

Des véhicules de transport urbains plus léger ... et plus silencieux : l'exemple du VAL

Vincent Chritin, Ing. Dipl. EPFL, LEMA¹

La maîtrise du bruit constitue aujourd'hui un enjeu incontournable du développement des sociétés industrielles. Particulièrement concernés, les constructeurs de véhicules de transports urbains doivent faire face à de nouvelles exigences de bruit, notamment au plan de la CE, tandis que les véhicules s'allègent en vue de réduire leur coût et leur consommation d'énergie.

Les exigences des bruits intérieur et extérieur du nouveau VAL (Véhicule Automatique Léger) étaient planifiées dans un cahier des charges pour différentes situations types. La problématique bruit était de respecter ces exigences par des dispositions constructives adéquates, ne pénalisant ni le poids ni le coût, validées à chaque étape par des mesures acoustiques.

Le bruit d'un véhicule type VAL dépend de la situation (vitesse, pente et courbure de la voie, etc.) et résulte d'un très grand nombre de facteurs : il y a de multiples sources de bruit et de chemins de transmission et de propagation. Ces facteurs ont été identifiés d'une part par des mesures sur un VAL de la première génération et d'autre part à l'aide d'une décomposition des bruits intérieur et extérieur du véhicule projeté, obtenue à partir des éléments disponibles au stade de l'avant-projet. Des allocations individuelles de bruit ont alors été déterminées par calculs prévisionnels pour chaque sous-ensemble susceptible de contribuer au bruit; elles constituaient autant d'objectifs bruit pour les sous-traitants.

Au terme de la conception, et malgré le grand nombre de facteurs non maîtrisables - performances réelles de certains sous-ensembles, couplages entre sous-ensembles, transmissions solidiennes - le prototype du nouveau VAL satisfait les exigences bruit planifiées.

Le bruit, un problème physique ?

Phénomène physique à la base, la notion de bruit comporte également et indissociablement un aspect perceptif - sensation sonore. Cette situation confère à tout problème bruit - réduire le bruit d'un équipement existant, construire un équipement silencieux - une dimension *naturelle* dans le sens où les solutions peuvent a priori apparaître intuitives, évidentes: diagnostic "à l'oreille", solutions types, matériaux "phoniques", couches "isolantes", etc.

Or dans la plupart des cas rencontrés en pratique :

- l'aspect physique s'avère complexe : multiples mécanismes de production et de transmission du son, couplages entre éléments, comportement "vibro-acoustique",
- d'autres aspects interviennent inévitablement, conditionnant également l'applicabilité des outils et solutions acoustiques : contraintes de masse, d'encombrement, de maintenance, de sécurité, exigences thermique, esthétique, etc.

Dans l'exemple ci-dessous, illustrant schématiquement une chaîne bruit rencontrée dans le VAL, de nombreuses actions peuvent a priori être envisagées pour "réduire la contribution du réducteur au bruit intérieur" : - au niveau de l'engrènement (modification des profils de contact, des états de surface, utilisation d'alliage à fort amortissement) - au second niveau (paliers, axes, carter: réduction des désalignements, modifications structurelles) - au niveau des voies de transmission solidiennes (découplage mécanique des bielles hautes et basses de liaison entre le roulement et la caisse) et/ou aériennes (isolation acoustique des parois), - ou enfin au niveau du milieu de réception lui-même (absorption passive ou active dans le véhicule).

La mise en œuvre de chacune de ces solutions aurait nécessité des moyens très différents et engagé des acteurs à des niveaux également très différents du projet. D'autre part, chacune de ces solutions aurait impliqué des répercussions importantes non seulement sur les coûts, mais aussi par exemple sur la masse (ex. traitement acoustique des parois), la fiabilité, la fatigue

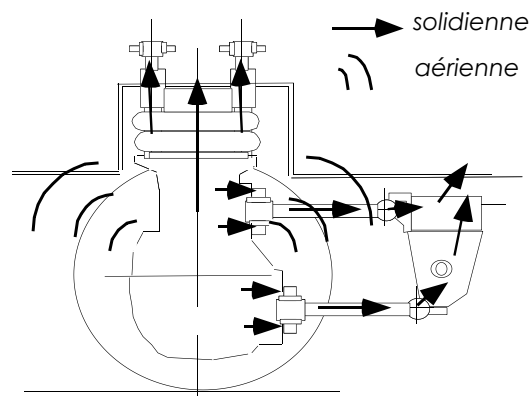


FIGURE 1 : transmission du son par voies aérienne et solidienne

(modification des profils de contact de denture), la sécurité (souplesse des bielles de liaison).

