

MINISTERE
DE
L'ENVIRONNEMENT

MINISTERE DE L'URBANISME,
DU LOGEMENT
ET DES TRANSPORTS

Délégation de la Qualité de la Vie

SECRETARIAT D'ETAT
AUX TRANSPORTS

DTT.

Service des Chemins de Fer

BRUIT FERROVIAIRE

RAPPORT SUR LES CONNAISSANCES DISPONIBLES ET PROPOSITIONS DE RECHERCHES

Observatoire Economique
de la Statistique des Transports
DOCUMENTATION

CDAT
3384

Décembre 1984



MINISTERE DE L'URBANISME
DU LOGEMENT ET DES TRANSPORTS
SECRETARIAT D'ETAT CHARGE DES TRANSPORTS
DIRECTION DES TRANSPORTS
TERRESTRES

Service des Chemins de Fer

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT

DELEGATION A LA QUALITE
DE LA VIE

Mission Bruit

Décembre 1984

GROUPE DE TRAVAIL INTERMINISTERIEL

SUR LE BRUIT FERROVIAIRE

A l'occasion de la mise en oeuvre des procédures et des études préalables à la réalisation du projet de T.G.V. Atlantique, le Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre, chargé de l'Environnement et de la Qualité de la Vie, a fait part au Ministère des Transports de ses préoccupations et de ses interrogations quant aux méthodes et aux indicateurs actuellement retenus d'une part pour apprécier la gêne occasionnée par les trains à grande vitesse ainsi que les conditions d'émission et de propagation du bruit spécifique à ces véhicules, et d'autre part, d'une manière plus générale, pour traiter des problèmes de bruit inhérents à l'exploitation et à l'entretien des voies de chemin de fer.

En effet, l'évaluation de la gêne due au bruit que subissent les riverains de voies routières ou ferroviaires est toujours une question difficile compte tenu de la diversité des situations et des sensibilités rencontrées. Dans le domaine du bruit d'origine routière, la collecte de données par mesures directes et enquêtes psycho-sociologiques auprès des riverains et leur exploitation ont permis de mettre au point un indicateur de la gêne ressentie, le Leq (8h-20h), ainsi qu'un document de référence, comportant des recommandations en matière de niveaux sonores admissibles, le Guide du Bruit des Transports Terrestres. Dans le domaine du bruit d'origine ferroviaire, l'indicateur utilisé a été le même, en considérant, à la lumière de résultats des études de gêne effectuées en particulier par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, qu'une différence de 5 dB(A) pouvait être admise en faveur du bruit ferroviaire par rapport au bruit routier.

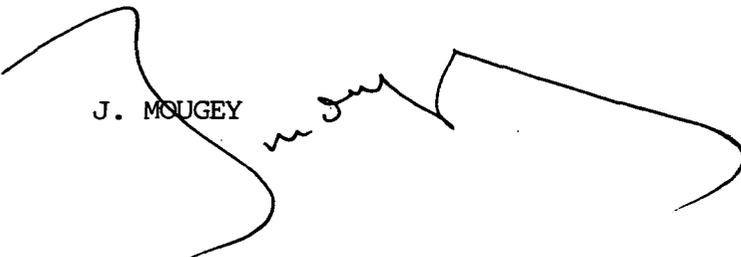
Toutefois, les phénomènes d'émission, de propagation et de perception du bruit émis par les trains dépendent de paramètres et de caractéristiques -principalement une discontinuité marquée au cours du temps- qui diffèrent de ceux du bruit routier et qui conduisent à s'interroger sur la transposabilité des méthodes et des résultats de l'un à l'autre domaine, et à se demander d'une part à quel degré d'appréhension et de représentativité de la gêne effectivement ressentie permet d'accéder la mesure du seul niveau équivalent de bruit (Leq), d'autre part si la tranche horaire choisie pour le bruit routier (8 heures - 20 heures) permet de prendre suffisamment en considération le problème de la gêne nocturne, peut-être davantage ressentie dans le cas du bruit ferroviaire que dans celui du bruit routier.

C'est donc dans ce contexte que le Ministère des Transports (Direction des Transports Terrestres) et le Secrétariat d'Etat chargé de l'Environnement et de la Qualité de la Vie (Délégation à la Qualité de la Vie) ont convenu de créer un groupe de travail interministériel sur le bruit ferroviaire, avec la participation de tous les services et organismes compétents en ce domaine. L'objectif des travaux du groupe est de parvenir à la définition de critères et d'indicateurs pertinents d'appréhension et de mesure du bruit et de la gêne engendrés par les transports par chemins de fer au sens large (trains de voyageurs et de marchandises ; trains classiques et à grande vitesse ; bruit lié au roulement des trains et à l'exploitation des gares, triages, chantiers et appareils de voie ;...). Le groupe s'efforcera également de rechercher une meilleure appréhension du problème des vibrations qui concerne l'ensemble des véhicules sur rail et tout particulièrement le métro et le R.E.R.

Pour ce faire, le groupe, dont le secrétariat a été confié au C.E.T.U.R., a procédé, en premier lieu, à un inventaire des recherches et outils actuellement disponibles, afin de faire apparaître les résultats acquis et les lacunes à combler, et de bâtir un programme d'études complémentaires à moyen terme qu'il serait souhaitable de mettre en oeuvre au cours des une ou deux années à venir. Le récent recensement des points noirs dus au bruit des transports terrestres est de nature à faciliter le choix de sites sur lesquels des études ponctuelles comportant des mesures de bruit ou des enquêtes auprès des riverains pourraient être proposées. Il entre d'ailleurs dans les objectifs du groupe d'examiner de manière approfondie, à la lumière de ses travaux et réflexions généraux, les solutions de traitement qui pourraient être apportées, sur le plan technique et sur celui du montage financier, dans le cas d'un ou deux points noirs du bruit ferroviaire pertinemment choisis, et d'assurer ainsi une signification concrète tant à ses propres travaux qu'au recensement effectué.

Le Chef de la Mission Bruit

J. MOUGEY



Le Chef du Service
des Chemins de Fer

M. NAESSANY



S O M M A I R E

O - SYNTHÈSE	Pages 3
I - LE POINT SUR LES CONNAISSANCES DISPONIBLES	13
I.1 - Bruit ferroviaire	15
. Généralités	17
. Connaissances générales sur le bruit ferroviaire	18
. Aspects spécifiques des matériels "métro" et tramway	35
. objectifs quantifiés pour limiter la gêne des riverains, et protections possibles	42
I.2 - Vibrations dues à la circulation ferroviaire	45
I.3 - Gêne provoquée par le bruit des trains	55
I.4 - Note de rappel : quelques repères sur le bruit routier	67
II - LA NECESSITE DE POURSUIVRE LES REFLEXIONS	83
II.1 - Etudes en cours	85
II.2 - Esquisse d'un programme de recherche	87
- ANNEXE : ELEMENTS D'ACOUSTIQUE	91
- BIBLIOGRAPHIE	97
- COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL	105

S Y N T H E S E

S Y N T H E S E

L'objectif poursuivi lors de la rédaction du présent rapport était de procéder à un inventaire des connaissances disponibles, et de leurs limites, puis de proposer un programme d'études à mener en matière de bruit ferroviaire.

Cet inventaire a pour but de répondre, autant que possible, aux interrogations issues des études préalables au projet de construction du TGV Atlantique sur les méthodes et indicateurs utilisés pour apprécier la gêne provoquée par le bruit, et sur les moyens d'y remédier. Il tente de mettre en lumière les champs de validité de ces méthodes afin de proposer des études dont le résultat permettra de mieux éclairer le choix des aménageurs et Maîtres d'Ouvrages, et de garantir aux riverains des voies de circulation, une situation acoustique acceptable.

Pour étayer une action efficace en matière de réduction du bruit, qu'il soit d'origine routière ou ferroviaire, il est nécessaire de disposer :

- d'une méthode de prévision fiable des niveaux sonores qui seront engendrés par une infrastructure après construction. En effet, l'action curative le long d'une voie existante conduit, dans la plupart des cas, à la mise en oeuvre de protections contraignantes, d'efficacité limitée, et coûteuses. Seule, la prise en compte du bruit, dès la conception du projet permet de trouver les solutions les plus efficaces, les plus élégantes, et les moins coûteuses.
- d'une connaissance suffisante du bruit et des vibrations : principaux phénomènes expliquant leur génération, importance des énergies mises en jeu par les différentes sources élémentaires d'un véhicule, caractéristiques fréquentielles et temporelles de ces bruits, conditions de leur propagation dans les différents sites urbain, péri-urbains et ruraux, afin de mettre en oeuvre des actions susceptibles d'amoinrir ces émissions sonores ou protéger la population de leur propagation:
- d'une connaissance des effets du bruit et des vibrations sur les individus et les populations. Cette connaissance, aussi fiable et précise que possible, qu'elle soit relative aux atteintes physiologiques, à la gêne dans les comportements (en fonction de l'activité exercée), aux perturbations sociales ou sociologiques, permet d'évaluer la gêne prévisible le long des sites exposés au bruit, et de justifier les actions de protection appropriées.
- d'une connaissance de l'ensemble des moyens techniques à engager dans le but de réduire le bruit et d'en protéger tout ou partie des sites les plus exposés. Ces moyens doivent répondre correctement aux sujétions d'efficacité acoustique, de respect des contraintes de sécurité et d'entretien liées à l'exploitation des voies, d'économie des projets, et de bonne insertion dans des sites parfois très urbanisés.

Le présent rapport dresse un inventaire synthétique des principales connaissances disponibles sur ces différents points, et des limites de ces connaissances.

1° - En matière de prévision des niveaux sonores.

Les spécialistes disposent de modèles suffisamment fiables pour prévoir, à partir des données d'exploitation des voies (nombre et types de circulations, vitesses) et des caractéristiques des voies projetées ou existantes, les niveaux sonores qui seront émis, et ceux qui existeront en façade des bâtiments riverains, pour la plupart des sites et configurations de bâtiments. Ces résultats peuvent être acquis avec une précision suffisante pour guider l'action des aménageurs et les décisions des Maîtres d'Ouvrages, et pour concevoir des protections efficaces partout où elles sont nécessaires, même dans le cas de projets où les voies et les bâtiments n'existeraient pas encore.

La précision de ces modèles peut, certes, être encore améliorée. Des écarts peuvent apparaître entre les valeurs calculées, et des valeurs mesurées in situ, du fait notamment :

- . de la pertinence du modèle utilisé par rapport au problème posé. Tous les modèles n'ont pas le même domaine préférentiel d'utilisation, et simplifient parfois certaines conditions de propagation. Le choix du modèle le plus adapté constitue l'une des conditions importantes pour obtenir une bonne précision.
- . de la valeur des données d'entrée. Il existe une grande disparité d'émission sonore entre différents types de matériel, selon leur nature, leurs conditions d'exploitation, leur état d'entretien et d'usure. Pour comparer des résultats calculés et mesurés, il faut s'assurer que la comparaison repose sur des données identiques.
- . de la nature du phénomène que l'on veut représenter. Les calculs sont faits à partir de modèles élaborés en moyennant des milliers de mesures in situ et de laboratoire. Par nature, les calculs permettront d'obtenir une bonne indication sur les valeurs moyennes représentatives de longues périodes. Par contre, ils rendent mal compte de la dispersion possible des niveaux sonores instantanés dus à des événements singuliers, aléatoires (le niveau maximum au passage d'un matériel défectueux par exemple), qui eux, peuvent être bien mis en évidence par la mesure.
- . de la durée des prélèvements et leur capacité à représenter le phénomène que l'on cherche à évaluer. Une mesure acquise sur une durée forcément limitée peut ne correspondre qu'à un état singulier temporaire de l'exploitation d'une voie.

Aussi y a-t-il toujours une incertitude sur sa représentativité à long terme, sauf à réaliser des mesures très longues, et à les compléter par des analyses des conditions d'exploitation des voies sur de longues périodes.

Ceci justifie que des recherches soient poursuivies pour améliorer les modèles, notamment sur les sujets suivants :

- . réflexions multiples dans des sites confinés (sortie de tunnel...)
- . diffraction complexe sur des séries d'écrans,
- . topographie tourmentée à grande échelle,
- . propagation à longue distance, en tenant compte notamment des caractéristiques acoustiques des sols,
- . prise en compte des effets météorologiques dominants et leurs variations instantanées (vent, température...).

Ceci étant, les instruments et méthodes actuels sont d'une précision suffisante, et couvrent suffisamment de situations pour permettre aux Maîtres d'Ouvrages et aux aménageurs d'étayer leurs choix et de mettre en oeuvre des protections efficaces.

2° - En matière de connaissance du bruit

Les spécialistes disposent aujourd'hui d'une banque de données importante, couvrant des situations variées. Ces connaissances leur permettent de prévoir et d'analyser le bruit des principaux types de matériels en circulation sur les voies. Il reste cependant un certain nombre de situations à explorer pour approfondir et étendre ces connaissances :

- . métros et tramways.
- . véhicules circulant à faible vitesse.
- . sites particuliers comme les gares de voyageurs, de triage, qui s'analysent différemment des voies circulées.
- . bruits particuliers (appareils de voies, ponts-rail métalliques, ...).

Par ailleurs, les mécanismes de génération de bruit doivent encore faire l'objet d'approfondissements :

- . part d'énergie rayonnée par les roues, les rails, la caisse des véhicules,
- . dispersion entre types de matériel, et variation en fonction de l'entretien et du vieillissement,

- . composition fréquentielle des bruits (sons purs et spectres),
- . composition temporelle (bruits impulsifs),
- . comportement des véhicules dans les virages (glissements et crissements),
- . effets aérodynamiques à haute vitesse.

