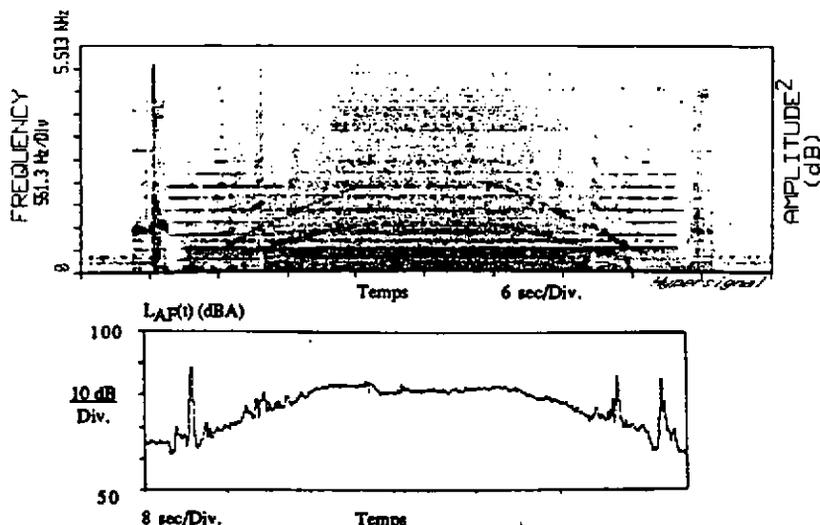
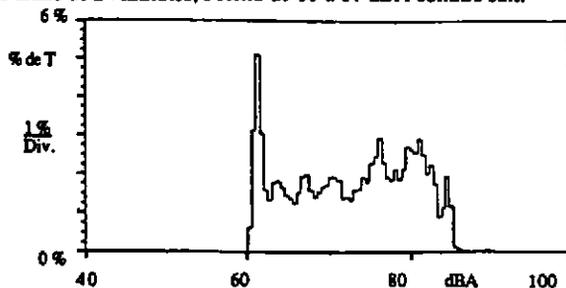


Fig 2: sonogramme et évolution temporelle du niveau de pression acoustique L_{AF} (mesurés lors d'un cycle entre deux stations),

Les raies verticales sur le sonogramme correspondent aux verrouillages d'ouverture-fermeture des portes, traduits par des pics sur l'évolution temporelle. Les raies harmoniques horizontales sont celles de la traction électrique pendant les phases d'accélération et de décélération. Les raies obliques sont caractéristiques du bruit d'engrènement des réducteurs, variable avec la vitesse. La partie médiane du sonogramme, lorsque le véhicule circule à vitesse stabilisée (50 km/h), ne contient pas de contributions particulières mais un bruit large bande. La répartition temporelle des niveaux de bruit, mesurés pendant un trajet de 16 stations en ligne d'une durée totale de 24 minutes, s'étend de 61 à 87 dBA comme suit:

Fig 3: histogramme (non cumulé) du niveau de bruit L_{AF} ($T=24$ min, 16 stations)



On distingue trois contributions majoritaires: 62 dBA: périodes d'arrêt en stations souterraines, 77 dBA: phases d'accélération et décélération, 83 dBA: passages à vitesse maximale en tunnels.