Si l'évaluation des aspects physiques en particulier nécessitait des compétences spécialisées, le bruit d'un équipement tel que le VAL était donc aussi un problème global qui exigeait une vision d'ensemble et un dialogue à tous les niveaux de la conception : maître d'oeuvre (définition des objectifs), constructeur (prévision, diagnostic, définition et évaluation des solutions constructives, allocations de bruit), sous-traitants (solutions constructives).

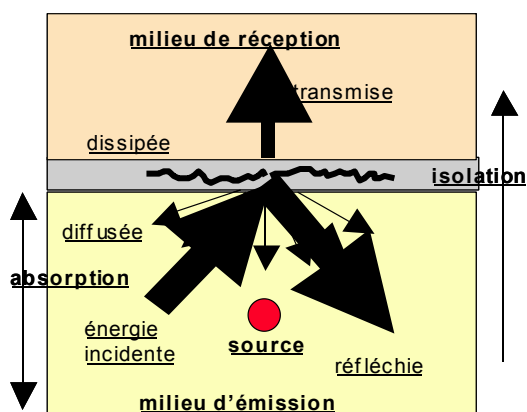


FIGURE 2 : principes acoustiques

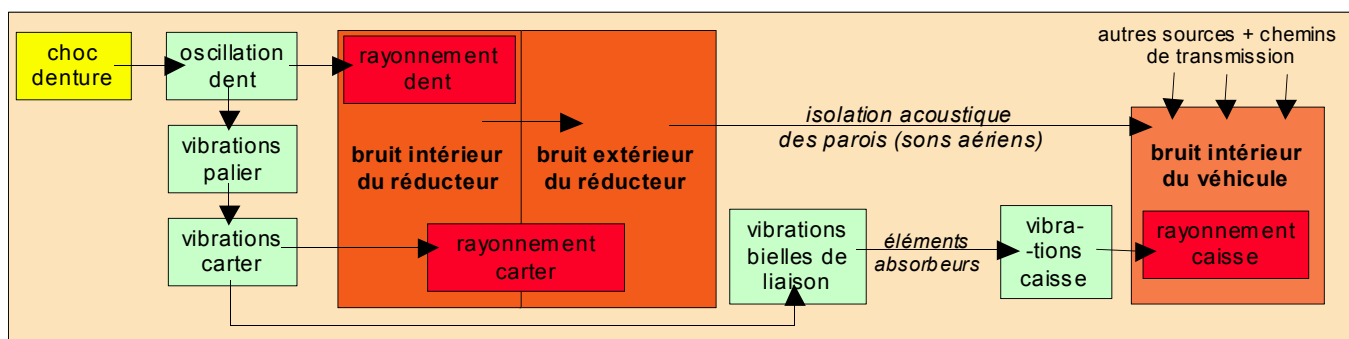


FIGURE 3 : VAL - exemple de chaîne bruit : réducteur --> bruit intérieur

Bien définir les objectifs bruit

Réduction du bruit et réduction des masses étaient des objectifs prioritaires du VAL. En pratique, il est beaucoup plus difficile de fixer et vérifier les objectifs bruit que ceux de masse: le bruit dépend de nombreux facteurs et possède des caractéristiques variables. Concrètement, les objectifs bruit consistaient en une série de niveaux acoustiques admissibles correspondant chacun à une situation précise de circulation. Ainsi, le bruit du véhicule était ramené à un ensemble de valeurs globales uniques assorties de conditions d'évaluation. Le niveau d'exigence retenu était dicté en fonction de considérations sur la base de contraintes réglementaires (p. ex. normes CE) et de performances connues de véhicules semblables (état de l'art).

De manière générale, l'avantage de ramener le bruit à des valeurs uniques - outre celui de permettre une évaluation standard des performances à partir de mesures - est de constituer une information synthétique, autant que possible objective, et aisément communicable dans toute la structure du projet. En revanche, ces seules valeurs résumées ne traduisent bien entendu que très imparfaitement la réalité des phénomènes physiques en jeu.