3° - En matière de connaissance des effets du bruit

Les enquêtes et études psychosociologiques réalisées entre 1975 et 1980 par les grands organismes de recherche français (I.R.T. et C.S.T.B.) ont permis de bien connaître la réaction des populations face au bruit et de quantifier la gêne ressentie.

A la suite des enquêtes de gêne, il apparaît que l'indicateur le plus pertinent pour prévoir cette gêne est le Leq moyenné sur de longues périodes. C'est en effet l'indicateur qui est le mieux corrélé avec les réponses de gêne et le mieux prévisible (cf. Nota ci-après).

Cependant, les réponses de gêne ont été généralement agrégées, et correspondent à des échantillons représentatifs des populations au sens statistique. Le Leq permet bien d'évaluer la gêne de ces populations. Mais il explique mal, semble-t-il, à l'intérieur d'un tel échantillon, les variations des réponses individuelles.

L'expression de cette gêne individuelle et sa représentation passent probablement par un approfondissement des études physiologiques : atteintes apportées au sommeil notamment, problèmes d'intelligibilité, études des groupes sensibles,...

La connaissance des effets physiologiques du bruit, notamment les atteintes extra-auditives, constitue probablement le domaine sur lequel les chercheurs ont accompli les progrès les plus remarquables au cours des dernières années. C'est celle qui apparaît comme la plus porteuse d'avenir quant à l'approfondissement et l'affinement des connaissances.

Elle devrait aboutir à la mise au point et aux choix de nouveaux indicateurs, qui représenteront mieux certains aspects de la gêne des individus et, corrélativement, à l'édiction de nouveaux seuils plus précis et adaptés à ces nouveaux indicateurs. Ceux-ci, sans remettre en cause le Leq moyenné à long terme utilisé actuellement, devraient permettre de le compléter et de le préciser au regard de situations particulières.

Il est probable, dans l'état actuel des connaissances, que ce seront encore des indicateurs du type Leq qui seront utiles, mais définis sur des bases de temps mieux adaptées aux phénomènes à évaluer.

NOTA : Niveaux Leq et niveau maximal.

Le niveau énergétiquement équivalent, appelé Leq, est un indice relativement complexe qui pose quelques problèmes de compréhension. Il ne correspond pas - comme on le croit trop souvent - à une simple moyenne arithmétique des niveaux sonores instantanés. Il réalise la somme de l'énergie acoustique reçue pendant la durée d'observation et rapporte cette somme à l'unité de temps. A ce titre, le Leq prend en compte tous les bruits émis pendant la période d'observation, notamment l'ensemble des bruits isolés, même s'ils possèdent une faible durée.

Deux exemples permettent d'illustrer sa signification :

1. Un coup de pistolet : à 1 m de la source, le niveau sonore maximum L max. peut atteindre 120 dB (A). Supposons que ce bruit dure 0,2 s. Ce seul bruit, exprimé en Leq (1 heure) sans qu'aucun autre bruit n'apparaisse pendant cette heure, correspond à un Leq (1 h) de 77 dB (A). S'il n'y a aucun autre bruit pendant une période de 12 h (par exemple 8 h - 20 h), le Leq dû à ce seul bruit atteindra 67 dB (A).

2. Autre exemple : Le passage d'un véhicule.

Lorsqu'un véhicule léger passe dans une rue de centre urbain (environ 12 m de largeur), le L max. au passage du véhicule atteint 80 dB (A) pendant 0,2 secondes. S'il n'existe aucun autre bruit pendant 1 heure dans cette rue, au passage de ce véhicule correspondra un Leq (1 heure) = 45 dB (A).

S'il passe deux véhicules de même type, le L max. sera toujours de 80 dB (A), le Leq lui deviendra égal à 48 dB (A). S'il passe 10 véhicules dans l'heure, le L max. sera toujours égal à 80 dB (A), alors que le Leq montera à 55 dB (A).

Pour des niveaux sonores dus à une circulation ferroviaire, on se reportera aux tableaux du § 1.1. ci-après. Il y apparaît que pour un train rapide par exemple, les niveaux max peuvent atteindre 93 dB (A) à 50 m de la voie, ce qui correspond à un Leq (1 heure), s'il n'y a aucun autre bruit émis pendant cette heure, de 68 dB (A), en l'absence d'obstacles protecteurs.

Comme la température maximale indiquée par un thermomètre à maxima, le L_{\max} (niveau maximum du bruit atteint pendant la durée d'observation) ne tient compte ni du nombre de fois où le bruit a atteint cette valeur, ni de la durée pendant laquelle cette valeur a été atteinte. Le Leq lui (défini comme le niveau, exprimé en décibels pondérés A de la somme de l'énergie reçue pendant la durée d'observation) prend en compte l'ensemble des bruits reçus pendant cette période, et tient compte à la fois de leur niveau et de leur durée.

4° - En matière de vibration

De nombreuses données sur les phénomènes vibratoires provoqués par les transports ferroviaires existent, recueillies in situ, en milieu urbain et interurbain. La génération des vibrations, les énergies mises en jeu sont assez bien connues. Par contre, leur transmission par l'intermédiaire des couches constituant les sols, leur transmission à l'intérieur des structures de bâtiments, problèmes très complexes, nécessitent encore des études d'approfondissement.

Les effets des vibrations sont essentiellement de trois ordres :

- gêne par perception auditive des vibrations réémises par les structures ou par les éléments de bâtiments (les vitres notamment). Cette réémission intervient à des niveaux vibratoires faibles.
- gêne par perception tactile directe, mettant en jeu des niveaux vibratoires bien plus importants que les précédents (d'un facteur 10 au moins). Les seuils limites acceptables, de ce point de vue, commencent à pouvoir être situés.
- dommages provoqués aux bâtiments (très supérieurs aux seuils précédents qui interviennent bien avant, sous forme de perception auditive et tactile des vibrations). Ici aussi, les seuils limites ont pu être cernés.

Pour s'assurer que les seuils de gêne ou de risques sont respectés, il faudrait, d'une part, disposer de méthodes de prévision fiables ; d'autre part, approfondir et préciser les effets des vibrations. Il est donc nécessaire que des recherches continuent à être menées dans ce domaine.

5° - En matière de réduction du bruit à la source

Les gestionnaires des voies ont réalisé, au cours des dernières années, d'importants progrès en matière de réduction du bruit à la source :

- grâce à un entretien amélioré du matériel roulant (reprofilage régulier des roues),
- par l'utilisation d'un matériel moderne, mieux conçu et mieux suspendu,
- par une meilleure conception des voies : longs rails soudés, voies posées sur ballast, etc...

Ces actions doivent être poursuivies et une meilleure connaissance des mécanismes de génération du bruit devrait en accroître l'efficacité.

6° - En matière de protection acoustique

Il existe une large gamme de possibilités techniques, d'une efficacité incontestable. Il reste cependant en la matière à approfondir les connaissances pour optimiser encore l'efficacité des protections (écrans acoustiques et isollements de façades) en tenant compte de la spécificité du bruit ferroviaire : spectre en fréquences et angles d'incidence (la source est directive).

Il convient également d'étudier des conditions de mise en oeuvre qui respectent les nécessaires sujétions de sécurité (des voyageurs et des agents assurant l'entretien des voies) et surtout réduisent les coûts autant que faire se peut, afin de multiplier ces protections et de protéger le plus grand nombre de riverains sur les sites exposés.

oooooooooooo
oooooooooooo

Il est aujourd'hui possible d'affirmer que les spécialistes disposent d'une somme de connaissances qui leur permettent d'évaluer, avec une bonne fiabilité, les niveaux sonores et l'efficacité des protections à mettre en oeuvre le long des voies ferrées.

Les modèles de prévision sont fiables et précis. Les indicateurs de gêne, fondés sur des analyses rigoureuses, permettent d'évaluer la gêne prévisible pour les populations et de justifier les actions de nature à y remédier.

Des ouvrages de protections possédant une bonne efficacité (écrans acoustiques) ont été mis au point, qui respectent les nécessaires exigences de sécurité liées à l'exploitation et à l'entretien des voies. Les actions complémentaires de protection que l'on peut développer sur les bâtiments eux-mêmes sont également bien explorées sur le plan technique.

Il reste bien sûr à parfaire ces connaissances :

- en matière d'effets du bruit, afin qu'à partir des progrès acquis récemment sur les effets extra-auditifs (perturbation du sommeil, atteintes physiologiques), il soit possible de mieux appréhender la gêne individuelle ;

- en matière de gêne, afin de mieux comprendre les représentations collectives et individuelles des nuisances, mieux évaluer les perturbations sociales (intelligibilité, communications, tensions dues aux facteurs stressants) provoquées par le bruit ;
- en matière d'indicateurs de façon à proposer des seuils de plus en plus précis, incontestables, qui permettent d'évaluer toutes les situations de gêne et de justifier les actions de rattrapage ;
- enfin, au plan technique, afin de mettre au point des moyens de réduction du bruit à la source (conception et entretien des véhicules, et des voies), et des protections aussi efficaces que possible (réalisation d'écrans acoustiques, isolement de façades).

I - LE POINT SUR LES CONNAISSANCES DISPONIBLES

I.1 - BRUIT FERROVIAIRE

GENERALITES

Sous le vocable "bruit ferroviaire" ou "bruit de voies ferrées" il est généralement question exclusivement du bruit des trains de grandes lignes - rapides, express ou marchandises - et éventuellement des trains de banlieue.

En réalité le domaine du bruit ferroviaire recouvre également le bruit des métros et des tramways. Or ces deux dernières catégories, si elles présentent du fait du roulement acier sur acier certaines analogies avec les matériels SNCF, sont néanmoins assez différentes pour justifier une mention particulière dans ce chapitre où seront examinés successivement :

- un résumé des connaissances générales actuelles sur le bruit ferroviaire,
- les aspects spécifiques des métros et des tramways,
- les objectifs quantifiés pour limiter la gêne des riverains et les protections possibles,
- l'état des études et recherches conduites actuellement dans ce domaine.

I.1.1 - CONNAISSANCES GENERALES EN MATIERE DE BRUIT FERROVIAIRE

Les administrations exploitantes de réseaux ferroviaires en France - notamment la SNCF et la RATP, s'intéressent au problème du bruit ferroviaire depuis de longues années ainsi qu'en témoigne l'existence de divisions acoustiques, depuis les années 50, à la Direction du Matériel de la SNCF et depuis les années 60 à la RATP.

Il est d'ailleurs bon de rappeler la création il y a une douzaine d'années d'un groupe d'études (1) comprenant des représentants des grandes Directions Techniques de la SNCF et de la RATP qui avait pour tâche l'étude des nuisances acoustiques ferroviaires sous divers aspects :

- la naissance du bruit ferroviaire,
- la propagation du bruit et la prédiction de cette propagation,
- la réduction du bruit,
- la perception par les riverains.

I.1.1.1 - PRODUCTION DU BRUIT

I.1.1.1.1 - Zone de contact

Le système de roulement sur voie ferrée crée une zone de contact (ellipse de Hertz) entre roue en acier et rail en acier. L'origine du bruit se situe au niveau de cette zone sans qu'il soit possible d'en donner une explication satisfaisante.

La mise en vibration des organes de roulement et du bogie provoque une émission de bruit très localisée (source ponctuelle), proche du sol, qui est contenue entre caisse et voie et se diffuse essentiellement latéralement aux véhicules.

Par rapport aux extrémités du véhicule, le bruit est de 10 à 15 dB (A) plus faible à mi-distance des bogies sous le milieu de caisse. Cette différence perceptible en un point très proche de la voie disparaît très rapidement et pour une distance de l'ordre de 25 m, il s'opère un lissage des valeurs maximales.

L'émission de bruit dépend évidemment de la voie et de la roue mais différents paramètres peuvent intervenir pour amplifier sa valeur globale en dB (A) ou modifier sa composition spectrale.

(1) Il s'agissait d'une part du Projet A 42 "Nuisances Acoustiques", créé à la SNCF en 1973 avec la participation de la RATP, et du groupe "Lutte contre le bruit", créé à la RATP en 1977 avec la participation de la SNCF.

I.1.1.1.2 - Voie

Les éléments susceptibles d'intervenir concernent :

- la qualité du rail

L'état de surface du rail détermine des excitations primaires plus ou moins importantes responsables du niveau sonore global et de ses fluctuations ; c'est un élément essentiel de qualité du roulement.

- l'armement de la voie

Les conditions de fixation du rail et la nature du revêtement de plate-forme interviennent sensiblement sur le bruit émis.

Le ballast est un élément rugueux et poreux qui constitue un matelas capable d'absorber une partie de l'énergie sonore.

Le type de traverse peut avoir également une influence, la pose sur traverses béton ballast apparaissant comme la moins bruyante.

La pose directe sur dalle est la plus sonore tant par le comportement du rail (sonorité plus métallique) que par l'effet de réverbération et éventuellement de "membrane" du radier béton.

- les appareils de voie et ouvrages d'art

Tout franchissement d'une lacune (joint ou aiguille) se traduit par une percussion, donc un bruit impulsif, dont la brièveté n'est généralement pas prise en compte dans la valeur efficace du niveau global en dB (A) mais dont la perception auditive est subjectivement ressentie.