METRO: OPTIMISATION DU COMPORTEMENT AU BRUIT

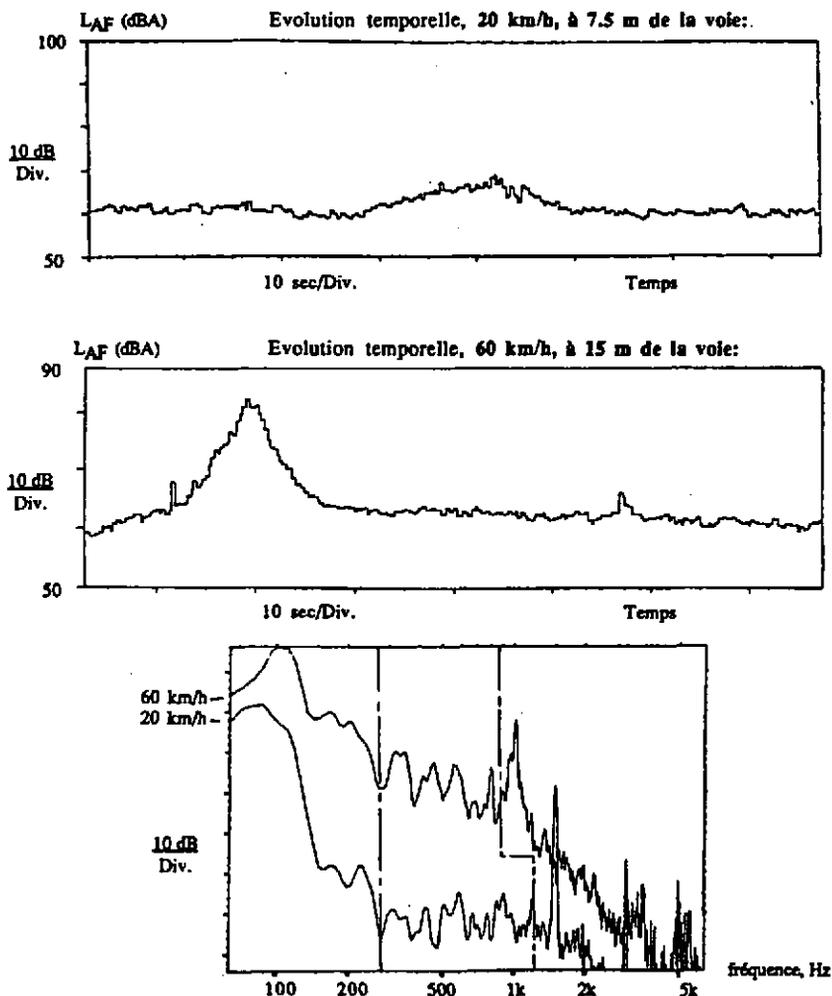


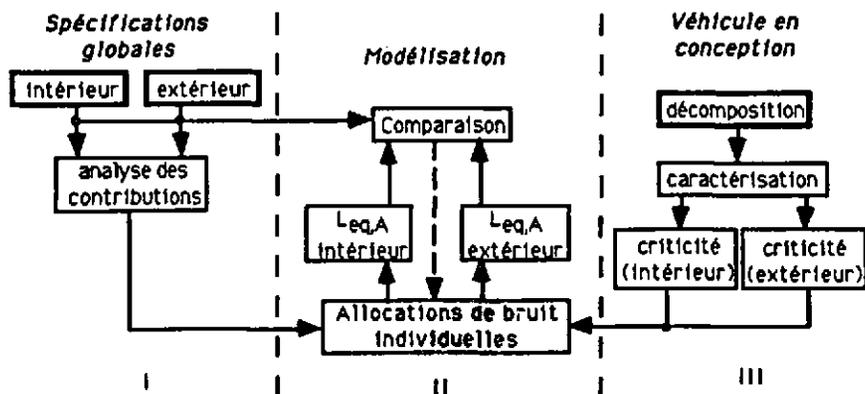
Fig 4: Evolution temporelle du niveau de bruit LAF à 20 et 60 km/h
 en bas: spectres correspondants

L'absence de palier dans les évolutions temporelles souligne la nécessité du choix d'une durée d'observation adaptée pour la mesure du niveau énergétique équivalent à un passage. Les spectres montrent chacun trois zones distinctes, les contributions majoritaires se situant jusqu'à 1.5 kHz. Les pics à 1024 et 1512 Hz sont dûs aux composants du roulement.

METRO: OPTIMISATION DU COMPORTEMENT AU BRUIT

3. METHODOLOGIE

Elle comporte trois axes, comme schématisé ci-dessous:



Le premier axe permet de déterminer la dépendance mutuelle des objectifs et de fixer les données et paramètres de chaque situation. Le troisième axe conduit à une classification de toutes les sources du véhicule. Ces deux axes convergent vers l'allocation individuelle de bruit à chaque sous-ensemble. La modélisation (axe II) permet, pour une répartition donnée des allocations, le calcul des valeurs résultantes pour chaque situation de l'axe I. Par comparaison aux valeurs d'objectif globales, et jusqu'à coïncidence des résultats, une nouvelle distribution des allocations conforme à l'axe III est déterminée (en trait-tillés). Les données d'entrée sont encadrées en gras.

4. APPLICATION

4.1. Spécifications globales (axe I)

Cahier des charges bruit du véhicule en développement (donné à titre indicatif):

• intérieur

- I. **Toute vitesse stabilisée entre 0 et 20 km/h**
Leq = 64 dBA (objectif), 70 dBA (maximorum),
- II. **A 60 km/h stabilisé**
Leq = 68 dBA (objectif), 72 dBA (maximorum),
- III. **A 80 km/h stabilisé:**
Leq = 71 dBA (objectif), 74 dBA (maximorum)