Bruit intérieur



I arrêt

II. 0 à 20 km/h

III. 60 km/h

IV. acc. 0-80 km/h

V. déc. 80-0 km/h

Bruit extérieur



I arrêt à 4.5 m

II. 16 km/h à 7.5 m

III. 80 km/h à 15 m

15 m

FIGURE 4 : cahier des charges bruit VAL (situations types)

Démarche bruit

Le principe de la méthodologie adoptée dans le cas du VAL était celui de la projection des objectifs globaux sur chaque élément constructif du véhicule participant au bilan de bruit. Autrement dit, il s'agissait de déduire, à partir des objectifs globaux, des allocations individuelles de bruit adéquates pour chaque sous-ensemble de sorte à obtenir la performance finale d'ensemble voulue. Schématiquement, une telle démarche pouvait être décomposée en trois axes :

I. analyse des objectifs et détermination des dépendances mutuelles dans le but de fixer toutes les données et tous les paramètres physiques à prendre en compte dans chaque situation,

II. parallèlement, identification et classification par degré d'importance de tous les éléments participant au bilan de bruit du véhicule - sources, chemins de transmission, éléments de parois, en concertation avec tous les acteurs de la conception à partir de l'ensemble des données constructives et connaissances disponibles aux premiers stades de la conception. Les sources de bruit ont ainsi été divisées en deux catégories, selon que leurs contributions variaient ou non en fonction de la vitesse du véhicule. La première regroupait tous les équipements tels que le conditionnement d'air, compresseur, etc., la seconde les composants du roulement et de la traction pour lesquels une allocation était nécessaire à chaque vitesse spécifiée par le cahier des charges bruit.

III. détermination, par calculs prévisionnel et mesures complémentaires, d'allocations individuelles de bruit réalistes assorties de conditions permettant la vérification des performances de chaque sous-ensemble

Au total, l'analyse du VAL a conduit à prendre en compte 16 sources occupant au total 120 emplacements répartis sur toute la longueur du véhicule (doublet), et 11 types d'éléments de parois.