Les modifications de la plate-forme (cas des ponts) ou de l'environnement immédiat (tunnel) ont une incidence très nette sur le bruit perçu dans le véhicule et à l'extérieur dans le cas des ponts métalliques en particulier.

I.1.1.1.3 - Roulement

- Les organes de suspension et de roulement sont pratiquement les seuls émetteurs de bruit si l'on excepte le cas des engins moteurs.

- Les caisses des véhicules interviennent plutôt comme écrans au bruit sauf dans le cas extrême des wagons métalliques vides.

- Tous les organes semi-flottants liés au châssis de bogie, et probablement la conception même de ce châssis, peuvent avoir et ont souvent

une influence déterminante sur le bruit résultant. Les timoneries de frein ou les masselottes du frein électromagnétique peuvent émettre des vibrations constamment perceptibles à l'intérieur ou à l'extérieur du véhicule en dehors des périodes de service, c'est-à-dire pendant la plus grande partie d'un parcours.

- La qualité de la table de roulement des roues monoblocs actuellement utilisées a bien entendu une grande importance. La détérioration de cette surface de contact par apparition de méplats, exfoliations par exemple, accroît l'intensité du bruit émis. La qualité de la table de roulement est un élément essentiel au même titre que la qualité du rail.

Le nombre total des sources ponctuelles d'un train intervient également dans le bruit total mais dans la limite de 3 dB si l'on admet qu'un véhicule ne peut avoir que 2 ou 4 essieux.

I.1.1.1.4 - Paramètres d'influence directe et complémentaire

En dehors des composants intrinsèques précédemment définis qui concernent les éléments du système, on peut considérer :

- le type de matériel

Les matériels correspondent en effet à des utilisations particulières qui peuvent être résumées en 4 catégories : voyageurs, messageries, marchandises, matériel à petit gabarit (métro ou tramways).

Les éléments de construction, fonction de l'usage prévu, interviennent sur les organes de roulement (bogies ou essieux) et sur la caisse (métallique fermée, ouverte, à éléments mobiles, etc...).

Ces considérations sont implicitement prises en compte avec la vitesse.

- la vitesse

Le bruit augmente avec la vitesse. La variation est proportionnelle au cube du rapport des vitesses.

Si le niveau sonore instantané est L_0 à la vitesse V_0 et L_1 à la vitesse V_1 on constate que :

$$L_1 = L_0 + 30 \log \frac{V_1}{V_0}$$

si $V_1 = 2 V_0$, par exemple, il vient $L_1 = L_0 + 9 \text{ dB (A)}$

- la charge

Il apparaît que le bruit de roulement n'est pratiquement pas lié à la charge du véhicule. L'effet secondaire qui peut intervenir à distance concerne les structures de caisse, dont les vibrations peuvent être plus ou moins amorties par un chargement. Dans le cas des wagons métalliques à marchandises, on constate plutôt une diminution du bruit à distance dans le cas des wagons chargés.

- les effets complémentaires produits par :

- . les éléments bruyants embarqués sur les engins moteurs électriques ou thermiques (ventilateurs, moteurs, compresseurs) ainsi que les circuits d'aspiration et d'échappement, pour les engins thermiques,
- . le fonctionnement des auxiliaires à l'arrêt (groupes électrogènes, générateurs, de climatisation, de chauffage),
- . les circulations en courbes de faible rayon (phénomène du crissement dans les courbes),
- . les systèmes de freinage dont la mise en oeuvre peut, dans certains cas, en particulier avec des sabots fonte, faire apparaître des grincements de haut niveau sonore.

I.1.1.1.5 - Résultats

Le bruit de roulement peut être relevé sous la caisse près d'un essieu (micro embarqué). Il apporte alors la connaissance des qualités d'une voie pour un bogie donné. Il peut également être relevé entre rails (micro fixe), et donne alors en un point donné de la voie, la "lecture" du passage des différents bogies ou essieux (et à la même vitesse) de tout un train de véhicules.

Tableau 1 - Valeurs moyennes du bruit de roulement mesuré sous bogie d'un train "grandes lignes"

Vitesse km/h	Niveau sonore dB(A)	Dispersion minimum dB(A)
80	108	+ 3 - 3
140	115	+ 3 - 3
210	120	+ 3 - 3
300	125	+ 3 - 3

Tableau 2 - Influence de la voie sur le bruit de roulement

Armement de la voie	Variation dB(A)
- barres normales + traverses bois + ballast	référence 0 dB (A)
- Longs rails soudés (LRS) + traverses béton + ballast	- 6 dB (A)
- LRS + traverses bois + ballast	- 3 dB (A)
- LRS sur dalle (pose directe)	+ 1 à 4 dB (A)

Tableau 3 - Influence des qualités de la voie (du rail) et de la roue

- <u>Voie</u>	
. très bonne qualité (neuve ou après meulage)	référence minimum
. voie médiocre	+ 10 dB(A)
. usure ondulatoire caractérisée	+ 15 dB(A)
- <u>Roue</u>	
. roue après reprofilage	référence minimum
. limite de dispersion pour un même type de matériel et une même vitesse	10 dB(A)

Remarque: Il est bien évident que tous les gains précédemment indiqués ne sont pas cumulables.

On peut retenir que si la valeur globale du bruit de roulement à 140 km/h est de 115 dB(A) la conjonction supposée de toutes les circonstances favorables ne réduira pas la valeur de ce niveau sonore à moins de 108 à 106 dB(A).

I.1.1.2 - PROPAGATION DU BRUIT FERROVIAIRE

I.1.1.2.1 - Bruit au passage d'un train - Lmax -

Les nombreuses mesures effectuées en champ libre avec des trains de composition et de vitesse très variées en différents points de voie ont permis de proposer une loi expérimentale de propagation aérienne du bruit des trains.

Pour simplifier les calculs, les éléments géométriques d'atténuation (longueur et type de trains) ainsi que les effets d'absorption par l'air ont été intégrés dans un seul coefficient dont la valeur a été fixée expérimentalement et qui intervient dans l'équation :

$$LdB(A) = L_0 - k \log \frac{D}{D_0}$$

L et L_0 niveaux sonores respectivement aux distances D et D_0 .

On obtient alors une loi simple pour prédéterminer, au passage d'un train, le niveau sonore LdB(A) à une distance D de l'axe de la voie et une vitesse V km/h connaissant les caractéristiques L_0 et V_0 à une distance de référence D_0 (par exemple 25 m).

$$LdB(A) = L_0 \text{ dB(A)} + 30 \log \frac{V}{V_0} - k \log \frac{D}{D_0}$$

La valeur du coefficient k est d'autant plus voisine de 10 que le train est plus long (propagation cylindrique) et de 20 qu'il est plus court (source ponctuelle).

- k = 12 marchandises, messageries (trains longs)
- k = 15 commerciaux classiques (longueurs moyennes)
- k = 20 engin isolé (ou autorail).

Cette loi paraît applicable de façon satisfaisante jusqu'à 250 m de la voie, pour des vitesses comprises entre 80 et 300 km/h, et des circulations en champ libre sur longs rails soudés posés sur traverses béton et ballast.

Au-delà de 250 m, il est rare d'être en champ libre et le bruit ambiant prend une importance croissante.

Résultats

Les niveaux maximaux sont indiqués avec une approximation de 2 dB(A) pour tenir compte de la qualité des voies.

Désignation du matériel	Vitesse km/h	Niveaux max. en dB(A)			
		7,50 m	15 m	25 m	50 m
<u>Trains commerciaux</u>					
. TGV	270	105	100	97	93
. rapides	200	104	100	97	93
. express	140	97	94	92	88
. messageries	100	96	92	89	85,5
. marchandises	80	93	89	86	82,5

Tableau 4 - Valeurs caractéristiques en dB(A) des niveaux sonores à distance pour différents trains, à différentes vitesses

Par rapport au bruit sous bogie, (de valeur moyenne 115 dB(A) \pm 3 dB(A) à 140 km/h) l'atténuation en fonction de la distance à l'axe voie est d'environ :

- . 20 à 25 dB(A) à 7,50 m de l'axe voie
- . 25 à 30 dB(A) à 25 m
- . 30 à 35 dB(A) à 50 m
- . 35 à 40 dB(A) à 100 m
- . 40 à 50 dB(A) à 250 m

I.1.1.2.2 - Niveau équivalent L_{eq}

Le paragraphe ci-dessus indique comment estimer le niveau sonore maximum L_{max} émis par un train circulant à la vitesse V , et perçu par un récepteur situé à une distance d de l'axe de la voie.

Cependant, la connaissance du niveau sonore maximum ne suffit pas pour l'analyse du bruit des trains. En effet, le bruit du train fluctue au cours du temps. Comme pour le bruit routier, il est nécessaire pendant une longue période d'établir une moyenne du niveau sonore perçu par le récepteur.

L'indicateur conventionnellement retenu comme étant le mieux corrélé avec la gêne, est le niveau acoustiquement équivalent L_{eq} .

Le L_{eq} tient compte non seulement des niveaux sonores instantanés, mais également du temps d'exposition au passage d'un train. Il dépend donc de la signature temporelle de l'émission sonore.

C'est le niveau de la somme de l'énergie acoustique reçue pendant la période considérée, exprimé en décibels pondéré A - (voir l'annexe "éléments d'acoustique" ci-après).

I.1.1.2.21 - Temps d'exposition

Le temps d'exposition d'un récepteur à un bruit de train est, en toute rigueur, égal à la durée qui sépare l'instant d'apparition du bruit et l'instant de sa disparition.

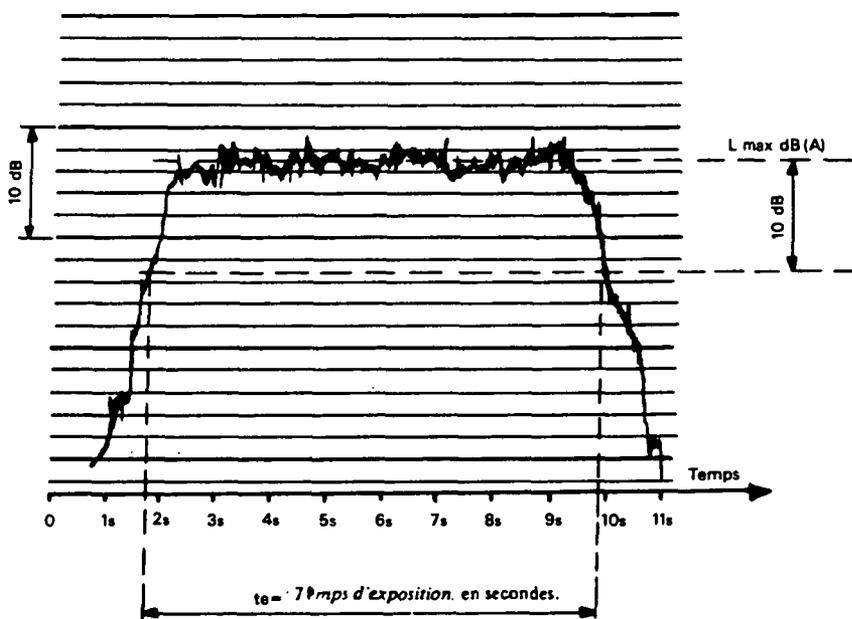
On conçoit aisément que l'apparition du bruit du train dépend de l'ambiance sonore générale qui règne en un lieu ; dans une ambiance calme le bruit apparaît très tôt, et dure longtemps ; à l'inverse, dans une ambiance bruyante, le bruit apparaît peu de temps avant le passage du train et dure peu.

Il a donc été nécessaire d'établir une convention indépendante du lieu où l'on se situe pour l'étude des bruits de trains.

a) Convention

Par convention, le temps d'exposition est défini comme le temps pendant lequel on perçoit un niveau sonore au moins égal au niveau maximum, diminué de 10 dB(A).

Pour une signature temporelle quelconque, le schéma suivant précise la notion de temps d'exposition :



Temps d'exposition.

b) Formule de calcul du temps d'exposition

A partir de nombreuses campagnes de mesures in situ sur tous types de voies et tous types de trains, la SNCF a montré que le temps d'exposition était fonction de la longueur du train, de sa vitesse et de la distance du récepteur à l'axe de la voie.

Le temps d'exposition augmente si la longueur du train augmente et si la distance du récepteur à l'axe de la voie augmente. A l'inverse, le temps d'exposition diminue si la vitesse augmente.

Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment a indiqué une formulation rigoureuse du temps d'exposition, en fonction de la longueur du train (l) (en mètres), de la vitesse (V en mètres par seconde) et de la distance du récepteur à la voie d (en mètres):

$$t_e = \frac{l}{V} \sqrt{\left(\frac{2d}{l}\right)^2 + 1}$$

Il en a tiré la formule approchée suivante : $t_e = \frac{l}{V} + \frac{6d}{100}$

Récemment, KURTZWEIL a préconisé l'expression suivante (qui équivaut à la formule approchée du CSTB, si l'on considère que la vitesse est égale à $V = 20$ m/s)

$$t_e = \frac{l}{V} \left(1 + 1,2 \frac{d}{l}\right)$$

L'approximation de la formule simplifiée par rapport à la formule rigoureuse conduit à surestimer légèrement le temps d'exposition (quelques dixièmes de seconde sur un train moyen ayant une durée d'environ 12 secondes). Par contre, la formule simplifiée est d'un usage sensiblement plus aisé que la formule rigoureuse.