• extérieur

- IV. **Arrêts** $d = 4.5 \text{ m}, h = 1.5 \text{ m}$ Leq = 65 dBA (objectif), 70 dBA (maximorum)
- V. **20 km/h** $d = 7.5 \text{ m}, h = 1.5 \text{ m}$ Leq(10 sec.) = 68 dBA (objectif), 70 dBA (maximorum)
- VI. **60 km/h** $d = 7.5 \text{ m}, h = 1.5 \text{ m}$ Leq(10 sec.) = 75 dBA (objectif), 78 dBA (maximorum)
- VII. **80 km/h** $R = 15 \text{ m}$ Leq(10 sec.) = 75 dBA (objectif), 80 dBA (maximorum)

METRO: OPTIMISATION DU COMPORTEMENT AU BRUIT

Les exigences du cahier des charges peuvent être schématiquement décomposées (contributions multiples) comme suit :

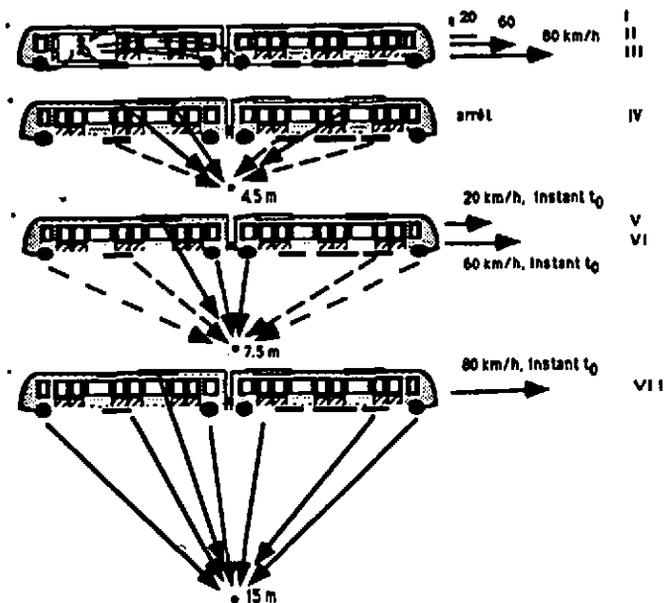


Fig 5: comparaison des situations (objectifs)

Spécifications I à III: les contributions principales au point d'observation, toujours fixe par rapport au véhicule, proviennent des sources dans l'habitacle et des sources extérieures rayonnant à travers l'isolation acoustique aérienne et solidienne de l'ensemble des parois et de la structure du véhicule. Les indices d'affaiblissement acoustique aérien des faces latérales, du pavillon et du plancher du véhicule interviennent soit comme paramètres de conception, soit sont planifiés au départ (cahier des charges).

Spécifications IV: seules sont concernées les sources rayonnant à l'extérieur à vitesse nulle. Leur longueur de répartition sur le véhicule est d'environ cinq fois la distance d'observation (fixe).

Spécifications V et VI et VII: le véhicule est représenté à l'instant t_0 de passage dans l'axe du point d'observation, lui-même situé à une distance variable de la voie selon la vitesse considérée (les distances réglementaires étant fixées par [2], norme discutée sous [3]). De plus, les sources concernées par ces exigences pour l'extérieur sont aussi astreintes aux spécifications II et III.

Ces différences et dépendances mutuelles entre les objectifs rendent impossible la détermination a priori de l'exigence la plus contraignante pour chaque source. La démarche inverse, consistant en une détermination simultanée des allocations individuelles de bruit à chaque sources vis à vis — et indépendamment — de chaque objectif, est donc adoptée.

METRO: OPTIMISATION DU COMPORTEMENT AU BRUIT

4.2. Décomposition du véhicule (axe III)

La décomposition complète du véhicule en sous-ensembles permet premièrement de dresser l'inventaire et de décrire toutes les sources de bruit. Mais son objectif principal est de conduire à une *classification* des sources, exprimant leur importance respective dans les bilans de bruit intérieur et extérieur du véhicule. C'est en effet à partir de cette classification que pourront être déterminées les allocations individuelles (relatives) de bruit.

On définit dans ce but, pour chaque source et indépendamment pour l'intérieur et l'extérieur du véhicule, un *indice de criticité* — traduisant le degré de gêne produit — estimé à partir de toutes les données constructives et connaissances disponibles.