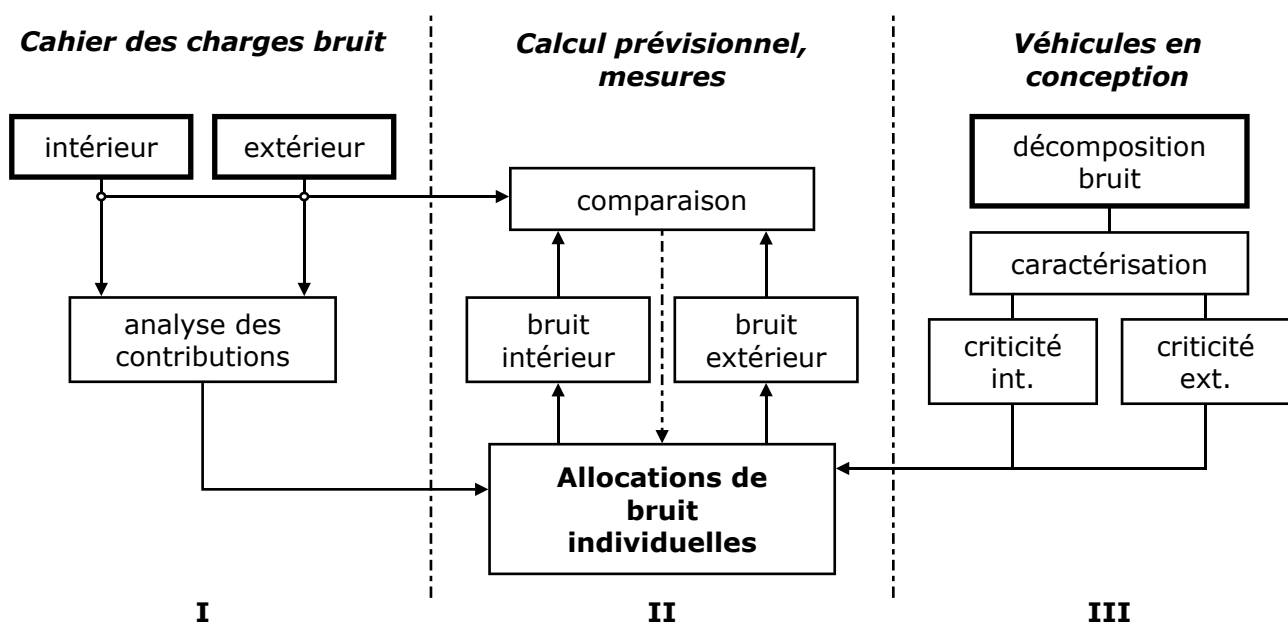


FIGURE 5 : méthodologie bruit

Mesures acoustiques et calculs prévisionnels

La résolution de tout problème bruit nécessite obligatoirement des calculs prévisionnels et/ou des mesures acoustiques, d'une part comme dans le cas du VAL pour l'évaluation des allocations ou performances de chaque sous-ensemble - p. ex. isolation des parois aux sons aériens, puissance acoustique d'un élément, émergence de fréquences particulières - d'autre part pour permettre avant construction et assemblage de l'équipement une prévision globale du bruit en fonction des allocations puis des performances effectives individuelles de chaque sous-ensemble (démarche itérative en pratique).

La difficulté dans cette étape réside tout autant dans le choix proprement dit des outils que de leur utilisation : une évaluation correcte suppose une bonne connaissance de la gamme des outils disponibles, des contraintes liées à leur mise en oeuvre, des conditions d'application. Par exemple, dans le cas du VAL, les méthodes de calcul par éléments finis ou encore de l'analyse statistique énergétique auraient nécessité la mise en place et la maintenance d'une infrastructure relativement lourde tandis que l'information nécessaire à ce type de calculs aurait été insuffisante en temps utiles i.e. aux premiers stades de la conception - lorsque devaient être fixées les allocations de bruit aux sous-traitants.

Les problèmes principaux étaient l'évaluation

- des performances d'isolation aux sons aériens des parois du véhicule,
- du bruit intérieur et extérieur résultant de toutes les sources et chemins de transmission
- des phénomènes de transmission solidienne

Pour le premier point, les performances d'isolation acoustique de la paroi latérale et du plancher du véhicule étaient fixées par le cahier des charges bruit initial. Des spécifications complémentaires adaptées ont été déduites de celles-ci pour les autres parois du véhicule (pavillon, extrémités avant et arrière), puisque la performance finale de bruit intérieur est bien entendu liée à l'isolation apportée par toutes les parois fermant l'habitacle (en particulier lors des passages en tunnels - fréquents dans les transports urbains en site propre). A partir de ces exigences, les performances des parois ont été régulièrement calculées au fur et à mesure de l'évolution de la conception. L'isolation acoustique des portes du véhicule, de structure sandwich composite (i.e. plus complexe que le reste de la paroi latérale), ne pouvait pas être évaluée analytiquement. Une évaluation prévisionnelle a été obtenue au moyen de la méthode de calculs par éléments finis de frontière RAYON (c) et validée par des mesures de qualification réalisées en parallèle sur un prototype de porte au Laboratoire Fédéral d'Essai des Matériaux.

En ce qui concerne le calcul du bruit extérieur du véhicule, un modèle de propagation aérienne a été élaboré. En simulant le passage du véhicule dans les conditions prévues par le cahier des charges initial, le modèle permettait, à partir des puissances acoustiques attribuées à chaque source, une prévision du niveau de bruit équivalent au passage à la distance préconisée de la voie.

Enfin, le bruit intérieur du véhicule a été calculé sur la base des puissances acoustiques des sources embarquées et des performances d'isolation des parois, sans prise en compte au stade de la prévision des effets de transmission solidienne.



FIGURE 6 : roulement VAL

Indice d'affaiblissement acoustique aérien R (porte de métro - structure composite)