C'est pourquoi la SNCF préconise l'utilisation de la formule suivante qui sera utilisée pour la prévision des niveaux sonores :

$$t_e = \frac{l}{V} + \frac{6d}{100}$$

où l est la longueur du train en mètres,

t_e s'exprime en secondes,

V vitesse du train en mètres par seconde,

d distance, en mètres, de l'observateur à la voie.

On pourra préférentiellement utiliser la formule :

$$t_e = 3,6 \cdot \frac{l}{V} + 6 \frac{d}{100}$$

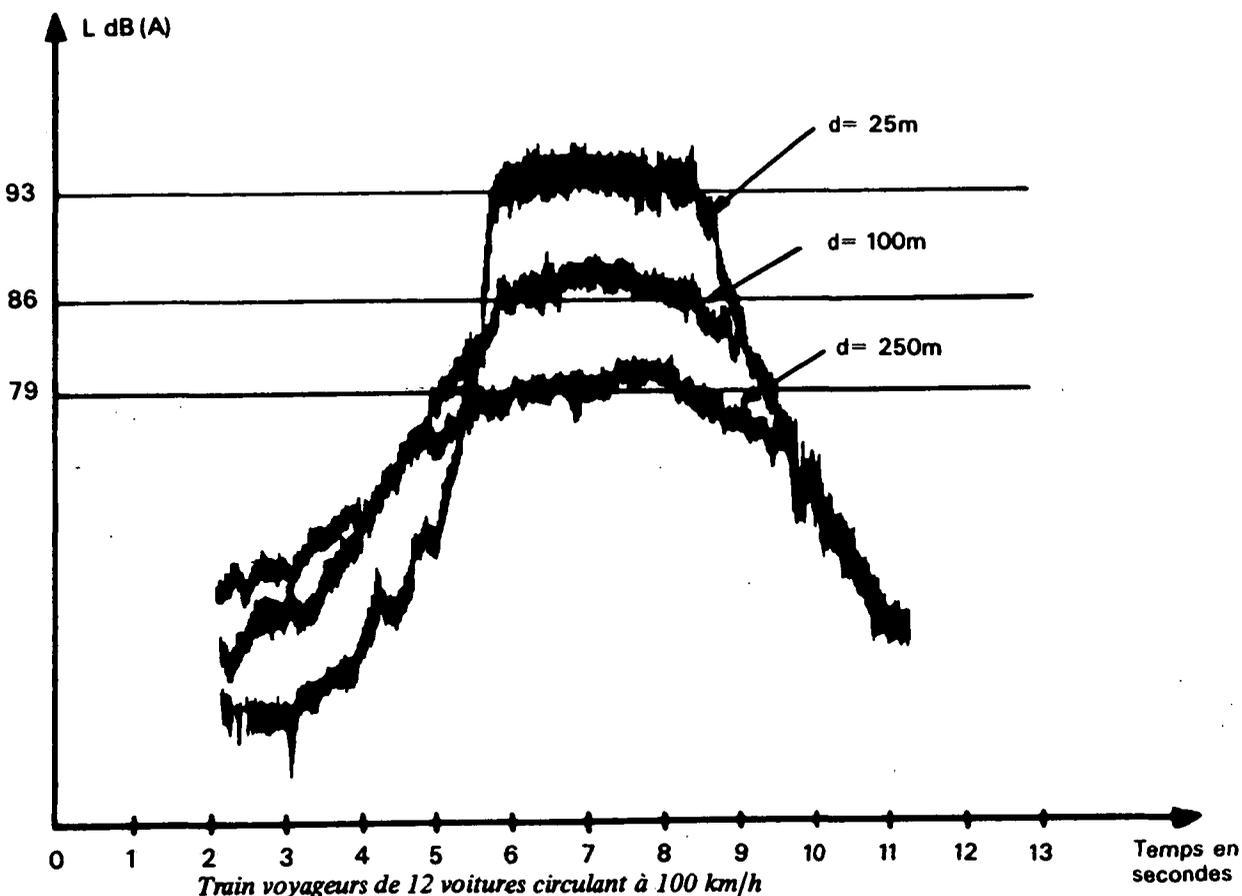
avec V en km/h.

Le temps d'exposition t_e intervient dans le calcul du niveau équivalent L_{eq} . La loi de décroissance de ce dernier en fonction de la distance est donc moins rapide que celle du niveau de crête (il est en effet à noter que dans le calcul du L_{eq} à partir du t_e et du L_{max} , le terme en $1/V$ s'annule avec celui du L_{max} . - voir ci-après).

c) Signatures acoustiques

Contrairement au bruit routier, la signature temporelle du bruit au passage d'un train est relativement stable. Elle comporte toujours une croissance plus ou moins rapide, un palier plus ou moins long suivi d'une décroissance du niveau sonore.

A titre d'exemple, on trouvera ci-dessous la signature temporelle au passage d'un train de voyageurs pour un récepteur situé à 25 mètres, à 100 mètres ou à 250 mètres de l'axe de la voie.



I.1.1.2.22 - Calcul du Leq

a) Formules de calcul en champ libre

Le calcul du Leq d'un passage d'un train sera effectué à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Leq} = 10 \log \left[\frac{t_e}{T} \cdot 10^{\frac{L_{\max}}{10}} \right]$$

avec: t_e = temps d'exposition en secondes (paragraphe ci-dessus)

T = durée pendant laquelle on veut calculer le Leq en secondes

L_{\max} = niveau sonore maximum au passage d'un train (paragraphe 2.1 ci-dessus).

Le Leq correspondant au passage d'un train par heure par exemple, sera calculé à partir de la formule suivante :

$$\text{Leq} = 10 \log \left[\frac{t_e}{3600} \cdot 10^{\frac{L_{\max}}{10}} \right]$$

b) Atténuation en distance

Dans la formule générale de calcul du Leq ci-dessus, la décroissance du niveau sonore en fonction de la distance d est prise en compte de façon implicite : elle intervient à la fois dans le calcul du niveau sonore maximum L_{\max} (loi de décroissance en $-k \log \frac{d}{d_0}$) et dans le calcul du temps d'exposition du récepteur

$$(t_e = \frac{3,6 \cdot d}{V} + \frac{6 \cdot d}{100}).$$

Ainsi, la formule générale permet de connaître le niveau sonore en tout point situé à une distance d de la voie.

Exploration d'un site :

Lorsque l'on désire faire un calcul en de nombreux points récepteurs, situés à des distances variables de la voie, sur un même site, il peut être commode d'éviter de calculer pour chaque récepteur le L_{\max} et le t_e . Dans ce cas, il est recommandé de procéder de la façon suivante :

- calculer le niveau sonore Leq à partir de L_{\max} et de t_e , en un point récepteur de référence situé à une distance $d_0 = 25 \text{ m}$;

pour tout point récepteur exposé au bruit de la voie ferrée de façon analogue au point de référence, déduire le niveau sonore $Leq(d)$ à la distance d , de celui calculé à 25 mètres, à partir de la formule suivante :

$$Leq(d) = Leq(25\text{ m}) - 13 \log \frac{d}{25}$$

- si l'on a choisi une distance de référence d_0 égale à 15 mètres ou à 7,5 mètres, on aura :

$$Leq(d) = Leq(d_0) - 13 \log \frac{d}{d_0}$$

A titre d'exemple, le tableau ci-dessous donne le niveau équivalent, pour une circulation à l'heure des divers trains figurant au tableau 4 :

Désignation du matériel	Vitesse km/h	Longueur m	Niveaux en dB(A) à 50 m	
			Lmax	Leq
<u>Trains commerciaux</u>				
. TGV	270	200	93	65
. rapides	200	400	93	68
. express	140	400	88	64
. messageries	100	450	85,5	63
. marchandises	80	450	82,5	61

c) Correction façade

Il est à noter que le résultat précédent est obtenu en champ libre.

Pour connaître le niveau sonore en façade, il suffit de rajouter 3 dB(A) au résultat.

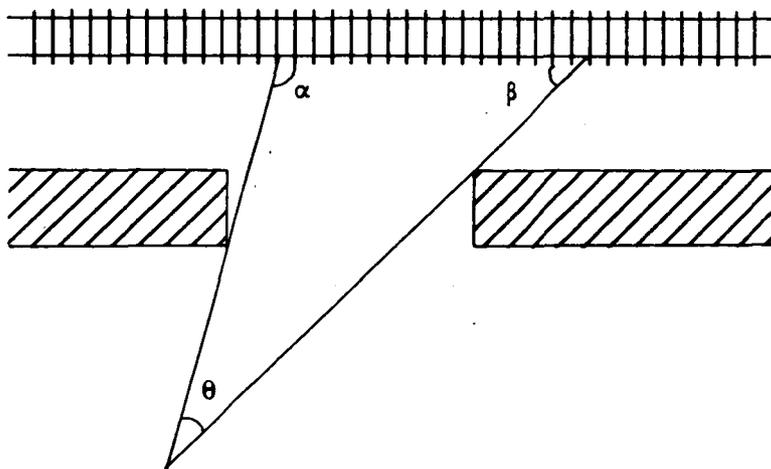
Le niveau sonore ainsi trouvé représente alors le Leq à 2 mètres en avant d'une façade d'un bâtiment quelconque, quelle que soit son orientation par rapport à la voie.

Cependant, dans le cas d'une façade non parallèle à la voie, le récepteur ne reçoit plus qu'une partie de l'émergence sonore de la source. Il y a lieu alors de tenir compte d'une correction d'extension finie.

d) Effet d'extension finie

Lorsque un récepteur est situé de façon telle que des bâtiments ou obstacles lui masquent partiellement la source sonore, et qu'il ne voit la voie ferrée que sous un angle ou une somme d'angles égale à θ , il est nécessaire d'appliquer, comme pour le bruit des routes, une correction d'extension finie. Cette correction est cependant différente de celle utilisée pour la route. Supposons qu'un récepteur situé à la distance d d'une voie ferrée perçoive un niveau sonore $L(180^\circ)$ alors qu'il est exposé à la voie sous un angle de 180° . Le même récepteur, situé à la distance d et qui ne verrait plus la voie ferrée que sous un angle θ aurait le niveau sonore suivant :

$$L(\theta) = L(180^\circ) - 10 \log \left(\frac{\cos \alpha + \cos \beta}{2} \right)$$



: Correction d'extension finie.

I.1.1.3 - METHODES et PROGRAMMES de CALCUL

I.1.1.3.1 - Méthode PROPAG

La méthode PROPAG a pour but d'évaluer les niveaux sonores et les spectres des bruits ferroviaires perçus en tous les points d'un plan vertical perpendiculaire à la voie ferrée. Elle ne saurait donc s'appliquer que dans les sites où les différentes coupes en travers n'évoluent que lentement le long de la ligne ferroviaire.

a) Principe de la méthode PROPAG

En partant de la source sonore caractérisée par son spectre, relevé expérimentalement, on étudie comment évolue chacune des 31 bandes de fréquences le composant (31 tiers d'octave de 16 Hz à 16000 Hz), puis on recompose le spectre au niveau du récepteur. Il est alors possible de déterminer les niveaux globaux perçus, et ce, dans l'unité choisie. Ces deux dernières opérations, recombinaison du spectre et calcul des niveaux globaux, sont effectuées pour chaque point du plan constituant la section.

b) Paramètres pris en compte

Ils concernent :

- La circulation ferroviaire :

- . spectre d'émission relevé à une distance d de la voie et pour une vitesse v ,
- . longueur du train,
- . vitesse v .

- Le site :

- . plaine, remblais, tranchée,
- . distance du pied du talus à la voie,
- . distance de l'arête de la tranchée ou du remblai à la voie,
- . éventuellement nombre d'écrans, hauteur et distance à la voie.

On conçoit donc que pour la mise en oeuvre de ce programme de calcul il faut disposer d'un plan détaillé et d'un certain nombre de coupes précises du site à étudier.

- Le type des résultats souhaités :
 - . spectres et unités,
 - . niveaux globaux dans les unités choisies ou Leq,
 - . affaiblissements apportés par telle ou telle modification du site.

c) Résultats

Les résultats de calculs effectués par le programme informatique issu de la méthode PROPAG peuvent être délivrés sous plusieurs formes :

- un tableau donne les niveaux maximums ou le Leq en différentes unités,
- un tracé sur listing donne l'évolution du spectre en 1/3 d'octave,
- un tableau donne les affaiblissements apportés par telle ou telle solution par rapport à une situation donnée.

I.1.1.3.2 - Méthode SETRAFER

a) Principe de la méthode SETRAFER

La méthode SETRAFER étant tridimensionnelle et permettant d'étudier le bruit émis lors de la circulation d'un train dans un site, on conçoit qu'il faut définir les diverses positions successives (génération géographique des positions de train) et préciser pour chacune d'elle les paramètres des sources de bruit correspondantes (génération acoustique des sources de bruit).

Génération géographique des positions de train :

Pour ce faire on dispose les milieux du train sur la voie lorsque celui-ci parcourt le site. Ceux-ci sont définis par l'intersection de la ligne figurant la voie ferrée avec un faisceau de droites issu du récepteur.

Génération acoustique des sources de bruit :

Les milieux de train étant fixés, on évalue pour chaque position l'angle sous lequel est vu le train depuis le récepteur. Suivant les valeurs prises par cet angle, le train est remplacé par un certain nombre de sources ponctuelles également réparties sur la longueur du train (1 à 10 sources en raison directe de l'ouverture de l'angle).

A ce stade, on détermine la puissance sonore émise par chacune des sources. Le spectre est découpé en 4 ondes pures (250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz) et l'énergie portée par chacune de ces ondes est une donnée à fournir qui est choisie selon le type du train considéré.