Le tableau ci-dessous donne un exemple abrégé de la description de quelques sources:

OBJET	FONCTION	EMPLACEMENT	FONCTION-NEMENT	NB par VOIT: A B	FIXATION	STRUCTURE PORTANTE	CARACTERISTIQUES
ventilateur	ventilation de base	entre plafond et toit	continu	3 3	boulonnage rigide	traverses alu toit	ventilation: 5200 m ³ /h v = 4m/s dans section rectangulaire
évaporateur	séchage	"	continu	2 2	"	"	
compresseur	refroidissement	"	continu	1 1	boulon sur silent-bloc	"	
chauffage	chauffage d'appoint	"	continu	- -	boulonnage rigide	"	
onduleur	trans. HT en triphasé	sous le châssis	continu	1 1	boulonnage rigide	suspendu brancard	
Compresseur d'air	air comprimé suspensions pneum.	suspendu sous la caisse (sym. CVS)	50 % environ	1 per doublet	boulonnage + silent-bloc	traverses alu (rails en C)	1550 1/min 73 dBA CL DIN 45635
Moteur	entraînement	sous la caisse, dans la poutre centrale	continu sauf à l'arrêt	4 4	boulonné à la poutre via jambe	poutre centrale	n.c.
Réducteur	train d'engrenage épicycloïdal	dans la jante, côté ext. du véhicule	continu sauf à l'arrêt	4 4	rigide à l'essieu (camelures)	poutre centrale	n.c.

Elles ont été divisées en deux catégories, selon que leurs contributions sont fixes ou varient en fonction de la vitesse du véhicule. La première regroupe tous les *équipements*, la seconde les composants du *roulement* et de la *traction* pour lesquels une allocation est nécessaire à chaque vitesse.

Les critères suivants ont ensuite été utilisés pour déterminer les indices de criticité intérieure et extérieure de chaque source:

- *nature du bruit*: aérialique, mécanique, électrique, hydraulique, etc.
- *origine*: pales, grilles, conduits, bouches, engrenement, jeu mécanique, contact, inductances, compression, détente, etc.
- *qualification*: écoulement, chocs, sifflement, etc.
- *excitation/propagation*: aérienne, solidienne
- *atténuations*: effet d'écran, affaiblissement acoustiques aériens, caractéristiques élastiques des liaisons, amortissements, etc.

Au total, 22 sources occupant 98 emplacements répartis sur toute la longueur du véhicule ont été identifiées et classifiées comme ci-dessus.

METRO: OPTIMISATION DU COMPORTEMENT AU BRUIT

6. MODELISATION (axe II)

Les allocations individuelles ont dans tous les cas été exprimées en termes de niveaux énergétiques équivalents de pression acoustique, en large bande, pour des conditions de champs libre. La distance de spécification, par rapport à l'enveloppe des sources, a été choisie dans le champ lointain et autant que possible à la distance correspondante du cahier des charges du véhicule. Les niveaux énergétiques équivalents ont ensuite été calculés comme suit:

- Bruit intérieur: en fonction des performances d'isolation acoustique aérienne brute calculées ou planifiées des différentes parois, en considérant un niveau stationnaire et constant dans l'habitable.
- Bruit extérieur: calcul, sur la base des lois de propagation acoustique aérienne en champ libre valables depuis la source, de l'évolution temporelle du niveau $L_{AF}(t)$ de pression acoustique générée au point d'observation. Puis, sommation de toutes les contributions et intégration pour différentes durées d'observation.

L'incohérence des sources a été postulée dans les deux modélisations, ce qui est relativement bien vérifié dans la pratique. D'autre part, seuls ont été pris en compte à l'heure actuelle les effets des transmissions aériennes, ce qui peut constituer une limitation importante pour le calcul du bruit intérieur. Toutefois elle peut être acceptable en première approximation pour le type de véhicule étudié, circulant sur pneumatiques et à des vitesses modérées. Les bruits de nature aérodynamique ont aussi été négligés du fait des faibles vitesses [4]. En regard des informations disponibles aux premiers stades de la conception, toutes les sources ont été considérées comme omnidirectionnelles, ce qui conduit à surestimer le bruit réel du véhicule à l'extérieur lors du calcul du niveau énergétique équivalent.