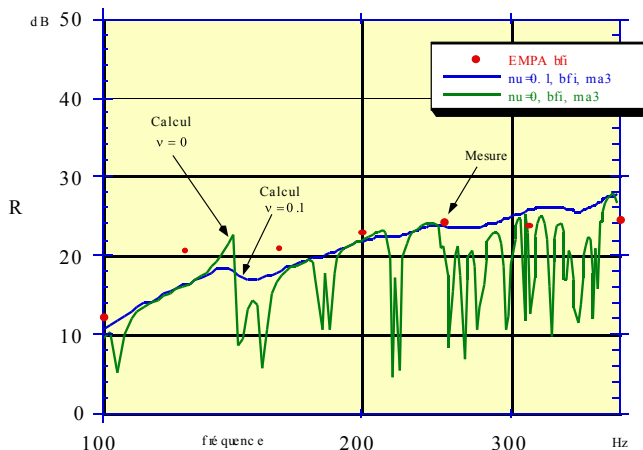
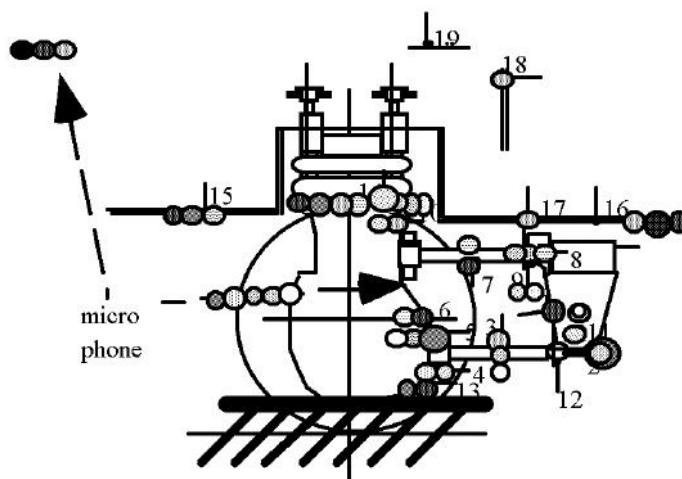


FIGURE 7 : comparaison calcul (FEM) - mesures (EMPA)



FIGURE 8 : transmission solidienne du bruit de roulement vers l'intérieur du véhicule, diagnostic par mesures simultanées du bruit et des vibrations



émergence 10 dB • < 10 dB ○ > 10 dB

f Hz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
320	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
354	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
448	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
456	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
536	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
536	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
816	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1296	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1368	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2280	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3320	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2824	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
424	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
456	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
456	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
328	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
354	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
328	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
354	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
456	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
530	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1360	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1736	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
296	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
328	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
cabine	88	304	328	350	424	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
roul.	-	-	-	352	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Qualification bruit

Les essais de qualification bruit ont été effectués sur le premier véhicule construit, sur le site d'essais de la Communauté Urbaine de Lille.

Au préalable, les mesures de vérification des performances d'isolation acoustique des parois ont été réalisées dans la halle de construction de Vevey-Technologies SA à Villeneuve (mesure simultanée pour chaque bande de fréquences du bruit produit de chaque côté de la paroi par une source extérieure, corrigée du temps de réverbération intérieur - indicateur de l'absorption des équipements intérieurs, sièges, moquette, etc.).

Les mesures finales de bruit extérieur du véhicule, dans des conditions réelles de circulation, ont d'emblée révélé des performances effectives meilleures que les objectifs.

En revanche, pour le bruit intérieur, des actions complémentaires d'optimisation ont été nécessaires afin de résoudre un problème de transmission solidienne de bruit du roulement. Une modification constructive réalisée après-coup au niveau des organes de traction a finalement permis la mise en conformité bruit totale du véhicule par rapport aux objectifs initiaux.

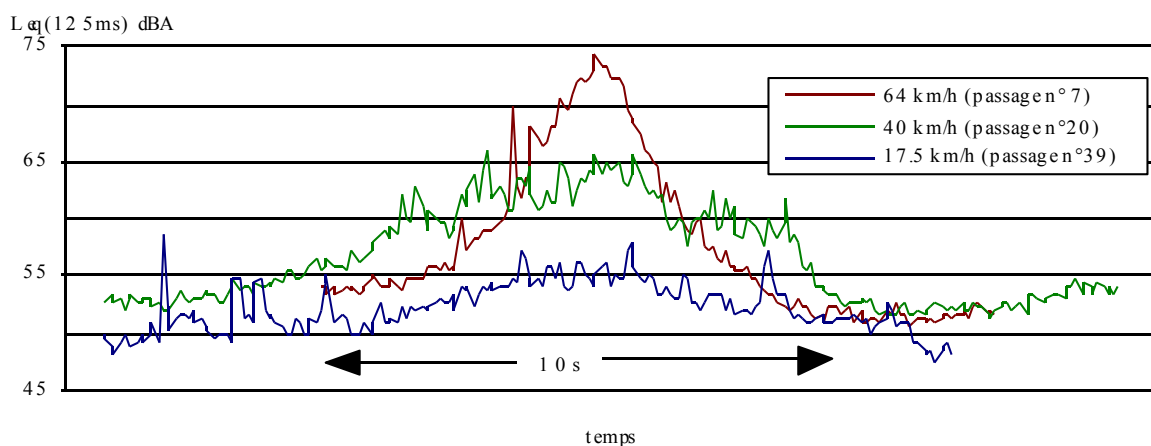
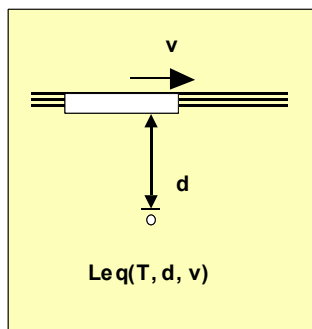