En ce qui concerne l'étude de la propagation, la méthode SETRAFER est strictement identique au plan des principes à la méthode PROPAG.

b) Paramètres pris en compte

Les paramètres nécessaires à la mise en oeuvre de la méthode SETRAFER sont de deux types :

- paramètre train :
 - . type (TGV ou train classique voyageurs ou autre),
 - . vitesse,
 - . longueur.
- paramètres topographiques permettant de définir :
 - . le tracé de la voie,
 - . le sens de circulation,
 - . les différents obstacles (50 au maximum),
 - . la position des récepteurs (70 au maximum répartis dans trois plans horizontaux).

Comme pour l'application de la méthode PROPAG, la mise en oeuvre de SETRAFER demande que l'on dispose d'un plan de site à échelle convenable et de quelques coupes caractéristiques.

c) Résultats

Les résultats peuvent être obtenus, soit sous forme de tableau, et l'on indique dans ce cas la dispersion à attendre pour différents trains de même type, soit sous forme de tracé de la signature sonore, c'est-à-dire de l'évolution du niveau de bruit perçu en fonction du temps.

Enfin, le programme SETRAFER calcule automatiquement le niveau sonore équivalent Leq correspondant à une circulation par heure. Il est alors possible de calculer le Leq pour une période de T_1 à T_2 en appliquant la formule :

$$Leq (T_1 \text{ à } T_2) = Leq (1 \text{ h}) + 10 \log N - 10 \log (T_2 - T_1)$$

N étant le nombre total de circulations identiques à celles prises en compte dans le calcul, pendant la période de temps $T_2 - T_1$.

I.1.1.3.3 - Modèle développé par le C.S.T.B.

Une autre méthode de calcul a été proposée par le CSTB. Cette méthode qui est résumée ci-dessous envisage non seulement l'estimation du bruit de roulement, mais également le bruit aérodynamique pour les trains très rapides.

A vitesse normale, on se contente de prévoir le bruit de roulement : compte tenu de l'effet de l'absorption du son par l'air sur la propagation du bruit et compte tenu de la dureté des roues, le niveau de pointe dû au passage d'un train, à une distance d en mètres du premier rail, peut s'écrire, en zone dégagée :

$$L_{\max} = 45 - 13 \log d - 5 \log \left[\left(\frac{2d}{\ell} \right)^2 + 1 \right] - 10 \log \operatorname{th} \frac{d}{2e} + 30 \log V + 10 \log \frac{a}{b}$$

ℓ	étant le longueur de train en m
V	la vitesse du train km/h
e	le distance moyenne entre bogies (ou essieux) (10 m en moyenne)
$a = 1$	longs rails soudés
$a = 1,5$	rails à joints alternés
$a = 3$	rails traditionnels
$b = 0,5$	wagon bruyant
$b = 1$	wagon ordinaire
$b = 3$	wagon silencieux
$b = 6$	wagon très silencieux

Le niveau L_{eq} pour un train par heure s'écrit :

$$L_{eq} = 15 - 13 \log d + 10 \log \frac{a}{b} \cdot \ell \cdot v^2$$

Pour un trafic composé de n trains, on aura :

$$L_{eq} = 15 - 13 \log d + 10 \log a \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\ell_i v_i^2}{b_i}$$

Lorsque le train circulera à très grande vitesse il faudra ajouter le bruit aérodynamique.

Le niveau de pointe dû au bruit aérodynamique s'écrit :

$$L_{\max} (\text{aéro}) = 55 \log V + 10 \log h - 10 \log d + 10 \log \left[\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\ell}{2 \cdot d} + \frac{1}{2} \operatorname{arc} \sin \left(2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\ell}{2 \cdot d} \right) \right] - 37$$

h étant la hauteur moyenne du train en mètres.

Le niveau acoustique équivalent pour un passage de train par heure s'écrit, pour le bruit aérodynamique seul :

$$L_{\max} (\text{aéro}) = 45 \log V + 10 \log \ell + 10 \log h - 10 \log d - 65$$

Soit pour un trafic de n trains :

$$L_{eq} \text{ (aéro)} = 10 \log \sum_{i=1}^n \left[v^{4,5} \cdot \ell \cdot h - 10 \log d - 65 \right]$$

I.1.2 - ASPECTS SPECIFIQUES DES MATERIELS "METRO" ET "TRAMWAYS"

I.1.2.1 - LE BRUIT DES METROS

I.1.2.1.1 - Métros en aérien

En ce qui concerne les sections de lignes à l'air libre, qu'elles soient au niveau du sol ou bien en viaduc/remblai, le comportement acoustique est identique à celui des chemins de fer développé dans le chapitre précédent. Toutefois, le niveau du bruit rayonné en champ libre dépendant des vitesses d'exploitation, on relève les niveaux maximum suivants sur le réseau ferré de la RATP :

Matériel	Vitesse km/h	Niveaux max. en dB (A)	
		7,5 m	25 m
Petit gabarit : MF 67/ MF 77	66	79	73
Grand gabarit : MI 79/MS 61	80	83	77

I.1.2.1.2 - Métros souterrains

En agglomération dense les métros sont le plus souvent réalisés en souterrain à proximité des fondations d'immeubles (pour certains tronçons ils sont même directement sous les immeubles). Le roulement des voitures sur les rails provoque des vibrations qui se propagent vers l'extérieur et s'accompagnent chez les riverains d'un grondement sourd plus ou moins perceptible à chaque passage.

I.1.2.1.2.1 - Sources du bruit

Les perturbations provoquées par les métros souterrains à roulement classique proviennent :

I.1.2.1.2.1.1 - Du roulement des rames

Il s'agit alors d'un grondement sourd accompagnant des vibrations de basse fréquence. Les riverains se disent gênés par le bruit qui ne cesse que pendant une courte durée de la nuit (entre 1 h et 5 h pour le métro parisien) quand il n'est pas prolongé par celui des trains de travaux, pendant l'interruption de service. Souvent ils mentionnent les vibrations qui feraient trembler les vitres ou déplacer les objets sur les étagères. Parfois ils estiment que les vibrations seraient assez fortes pour provoquer des dommages aux immeubles.

Ces perceptions se trouvent accrues dans des proportions pouvant aller jusqu'à 10 dB lorsque les roues présentent des défauts de roulement caractérisés. Les reprofilages des roues interviennent en moyenne tous les 150 000 à 450 000 km selon les lignes et les types de matériels roulants. Environ 50 % de ces opérations sont effectuées sur signalements pour défauts de roulement.

I.1.2.1.2.1.2 - Des irrégularités de la voie :

La plupart des voies du métro sont désormais posées en Longs Rails Soudés (LRS).

Cependant, la probabilité d'apparition d'une gêne chez le riverain est accrue au droit des points singuliers ; ainsi en est-il des lacunes d'appareils de voie et des joints de signalisation.

L'usure des rails, surtout l'usure ondulatoire qui apparaît dans les courbes de faible rayon, provoque également un accroissement de l'énergie transmise.

I.1.2.1.3 - Particularités des bruits de métro

En ce qui concerne la somme d'énergie, ou le niveau énergétiquement équivalent L_{eq} , compte tenu de l'homogénéité du matériel roulant sur une ligne, des caractéristiques d'exploitation, et de la vitesse constante, découlant du pilotage automatique, en un point donné de la ligne, on l'obtient sur l'intervalle 8 h - 20 h à partir du niveau maximum $L_{A \max}$ en un point donné par la relation approchée.

$$L_{eq} (8h - 20h) = L_{A \max} - 15 \pm 2 \text{ dB(A)}$$

Cette formule permet d'obtenir aisément un ordre de grandeur du niveau sonore L_{eq} provoqué par une circulation de métro (formule fournie par la R.A.T.P.)

Les métros à roulement sur pneumatiques en voies souterraines n'engendrent pas de vibrations détectables.

Les vibrations mesurées dans les immeubles n'atteignent jamais les seuils susceptibles de provoquer des dégâts matériels minimes. A titre d'exemple, les niveaux les plus forts relevés chez un riverain ne dépassaient pas 0,5 mm/s à 50 Hz.

I.1.2.1.4 - Améliorations techniques envisageables

Depuis de nombreuses années les exploitants de lignes souterraines et en particulier la RATP ont encouragé les recherches visant à la réduction, à la source, des bruits et vibrations.

I.1.2.1.4.1 - Matériel roulant

Les nouvelles générations de matériel ont intégré des améliorations pour le confort des voyageurs et la protection des riverains (le pilotage automatique, l'anti-enrayage, les sabots composites, etc...).

Des recherches nouvelles sont menées pour augmenter les qualités de roulement. Sont à l'étude des essieux orientables qui auraient pour avantage une meilleure inscription en courbe, ce qui limiterait l'apparition de l'usure ondulatoire.

NOTA : Il convient de rappeler que le roulement sur pneumatiques est pour l'instant la meilleure solution pour limiter la propagation de vibrations.

I.1.2.1.4.2 - Poses de voie

La pose ballast classique, qui est la plus répandue sur les voies de la RATP, réalise un filtre de vibrations de médiocre qualité.

Solutions curatives :

La RATP a mis au point des techniques permettant de limiter les propagations et les utilise au droit des immeubles gênés :

- semelles sous traverses : un matériau élastique interposé entre ballast et traverses permet actuellement une atténuation de l'ordre de 5 à 10 dB chez le riverain ;

- tapis sous ballast : un matériau élastique est interposé entre le radier du tunnel et le ballast, l'atténuation est un peu plus forte que précédemment avec un tapis constitué des bandes de roulement de pneumatiques usagés (solution particulièrement économique).

Solutions préventives :

Lors de la création de lignes souterraines nouvelles ou lors du renouvellement de la voie dans des zones faisant l'objet de nombreuses réclamations, la RATP a décidé d'utiliser systématiquement des techniques de pose directe sur béton à double étage élastique :

- la pose STEDEF permet une atténuation par rapport à une pose classique sur ballast de l'ordre de 10 dB ;
- la pose sur dalles flottantes qui ajoute à la précédente un troisième étage élastique est la plus performante actuellement (atténuation de 15 à 20 dB). Son coût élevé la limite à des opérations ponctuelles.

Singularités de la voie :

La pose en long rails soudés supprime les chocs aux joints de rails. Des études sont faites sur les joints de signalisation pour supprimer les nuisances. Des recherches sont effectuées avec les constructeurs pour supprimer les lacunes des appareils de voie par des systèmes à coeur mobile ou à patte de lièvre flexible.

I.1.2.1.4.3 - Utilisation des propriétés du sous-sol

Comme suite aux recherches menées avec des centres extérieurs dans le domaine de la propagation des vibrations en sous-sol, et bien que les études aient conclu que les solutions les plus efficaces étaient celles qui agissaient à la source (le matériel et les poses de voie), la RATP a adopté le principe, pour les futures extensions du réseau, d'examiner les projets en fonction de la nature des sols.

L'étude préalable d'implantation devrait donc comporter une simulation, permettant d'estimer les niveaux vibratoires engendrés par l'exploitation (avec l'incertitude liée au caractère complexe du phénomène).

I.1.2.2 - LE BRUIT DES TRAMWAYS

I.1.2.2.1 - Avant-propos

Le très faible nombre de villes françaises disposant d'un réseau de tramways explique en partie que peu d'études particulières aient été réalisées sur le bruit de ce type de transport urbain.

Dans le cadre général de la lutte contre le bruit, celui des tramways constitue une préoccupation nouvelle qui nécessite un travail de recherche d'assez longue haleine, sauf à considérer qu'il est possible d'utiliser l'acquis de connaissances en la matière dont disposent certains partenaires européens (Suisse, Bénélux, Allemagne Fédérale).

I.1.2.2.2 - Terminologie

Dans le cadre d'un travail préparatoire effectué à BRUXELLES, avec l'Union Internationale des Transports Publics, qui semble disposer d'une bibliothèque importante, il est apparu que se posait un problème de terminologie.

En effet, dès le début de ses travaux, la Commission Internationale des métros légers, créée en mars 1978 à BRUXELLES, a recherché une définition internationale du "métro léger" et, après longues discussions un accord a débouché pour utiliser, sur le plan international, les termes suivants :

- "light rail", en anglais ;
- "métro léger", en français,
- "Stadtbahn", en allemand.

Ensuite la Commission s'est attachée à définir le concept de "métro léger" et un consensus s'est dégagé pour englober, sous ce terme générique :

"tous les moyens modernes de transports publics urbains sur rails, à l'exclusion du métro classique".

Dans ces conditions il semble bien que les tramways fassent partie de la famille des "métros légers", en constituant le premier échelon de celle-ci.

C'est d'ailleurs sous ce vocable que l'U.I.T.P. possède une documentation abondante dont l'inconvénient est qu'elle est surtout rédigée en langue allemande ou anglaise.

I.1.2.2.3 - Niveaux sonores

Différentes mesures effectuées en Europe permettent de préciser le niveau maximum de bruit, exprimé en dB (A), reçu à 7,5 m (1,2 m de hauteur environ), émis par différents tramways circulant sur voie asphaltée.