6.2. Résultats

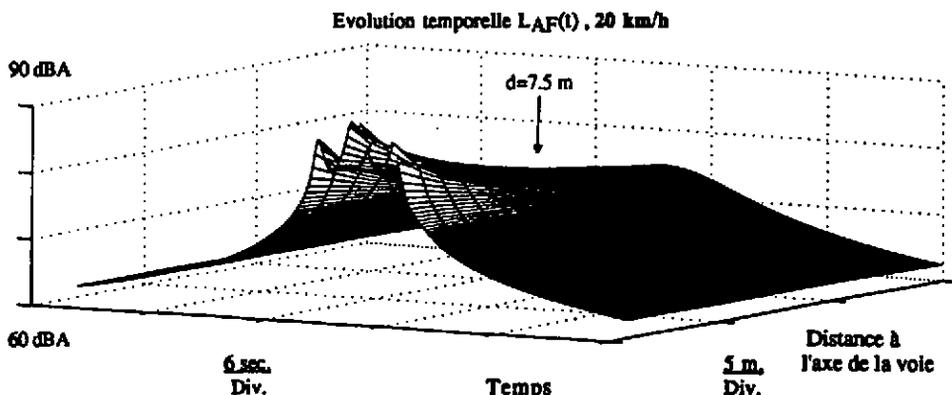
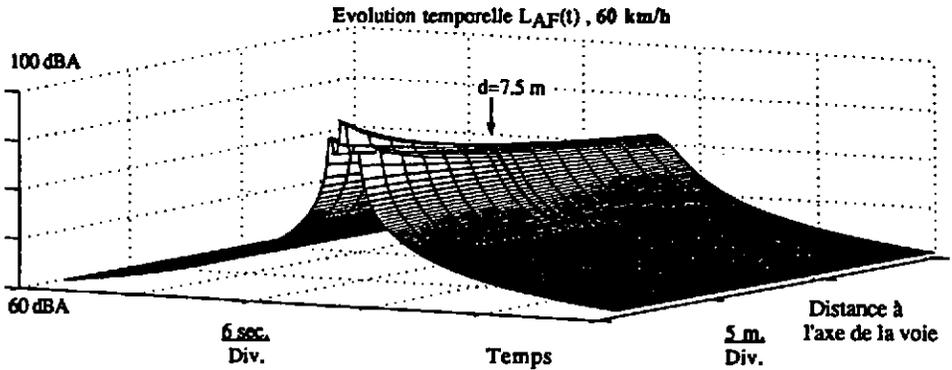
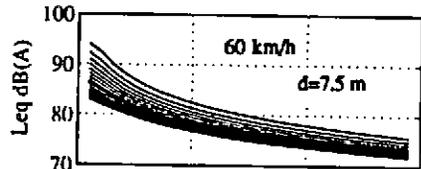
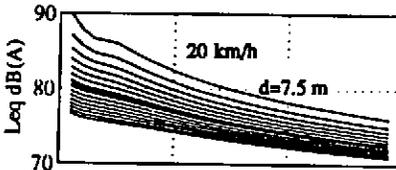


Fig 6: bruit extérieur à 20 km/h (ci-dessus) et 60 km/h (page suivante)
Evolution temporelle du niveau de bruit L_{AF} pour une distance d'observation variant de 1 à 15 mètres de la voie

METRO: OPTIMISATION DU COMPORTEMENT AU BRUIT



Niveaux énergétiques équivalents $Leq_{AF}(T)$ correspondants aux deux graphes précédents:



En abscisse: durée d'intégration T, variant de 1 à 30 secondes (10 sec./Div.) (Niveau du bruit de fond: 60 dBA)

6. CONCLUSION

La méthodologie décrite ne prétend pas garantir les performances de bruit d'un nouveau véhicule. Toutefois, elle a permis de prendre — avant leur construction — des dispositions concrètes pour toutes les sources de bruit qui le composent, sous forme d'allocations individuelles de bruit complétées par des recommandations constructives détaillées. Parallèlement à cette action, une optimisation des performances d'isolation acoustique aérienne et solidienne de toutes les parois du véhicule a été entreprise. L'ensemble de ces actions est à la fois limité par la quantité restreinte d'information et de temps disponible pendant la phase de développement, et indispensable du fait que dans ce type de projets industriels la construction d'un prototype pour post-optimisation n'est pas envisageable. Les limites et la validité de cette démarche, pressenties au vu des hypothèses simplificatrices adoptées, seront déterminées par des essais de qualification sur le premier véhicule construit. La suite donnée à ces travaux est constituée par l'intégration des effets des transmissions solidiennes dans le modèle de bruit intérieur, et la prise en compte de la directivité et des effets du sol dans le modèle de propagation à l'extérieur. L'approche énergétique sera conservée, mais affinée à une caractérisation par tiers-d'octaves.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Moehler, Community response to railway noise: a review of social surveys, *Journal of Sound and Vibration* (1988) 120(2), 321-332.
- [2] Norme Internationale ISO 3095-1975, Mesurage du bruit émis par les véhicules circulant sur rails.
- [3] T. Ten Wolde, Noise emission type test methods for railbound vehicles at constant speed, *Journal of Sound and Vibration* (1988) 120(2), 335-362.
- [4] Mohanan, Sharma & Singal, A noise and vibration survey in an underground railway system, *Applied Acoustics* 28 (1989) 263-275.