FIGURE 9 : mesure du bruit extérieur du véhicule, (évolution temporelle du niveau de bruit équivalent L_{eq} par pas de 125 ms)

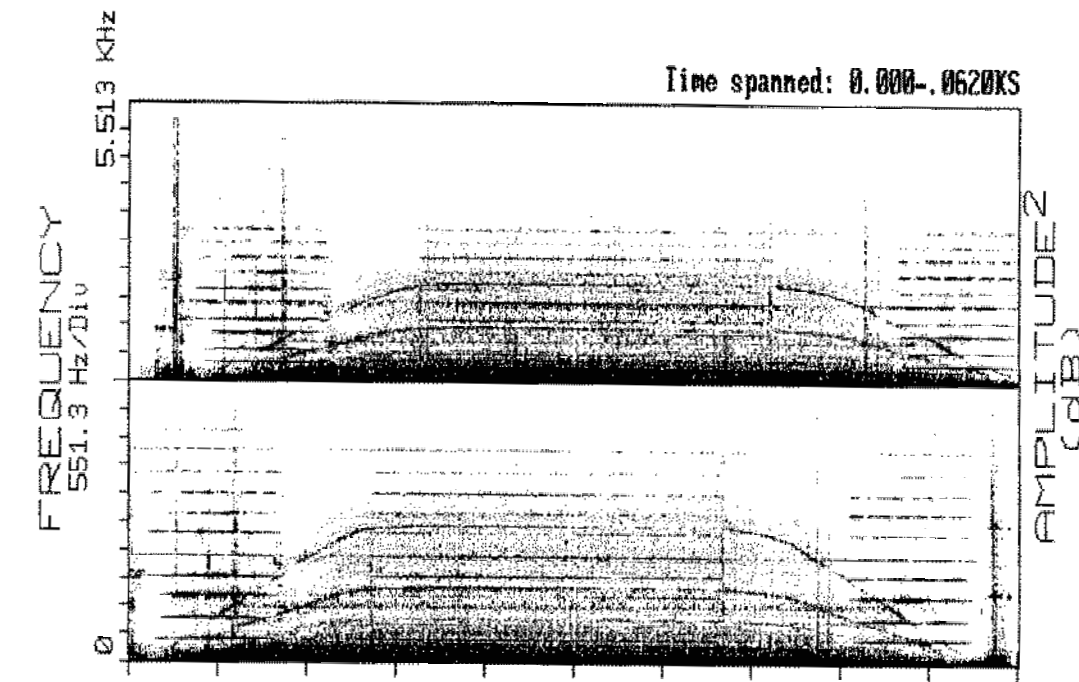


FIGURE 10 : Le sonogramme permet de représenter visuellement les événements sonores; ici, le bruit intérieur entre deux stations consécutives: claquement des portes (pics), bruit de traction électrique (raies horizontales), bruit d'engrènement (raies obliques)

Vers une meilleure maîtrise du bruit ?

La problématique de la maîtrise du bruit du VAL s'est révélée particulièrement intéressante: aspects physiques complexes, contraintes prioritaires antinomiques (bruit-masse), conception innovatrice. Une méthodologie particulière a été élaborée à cet effet: prise en compte des problèmes bruit en amont, évaluation systématique des outils et solutions constructives disponibles. Adaptée à la planification globale du projet, elle a permis de prendre les dispositions concrètes minimales vis-à-vis de tous les sous-éléments composant le véhicule - pour finalement aboutir à une construction conforme aux objectifs. Il est donc aujourd'hui réaliste d'intégrer et de satisfaire dans l'industrie des équipements tels que le VAL des exigences accrues en matière de confort et de nuisances sonores.

¹“VAL-Optimisation du comportement au bruit” était l'objet d'une collaboration entre VeVey-Technologies et le Laboratoire d'Électromagnétisme et d'Acoustique (LEMA) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), dans le cadre du projet CERS-EUREKA n°2212.1.