L max en dB (A) à 7,5 m

vitesse en km/h	30	40	50	60	70
Lieu					
AMSTERDAM	75				
BERNE	77				
BRUXELLES		85		90	
BALE		82,5 à 87,5			
ZURICH		83,5 à 88,5			
STUTTGART			84 à 91		
ST. ETIENNE	80,5	84	87		
NANTES *	70	73	76,5	80	83

* matériel standard français sur voie ballastée

L'influence du type de voie a été par ailleurs étudiée à Zurich avec plusieurs véhicules. Les résultats suivants ont été obtenus :

- voies en structure ouverte posées sur béton :

L_{\max} moy = 85 dB (A) (de 83 à 93,4 dB (A))

- voies en structure ouverte posées sur ballast :

L_{\max} moy = 85,5 dB (A) (de 84,5 à 86,5 dB (A))

- voies en structure fermée, remplissage béton :

L_{\max} moy = 85,1 dB (A) (de 83,4 à 89 dB (A))

- voies en structure fermée, remplissage béton, recouvertes d'asphalte :

L_{\max} moy = 84,0 dB (A) (de 81,4 à 88,5 dB (A))

- voie, en structure fermée, remplissage terre (voies engazonnées)

L_{\max} moy = 81,5 dB (A) (de 79,6 à 85,3 dB (A))

Ainsi les écarts observés dans le tableau précédent à l'avantage du matériel standard français testé à Nantes seraient encore creusés de près de 2 dB si les mêmes mesures avaient été effectuées sur une voie à structure fermée avec rails noyés dans l'asphalte, qui est la configuration des autres mesures évoquées dans le tableau.

Autre point noté dans les mesures zurichoises : pour un même type de voie à structure ouverte, le niveau maximum de bruit augmente de 6,5 dB (A) lorsque la distance entre traverses double (entre 66,6 cm et 132 cm).

En ce qui concerne la répartition de l'énergie acoustique dans le domaine fréquentiel, on peut retenir les résultats essentiels suivants :

- sur une voie ballastée l'énergie se répartit plutôt en basses et moyennes fréquences avec un pic autour de 200 Hz quelle que soit la vitesse du tramway.
- Sur une voie en béton le maximum de l'énergie se situe entre 500 et 1500 Hz.
- Sur les voies noyées dans la terre (voies engazonnées), le spectre est relativement plat jusqu'à 2000 Hz.

I.1.3 - OBJECTIFS QUANTIFIES POUR LIMITER LA GENE DES RIVERAINS ET PROTECTIONS POSSIBLES

I.1.3.1 - OBJECTIF QUANTIFIE POUR LIMITER LA GENE DES RIVERAINS

Etat de la question

Le Guide du bruit des Transports Terrestres, fascicule "Présentation générale", a indiqué en 1976 que pour le choix d'un objectif initial d'une étude de bruit :

"Dans les cas les plus courants, pour les immeubles d'habitation existants, il sera raisonnable de le situer pour la circulation ferroviaire, dans l'intervalle 65 à 75 dB(A) pour Leq de jour ou de soirée".

La différence de 5 dB(A) entre les objectifs relatifs à la circulation routière et ceux relatifs à la circulation ferroviaire résulte des études de gêne effectuées par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment notamment, qui faisaient apparaître une certaine "habituatation" le long des voies ferrées.

Cette différence peut s'expliquer acoustiquement si l'on considère que la signature du bruit d'un train est régulière : pente de montée, niveau et durée du palier, pente de décroissance du niveau sonore, composition en fréquence notamment. Cette régularité semble de nature à expliquer, au moins en partie pour un grand nombre de personnes, le caractère identifiable et peu angoissant du bruit de train.

De plus, il semble résulter de recherches récentes menées à l'IRT-CERNE que la gêne apportée au sommeil est fonction du nombre d'événements perturbateurs, à niveau sonore égal perçu en bordure d'une route ou d'une voie ferrée.

Très grossièrement, il est permis de penser qu'un train de grande longueur (400 mètres) et à faible vitesse, est équivalent à environ 40 poids lourds de fort tonnage en circulation fluide, à une distance de 25 mètres en l'absence de tout obstacle.

On conçoit aisément qu'à niveau sonore Leq égal, pour une base de temps suffisamment longue, la circulation routière multiplie les événements perturbateurs et que ceux-ci surviennent de façon aléatoire au cours du temps.

Ces éléments, fort qualitatifs, peuvent expliquer en partie la différence de gêne souvent constatée entre les deux sources de nature différente, à bruit égal.

I.1.3.2 - PROTECTIONS CONTRE LE BRUIT FERROVIAIRE

I.1.3.2.1 - Réduction du bruit à la source par amélioration de la voie et des matériels

L'origine du bruit pour des vitesses assez élevées se situant au niveau du contact entre la roue et le rail, c'est essentiellement en agissant sur ces éléments que peut être obtenue une réduction du bruit émis par le roulement des trains. Les phénomènes à considérer sont essentiellement ceux de grondement et de chocs (les crissements en courbe concernent davantage les transports urbains).

- Longs rails soudés - état de surface des rails et des roues

L'utilisation qui se généralise, de longs rails soudés (LRS) sur traverses en béton et ballast abaisse sensiblement le niveau de bruit car les rails sont plus lourds, le ballast plus stable (réduction de bruit de 4 à 5 dB(A) dans certains cas). La suppression des joints, quoique favorable, n'apparaît guère à la mesure en dB(A).

En outre, le meulage des rails présentant une usure ondulatoire ou anormale apporte une réduction notable du bruit ; en ce qui concerne les roues, un reprofilage de leur table de roulement, lorsque leur état est dégradé, entraîne de bons résultats. Des roues présentant d'importants méplats peuvent provoquer une augmentation de bruit de 10 dB(A).

- Amortissement des roues et des rails

L'amortissement des roues par interposition de matériaux résilients peut être très efficace pour réduire les crissements (freinage, courbes de faible rayon), mais il est coûteux et possible seulement pour les vitesses faibles (métros, tramways).

- Bogie, système de freinage

Il faut également chercher à éviter de mettre dans le bogie des pièces susceptibles par leur vibration, d'amplifier le bruit. Le remplacement des timoneries de frein par des blocs freins compacts dans les bogies modernes a constitué un progrès, mais on rappelle aussi l'intérêt des freins à disque.

Ces diverses améliorations interviennent bien évidemment lors de la construction des nouveaux matériels roulants et lors des opérations de renouvellement de la voie.

I.1.3.2.2 - Réduction par écrans ou merlons

Les seules protections efficaces connues pour limiter les niveaux de bruit autour des voies ferrées sont comme pour la route les tranchées ou les écrans, que ceux-ci soient réalisés par des murs implantés le long de voies ou par des merlons de terre. Le Guide du Bruit des Transports Terrestres donne, dans la partie V du fascicule "Prévision des Niveaux Sonores", des courbes d'atténuation pour différents écrans ou merlons de terre.

I.2 - VIBRATIONS DUES A LA CIRCULATION FERROVIAIRE

Note sur les vibrations d'origine ferroviaire

Quoiqu'encore moins développées que celles concernant l'environnement acoustique, de nombreuses études ont été effectuées dans divers pays, sur l'environnement vibratoire dû aux moyens de transports ferroviaires.

En effet, si les divers aspects de la transmission des bruits sont maintenant assez bien connus, ceux liés aux vibrations apparaissent comme beaucoup plus complexes, en raison de la nature très diverse des milieux élastiques assurant cette transmission, comparativement à l'homogénéité de l'atmosphère qui constitue le principal milieu de transmission sonore.

- GENERATION DES VIBRATIONS

Le roulement acier sur acier s'accompagne de variations, de nature aléatoire, des contraintes au niveau de la surface de contact entre roue et rail. Ces contraintes sont à l'origine des phénomènes vibratoires que sont le rayonnement sonore des roues et des rails, et l'ébranlement de l'infrastructure de l'ouvrage. Mais, si au départ l'excitation couvre une large bande de fréquences, le transfert d'énergie vibratoire vers le sol par la superstructure de la voie s'accompagne d'un filtrage énergétique des composantes aiguës, si bien qu'on peut considérer que l'essentiel de ce qui est transmis tient dans une bande de fréquences allant de 20 Hz à 200 Hz (avec des bandes latérales très atténuées dans les octaves à 16 Hz et 250 Hz).

- CARACTERISATION ET TRANSMISSION A L'ENVIRONNEMENT DES VIBRATIONS EMISES PAR LES CIRCULATIONS

Les vibrations générées au contact roue/rail qui sont essentiellement aléatoires et qui sont maximales lorsqu'il y a choc, sont transmises à l'environnement, principalement par voie solidienne, par une chaîne d'éléments mécaniques dont il convient de séparer les phénomènes intervenant à 3 stades différents :

- L'émission proprement dite des vibrations a lieu sous l'effet des efforts aléatoires générés au contact du rail et de la roue.

La voie moderne bénéficie d'un soin particulier afin de réduire les imperfections de la géométrie :

- fabrication soignée des rails,
 - rails soudés sans joint,
 - qualité géométrique des soudures,
 - incorporation par soudure d'appareils de voies dans les longs rails soudés.
- La transmission des vibrations entre le point d'émission au contact rail/roue et l'environnement a lieu à travers :
- la structure de la voie (rails, traverses, ballast, sous-couches),
 - éventuellement les structures portantes d'ouvrages d'art.

Les structures portantes d'ouvrages d'art (ponts, tunnel) interviennent comme un filtre mécanique supplémentaire dans la chaîne de transmission, dont les paramètres les plus importants sont la surface au contact du sol et la masse ; la transmission des vibrations est d'autant plus facile que la surface de contact du sol et de la structure est grande, et sera donc naturellement plus forte dans le cas d'un tunnel que dans le cas d'une ligne en viaduc sur piles ; cet effet est cependant contrebalancé par l'importance de la masse mécanique à mettre en mouvement, une augmentation de la masse du tunnel conduisant à des réductions des niveaux vibratoires.

- Au-delà des structures proches de la voie, la transmission des vibrations dépend de deux facteurs :
- la nature du sol,
 - la nature des couplages existant entre le sol et la structure portante de la voie ou entre le sol et les fondations des immeubles riverains.

Dans le sol, en effet, les vibrations se propagent sous forme de trains d'ondes élastiques qui créent en chaque point des mouvements oscillatoires autour d'une position d'équilibre.

Contrairement aux phénomènes de bruits acoustiques, qui se propagent en milieu homogène de caractéristiques connues, les vibrations solidiennes peuvent rencontrer des matériaux extrêmement variés, apparaissant en structures souvent hétérogènes (couches, failles et niveaux), et des règles générales sont difficiles à établir.

Toutefois, on peut souvent caractériser les sols en place par leur rigidité, qui se traduit directement dans les valeurs de la vitesse de propagation des ébranlements qui sont de l'ordre de 150 à 200 m/s dans les terrains meubles, pour les ondes de surface et de cisaillement, qui contiennent le plus d'énergie, mais peuvent atteindre des vitesses élevées dans des terrains rigides et pour les ondes de compression (1500 m/s à 5000 m/s).

Dépendent également de la nature du sol, ses caractéristiques d'amortissement.

Tous les sols se caractérisent par un amortissement prononcé des vibrations qui peut être dû, à la limite de sols très rigides, à une simple dispersion spatiale de l'énergie, ou, pour des sols plus meubles, à une perte de frottement interne complémentaire de la précédente. Si la nature géologique du sol ou de la roche intervient certainement, son état (altération, fissuration, pendage, épaisseur des bancs) est également important et cela revient à considérer un paramètre caractéristique du site dans son ensemble plutôt que de la roche ou du sol au sens pétrographique du terme.

Cet amortissement des vibrations est, d'ailleurs, fonction de leur fréquence, et augmente en général avec celle-ci ; cependant, si les terrains rigides propagent mieux les vibrations de fréquence relativement élevée que les terrains meubles, il faut noter que leur rigidité même réduit leur couplage avec l'infrastructure ferroviaire.

La propagation dans les structures est un problème très complexe en raison du nombre et de la variété des éléments, et du nombre important de degrés de liberté. La période des oscillations horizontales est de quelques dixièmes de seconde pour les petits bâtiments à une dizaine de secondes pour les gratte-ciel.

Un élément important dans l'étude des vibrations dans les bâtiments est la fréquence de résonance fondamentale des planchers qui se situe entre 10 et 30 Hz. En règle générale, on peut s'attendre à une certaine atténuation des vibrations en fonction de l'étage qui croît avec la fréquence, mais des amplifications sont fréquentes.

Il est important de noter que dans certains cas, la mise en vibration des structures par voie aérienne est parfois plus importante que la transmission par le sol. Il y a très peu de renseignements précis sur la contribution respective de ces voies d'excitation.

- NUISANCES ET DOMMAGES DES VIBRATIONS

Les vibrations engendrées dans les bâtiments peuvent avoir des répercussions diverses suivant leur intensité et suivant l'utilisation des locaux. Elles peuvent gêner les personnes s'y trouvant, soit dans leur confort, soit dans leur activité. Elles peuvent aussi être à l'origine du mauvais fonctionnement d'équipements situés à l'intérieur du bâtiment, comme ce peut être le cas pour des instruments de mesure dans un laboratoire. Elles peuvent exceptionnellement être à l'origine de détériorations mineures ou majeures de certaines parties des bâtiments. En fonction de chacun de ces cas, les critères d'évaluation des vibrations sont différents ainsi que les niveaux critiques.

- Critères d'acceptabilité vis-à-vis des réactions de personnes

Les niveaux acceptables vis-à-vis des réactions des personnes concernent deux aspects :

- . le seuil de gêne par perception auditive des vibrations réémises par les structures, qui est, de toute évidence, le plus faible. Il convient de noter que le niveau acoustique réémis dépend beaucoup de la nature de la structure et du local ;
- . le seuil de gêne par perception tactile directe est souvent beaucoup plus élevé que le précédent (d'un facteur 10 au moins).

Bien qu'aucun consensus n'ait pu être réalisé au plan international sur des niveaux vibratoires limites acceptables (sans doute en raison de la très grande dispersion des réactions de personnes, ce qui en fait un phénomène subjectif), divers documents ont été élaborés par un Comité de Normalisation de l'ISO en vue de préciser l'effet quantitatif des vibrations (réf. biblio n° 4/6).

A titre d'exemple dans la référence biblio n° 2, la gêne est évaluée sur la base de l'évaluation de l'écart-type de l'accélération pondérée du mouvement vibratoire; pour des fréquences supérieures à 8 Hz, la pondération proposée est équivalente à la détermination de l'écart-type de la vitesse vibratoire, et les limites recommandées, variables avec la destination du bâtiment et la période de la journée, sont les suivantes :

Fonction du local	Période	Ecart-type de l'accélération pondérée	Niveau de vitesse vibratoire (mm/s)
Hôpitaux	Jour ou Nuit	0,5 mg	0,1
Résidences	Jour ou Nuit	1,0 mg 0,7 mg	0,2 0,14
Bureaux	Jour ou Nuit	2,0 mg	0,39
Ateliers	Jour ou Nuit	4,0 mg	0,78

Ces critères correspondent à des niveaux qui majorent les seuils de non-perception, tout en restant inférieurs aux seuils à partir desquels apparaît une gêne importante.

- Seuils de risques de dommages

Il faut souligner ici que ces seuils sont très supérieurs aux seuils précédents concernant les réactions de personnes, ce qui revient à dire que le risque de dégradations ne peut exister s'il n'y a pas perception auditive ou tactile des vibrations.

Actuellement, il n'existe pas de valeurs limites correspondant à un seuil bien défini qui aient obtenu l'assentiment de tous les spécialistes. En tenant compte de l'expérience acquise ces dernières années, on peut toutefois admettre les valeurs provisoires suivantes :

Valeurs maximales de vitesse vibratoire (mm/s)	risques de dommages
3 mm/s	nuls
50 mm/s	improbables

Ces seuils s'appliquent pour des vibrations de nature semi-permanente, comme celles dues aux activités de transports ; ils peuvent en général être relevés d'un facteur 2 au moins pour des vibrations transitoires ou non répétées comme celles dues aux chantiers de travaux.

Au dessous du seuil de 3 mm/s, il n'existe aucun risque de dommages, même pour des constructions de nature sensible.

Pour des vitesses vibratoires inférieures à 50 mm/s, les structures lourdes et de construction moderne (béton armé, acier) ne présentent aucun risque de détériorations, même mineures. Par contre, des bâtiments plus anciens, de construction légère, en mauvais état ou sensibles à certaines fréquences de vibrations, peuvent être soumis à des risques de dommages mineurs, ne mettant d'ailleurs pas en cause la pérennité de la construction (fissurations d'enduits ou de plâtres).

La comparaison entre les seuils ci-dessus et les niveaux évoqués en ce qui concerne la gêne ressentie par les riverains, montre à l'évidence que les niveaux vibratoires risquant de provoquer des détériorations aux immeubles seront très péniblement ressentis au plan auditif et tactile, et ceci avant que le dommage, qui correspond à un effet cumulatif, ait pu se manifester de façon importante.

- METHODES DE PROTECTION ET METHODES PREVISIONNELLES

Il convient dans certains cas de prendre des mesures dans le but d'atténuer les vibrations. L'intervention peut se situer sur l'un ou l'autre des trois points suivants, situés sur le trajet source-bâtiments : on peut soit réduire les vibrations à la source, soit les atténuer sur leur trajet dans le sol, soit encore diminuer la transmission entre la source et le sol et/ou le sol et les bâtiments.

Le bon état de la voie ainsi que celui des véhicules, en particulier des roues et des suspensions, sont un facteur primordial de limitation de vibrations.

La pose de systèmes résilients entre la voie et le sol a été largement étudiée dans divers pays, notamment à l'intérieur des villes pour les métros, et donne de bons résultats.

La pose d'un tapis amortissant sous ballast, toutes choses égales par ailleurs, permet d'obtenir un gain de 6 à 8 dB, c'est-à-dire que le niveau de vibration est divisé au moins par 2, au-dessus des fréquences de 30 Hz à 40 Hz.

On doit également préciser que la diminution du niveau de vibration varie comme $d^{3/2}$, c'est-à-dire de 9 dB, soit dans un rapport de 2,8 en cas de doublement de la distance.

Par contre, l'atténuation sur le trajet dans le sol par une tranchée est une solution peu rentable et difficile.

Il est naturellement souhaitable que, à l'instar des réseaux ferroviaires, les réalisateurs d'immeubles à construire à proximité des souterrains existants ou à distance très rapprochée des voies prennent en compte l'incidence des phénomènes vibratoires dans la conception des fondations et structures d'immeubles (assises anti-vibratiles).

Les approches théoriques permettant de prévoir le niveau vibratoire sont très rares et incomplètes. Elles relèvent plutôt d'une étude par comparaison à une situation similaire existante.

Les entreprises ferroviaires ont fait un certain nombre de mesures de niveaux de vibrations dans des sites variés. Ces mesures seront poursuivies et donneront lieu à publication.

- CONCLUSIONS

En conclusion, il apparaît que les vibrations engendrées par les moyens de transport ferroviaire peuvent, dans certaines circonstances, avoir des conséquences sur l'environnement proche. Lors de la conception de systèmes nouveaux ou du développement de systèmes existants, il est donc important de s'assurer que les critères de gêne ou de risque soient respectés.

Pour cela il faudrait d'abord disposer de méthodes de prévision. Il est possible d'extrapoler avec succès des résultats obtenus dans des situations analogues existantes. Cependant, il serait souhaitable de pouvoir disposer d'un guide permettant de faire une estimation raisonnable des niveaux de vibration. Les tentatives faites sont peu nombreuses et ne sont pas assez précises. Pour développer et améliorer ces méthodes, il faudrait avoir une connaissance plus approfondie des mécanismes de génération comme de propagation des vibrations, à la fois sur un plan théorique et sur un plan expérimental.

Enfin, il serait souhaitable d'approfondir les connaissances acquises en ce qui concerne l'appréciation de la gêne due aux vibrations dans le cadre général des autres gênes qui peuvent être introduites dans l'environnement.

I.3 - GENE PROVOQUEE PAR LE BRUIT DES TRAINS

Les recherches en matière de gêne provoquée par les bruits de transport et de trafic ferroviaire en particulier se sont développées en France, à la suite d'enquêtes, sous le double aspect psychologique et physiologique.

I - RESULTATS D'ENQUETES

I.1 - Enquête nationale sur les nuisances dues aux transports en France

A la demande du Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie l'IRT-CERNE a mené en 1976 et 1977 une enquête sur les nuisances des moyens de transport en France. Cette enquête est fondée sur un questionnaire distribué auprès d'un échantillon aléatoire de plus d'un millier de personnes (1 356 sujets). Les questions sont relatives aux nuisances que l'on rencontre dans le quotidien, nuisances classées essentiellement selon leurs natures (pollution, bruit, vibrations) et selon leurs origines (la route, le chemin de fer, l'avion, le voisinage...).

En ce qui concerne la nature des nuisances, les taux recueillis sur l'ensemble de l'échantillon et pour différentes catégories urbaines sont rassemblés dans le tableau suivant.

Nature	France entière	Au-dessus de 50 000 hab.	Milieu rural
Bruit	53,9 %	56,4 %	35,0 %
Pollution	24,0	23,8	19,1
Vibration	10,1	8,5	15,9
Sécurité	7,5	6,2	25,2
Vue	4,5	5,1	4,9

Taux recueillis par nature de nuisance, sur l'ensemble de l'échantillon et pour différentes catégories urbaines.

C'est donc le bruit qui vient en tête parmi les nuisances citées à domicile (53,9 %).

Et ce sont les nuisances liées à la rue (ou à la route) qui viennent en tête parmi les origines de nuisances (46,5 %), comme le montrent les résultats regroupés dans le tableau suivant :

Origine	France entière	Au-dessus de 50 000 hab.	Milieu rural
Rue, route	46,5 %	47,0 %	47,0 %
Métro	0,5	0,6	0,0
Train	3,4	3,20	0,0
Navigation	ε	0,1	0,0
Aviation	5,1	4,6	18,0
Voisinage	32,1	32,0	21,0
Divers	12,3	11,5	14,0

Taux recueillis par origine de nuisance, sur l'ensemble de l'échantillon et pour différentes catégories urbaines.

Les nuisances liées au transport ferroviaire interviennent pour 3,4 %. Si l'on ramène ces chiffres aux seuls moyens de transport, le chemin de fer intervient alors pour 6,2 % sur la France entière comme le montre le tableau ci-après :

	Rue et route	Aviation	Chemin de fer	Métro	Navigation
France entière	83,6 %	9,1 %	6,2 %	0,8 %	
Au-dessus de 50 000 hab.	84,6 %	8,4 %	5,8	1,0 %	0,2 %

Origines de nuisances liées aux transports

En éclatant ces chiffres en fonction de la catégorie des villes, on obtient les résultats suivants :

CATEGORIES	Paris intra-muros	Banlieue Paris	+ de 1 million	+ de 200 000	50 000 à 200 000	20 000 à 50 000	5 000 à 20 000	rural
% rue route	94,4	78,3	92	80,7	88,8	83,6	79	72
% chemin de fer	5,6	6,1	1,4	11,3	4,3	10,9	4,0	0

Pour résumer, le bruit arrive largement en tête des nuisances à domicile - 54 % en moyenne contre 24 % pour la pollution -, la rue (ou la route) étant la plus citée (46 %) et le chemin de fer intervenant dans une fourchette de 0 à 11 % (moyenne 6,2 %) selon la taille de l'agglomération, parmi les nuisances liées aux moyens de transport.

1.2 - Enquête CSTB sur la gêne due au bruit des trains

Cette enquête, réalisée au cours du premier semestre 1972 par le CSTB, a été menée sur 350 personnes réparties sur une vingtaine de sites sur lesquels des mesures de bruit ont été effectuées. Elle avait pour objectif de recueillir l'évaluation des riverains des voies ferrées sur leur situation acoustique à partir de réponses à un questionnaire (90 questions) et de proposer un indice de gêne.

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- a) On observe des corrélations significatives entre le niveau de bruit et la gêne. Le coefficient de corrélation le plus élevé est obtenu pour Leq (24 h) : $r = 0,33$. La conclusion de cette observation était :
le niveau énergétiquement équivalent Leq est l'indice qui, sous une forme synthétique et aisément calculable, rend le mieux compte du phénomène et avec lequel on observe avec la gêne, les meilleures corrélations.
- b) Le bruit de trains perturbe les activités de la vie quotidienne notamment la communication verbale. "Cependant, les irrégularités de la perturbation pour chaque activité sont très importantes".
- c) La répartition de l'indice de gêne en fonction du Leq fait apparaître que :
 - entre 64 et 68 dB(A), près de 65 % des individus s'estiment peu gênés, 20 % moyennement gênés et 15 % très gênés.
 - à partir de 76 dB(A), il n'y a plus personne qui ne soit plus gêné par le bruit des trains, 10 % s'estiment faiblement gênés, 40 % moyennement gênés et 50 % très gênés.

La principale conclusion que l'on peut tirer de ces observations est qu'il n'y a pas de seuil nettement marqué permettant de situer à coup sûr le niveau qu'il ne faut pas dépasser.

Si l'on tient compte, pour expliquer la gêne, de certains facteurs situationnels indépendants du niveau de bruit (satisfaction à l'égard du quartier, taux d'exposition, attitude à l'égard du bruit et du train) le coefficient de corrélation multiple passe de 0,42 à 0,64.

Cela signifie que si le bruit à lui seul (mesuré en Leq) rend compte de 18 % de la variance de l'indice de gêne, il est nécessaire d'avoir une évaluation plus globale de la situation (Leq cor) pour rendre compte de 41 % de cette variance.

1.3 - Enquête CSTB sur la gêne due aux vibrations d'origine ferroviaire (Métro)

Il s'agit d'une enquête exploratoire de type qualitatif réalisée au cours de l'année 1978 auprès de 30 sujets répartis dans cinq sites choisis sur des critères physiques (niveaux de vibration), et socio-urbanistiques (morphologie sociale et morphologie urbaine).

Son objectif était d'appréhender les problèmes spécifiques du bruit et surtout des vibrations du métro en les situant dans l'ensemble des préoccupations quotidiennes des sujets.

Voici les principales conclusions qui peuvent être tirées de cette étude :

- a) Elle ne met pas en évidence de spécificité perceptive (vibrations des planchers plutôt que génération de champs sonores).
- b) Les réactions des sujets sont de même nature que celles qui sont déterminées par le bruit du trafic routier.
- c) La gêne augmente avec le niveau de vibration mesuré. Les meilleurs indices étant la somme quadratique des niveaux de vitesse dans les trois axes orthogonaux $\sqrt{\sum v_i^2}$ et le niveau de pression linéaire mesuré au centre de la pièce (Lp(lin)).
- d) L'analyse des correspondances permet de mettre en évidence trois types d'attitudes à l'égard des vibrations du métro.
 - 1 - la mise à distance (non concernés)
 - 2 - la familiarité (jugements favorables)
 - 3 - la dépendance (jugements défavorables)

Ces trois attitudes correspondent à des situations définies non seulement par le niveau des vibrations, mais aussi par les caractéristiques physiques, psychologiques, sociologiques de la situation. Le bruit et les vibrations sont jugés d'autant plus gênants que le sujet a moins de moyens d'action pratique ou symbolique sur son environnement.

(*) Leq (cor) : Niveau continu équivalent corrigé par des variables sociologiques du type exposition des bâtiments, attitude vis à vis du bruit, attitude vis à vis des trains, satisfaction du quartier - cf. réf. bibliographique 5.2.

II - ETUDES DES REACTIONS PHYSIOLOGIQUES ET PSYCHOLOGIQUES AU BRUIT DE TRAIN

La gêne provoquée par les bruits de train a fait l'objet de deux types d'études, menées en étroite collaboration entre l'IRT-CERNE et la SNCF :

- une étude relative à la gêne ferroviaire diurne,
- une étude concernant la gêne nocturne sur le sommeil des riverains et la comparaison de cette gêne acoustique ferroviaire à une gêne acoustique routière.

Concrètement, au travers de ces études, trois objectifs étaient visés :

- comparer les réactions physiologiques et psychologiques aux bruits de différents types de trains et différents types de trafics ferroviaires,
- comparer la gêne due aux bruits ferroviaires et routiers,
- déterminer s'il est possible de mettre en évidence une habitude physiologique aux bruits ferroviaires.

II.1 - Résultats relatifs à l'étude de la gêne ferroviaire diurne

Cette étude, entièrement menée en laboratoire, a porté sur un échantillon de 20 personnes soumises à des bruits de trains. L'expérimentation, basée sur l'étude des réponses à un questionnaire et sur des enregistrements physiologiques, devait mettre en évidence l'influence des divers éléments d'une signature sonore - niveaux de crêtes, durée de passage, fréquence d'apparition - relatifs à trois types de trains (TGV, trains rapides, trains de marchandises).

L'étude a permis de montrer que :

- pour un Leq donné de 70 dB(A) extérieur pour 6 à 10 trains par heure, le type de train n'interfère absolument pas sur la gêne psychologique et les réactions vasomotrices,
- un niveau Leq extérieur de 70 dB(A) est considéré comme "plutôt désagréable" sans toutefois être "nettement désagréable",
- de tels niveaux ne provoquent pas de réactions cardiaques décelables ; ils engendrent cependant des réactions vaso-motrices périphériques faibles mais systématiques (d'où l'impression "plutôt désagréable") ; l'examen des signaux physiologiques ne fait pas apparaître "d'habitude", même après deux heures "d'écoute".

II.2 - Résultats relatifs à l'étude de la gêne ferroviaire nocturne

Pour apprécier la gêne nocturne, c'est-à-dire les perturbations du sommeil (endormissement, changements de stades, éveil), il a semblé opportun à l'IRT-CERNE de lancer une étude basée sur l'observation des paramètres physiologiques des dormeurs. Matériellement, des enregistrements par téléométrie ont été effectués, in situ, sur une vingtaine de sujets répartis sur 2 sites exposés l'un et l'autre à des niveaux égaux de bruits ferroviaire et routier, ces niveaux étant relativement élevés dans un site et assez faibles dans l'autre :

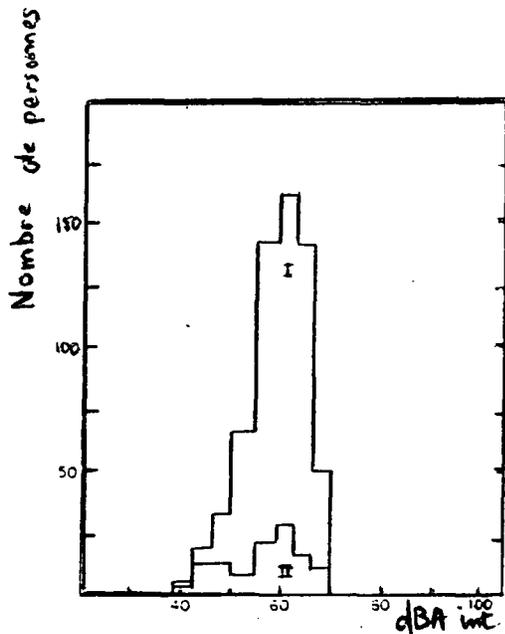
<u>Site de MACON</u>	Train	Leq _{20 h - 8 h} : 66 à 69 dB(A)
	Routier	
	(80 % PL)	Leq _{20 h - 8 h} : 67 à 69 dB(A)
	Global	Leq _{20 h - 8 h} : 70 à 72 dB(A)
<u>Site de DOMARIN</u>	Train	Leq : 50 dB(A)
	Routier	
	(80 %)	Leq : 50 à 55 dB(A)
	et global	

Autres caractéristiques concernant les niveaux acoustiques dans les chambres :

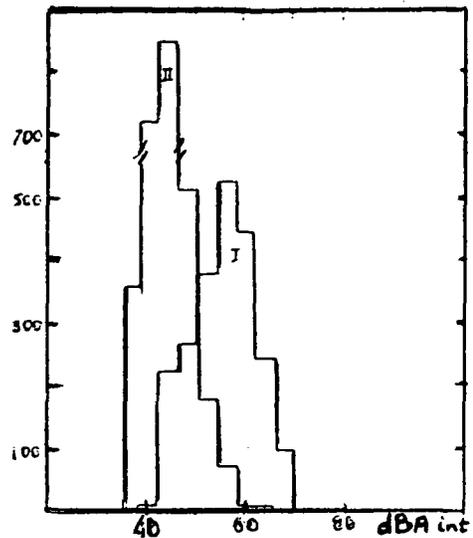
- bruit de fond

45 à 50 dB(A) à MACON
30 dB(A) à DOMARIN

- bruits de crêtes selon les deux histogrammes ci-après.



Histogramme des niveaux de bruit de trains à MACON (I) et DOMARIN (II)



Histogramme des niveaux de bruits de véhicules routiers à MACON (I) et DOMARIN (II)

L'exploitation des paramètres physiologiques a permis de tirer un certain nombre de conclusions :

- 1) Il n'y a pas une meilleure habitude physiologique au bruit de trains qu'au bruit routier.
- 2) Cependant, pour un même Leq de nuit, le bruit de trafic ferroviaire provoque trois fois moins d'interférences avec le sommeil que le bruit routier ; cette observation est due au fait que le sommeil est très sensible au nombre d'occurrences et que, à Leq égal, il y a trois fois plus de véhicules routiers que de trains.
- 3) Pour un même type de trafic - ferroviaire par exemple - le nombre d'interférences avec le sommeil diminue de façon notable lorsque le Leq diminue, ce qui indique que si le Leq ne peut caractériser complètement la gêne nocturne (forte influence du nombre d'occurrences), il en est quand même un élément significatif.
- 4) Par contre, le niveau de pic des trains est bien lié avec les perturbations apportées au sommeil. En particulier les niveaux de crête - à l'intérieur des chambres - inférieurs à 52 dB(A) ne provoquent pas d'éveils électroencéphalographiques, mais on observe des réactions transitoires au dessous de ce seuil.

- 5) L'effet du niveau de pic est modulé par d'autres caractéristiques de la signature acoustique tels le niveau de bruit de fond, l'émergence et la durée d'exposition à un passage isolé. Ainsi, en site calme - à bas bruit de fond - l'émergence interréagit avec le niveau de pic ; en site bruyant - bruit de fond élevé - c'est la durée du bruit qui interréagit avec le niveau de pic.

III - RESUME D'UNE ETUDE SUR L'EFFET DU BRUIT DU TRAFIC FERROVIAIRE
COMPAREE AUX AUTRES SOURCES SONORES (Office de Recherches et
d'Essais de l'Union Internationale des Chemins de Fer), 1984.

Une étude bibliographique sur l'effet du bruit de trafic ferroviaire seul et comparé à d'autres sources de bruit vient d'être établie pour le compte de l'Office de Recherches et d'Essais de l'Union Internationale des Chemins de fer par le bureau d'études OBERMEYER de Munich. Cette étude, qui sera publiée in extenso par l'ORE sous forme de document technique, fera également l'objet d'une analyse critique par les administrations ferroviaires sous forme d'un rapport.

Elle se proposait, primitivement et sur la base des données actuelles, une meilleure connaissance des perturbations induites respectivement par les transports ferroviaires et les autres moyens de transport chez les riverains d'infrastructures. En fait, la pauvreté des données a conduit à restreindre la comparaison aux seuls domaines ferroviaire et routier.

Les principales conclusions qui s'en dégagent sont les suivantes :

1) - Bruit ferroviaire seul :

- Le niveau équivalent continu (Leq), qu'il soit mesuré de jour, de nuit ou sur 24 h, est le meilleur indicateur de gêne, ce qui n'est pas toujours reconnu pour la route.
- Il n'est pas possible d'établir un seuil de déclenchement des réactions au bruit dans la mesure où la gêne intègre de nombreux facteurs extra-acoustiques.
- Dans l'ordre d'importance décroissante, le trafic ferroviaire perturbe la communication, le sommeil, les loisirs, ...
- Le Leq paraît insuffisant pour caractériser complètement les perturbations du sommeil, certains auteurs préconisant de tenir compte des durées de silence (absence d'événements ferroviaires) ;
- la gêne d'origine ferroviaire intègre non seulement le bruit mais aussi la proximité, le type d'urbanisme, la sensibilité individuelle, l'activité, ...
- L'accoutumance, bien que controversée, semble probable sous l'angle psychologique mais pas sous celui de la physiologie.

2) - Bruits ferroviaires en présence de bruits routiers

- La pondération A défavorise le fer d'environ 5 dB compte tenu des compositions spectrales respectives des bruits fer (hautes fréquences) et route (basses fréquences).
- A Leq égal, le nombre d'événements est moindre pour le fer : les durées de silence, les durées d'événements sont plus longues et les niveaux max L_{Amax} sont plus élevés.
- Exprimé en Leq, l'écart jour-nuit est moindre pour le fer.
- A Leq égal, l'activité ferroviaire dérange davantage les communications que l'activité routière.
- A Leq égal, la gêne ferroviaire est globalement moindre que la gêne routière ; l'écart, approximativement compris entre zéro et quinze dB, dépend de la période de mesure, du niveau mesuré, de la nature de l'activité perturbée (sommeil, communication, détente).
- Cette moindre gêne ferroviaire est réduite de jour et pour de faibles niveaux de bruit.
- Il ne paraît pas possible de quantifier objectivement un "bonus" ferroviaire à partir du Leq, étant donnée la diversité des situations rencontrées et partant des nombreux facteurs extra-acoustiques spécifiques qui en découlent, ainsi que de leur synergie sur l'intensité de la gêne ressentie.

CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

Le but de cette synthèse est de trouver les éléments nécessaires à la proposition d'indicateurs de gêne due au bruit des chemins de fer.

On pourrait évidemment s'inspirer de ce qui existe en matière de bruit routier pour lequel l'indicateur Leq (8.00 h - 20.00 h) semble assez satisfaisant.

Mais cet indicateur $Leq_{8\text{ h} - 20\text{ h}}$ n'est vraiment valable que pour un profil acoustique connu, composé de :

- une partie relativement plate de 8 h à 20 h,
- une décroissance à partir de 20 h,
- un creux nocturne de 7 à 15 dB(A) en dessous du niveau de jour,
- une remontée à partir de 5 -6 h du matin.

Or, en bordure de voie ferrée, la décroissance du bruit n'a lieu que beaucoup plus tard dans la soirée. Des plaintes, qui ressortent entre autres de l'enquête CSTB, viennent corroborer cette observation, mettant en évidence, pendant la période de repos du soir, des perturbations de la communication (conversations, écoute musique-radio-télé, téléphone) pendant toute la durée de passage d'un train (6 à 8 secondes pour un TGV, 40 s pour un train de marchandises long).

Pour ces raisons, il semble donc qu'un indicateur unique de gêne ne soit pas représentatif de toutes les périodes de la journée et que les recherches devraient se tourner vers l'élaboration de deux (peut-être trois) indicateurs :

- un indicateur de jour (probablement Leq sur 8 h - 20 h),
- un indicateur de soirée privilégiant le niveau de crête et la durée de passage,
- un indicateur de nuit privilégiant le niveau de crête et le nombre d'événements.

Concrètement, des recherches complémentaires devront donc se développer en matière d'enquêtes et de réactions psycho-physiologiques au bruit de passages isolés de différents types de trains, afin de mettre en évidence le ou les paramètres acoustiques déterminants de la gêne, au cours des trois périodes - jour, soirée, nuit -.

Ces recherches devront déboucher sur la proposition d'indicateurs et, in fine, de seuils.

On pourrait également envisager une recherche sur les effets croisés bruit-vibrations dus à la circulation ferroviaire, pour lesquels il y a un manque d'informations.

I.4 - Note de rappel :
quelques repères sur le bruit routier.

L'objet de la présente note est d'indiquer quelques éléments clés relatifs à l'analyse et aux méthodes de réduction du bruit routier. Ce bref résumé peut donner quelques repères utiles à la comparaison avec des mesures aptes à le réduire, quand celui-ci peut provoquer une nuisance aux riverains qui y sont soumis.

I - INDICATEURS PHYSIQUES UTILISES POUR CARACTERISER LE BRUIT ROUTIER

a) Niveau énergétiquement équivalent Leq

Depuis 1976 (*) c'est le Leq calculé ou mesuré ou pour un débit représentatif égal au trafic journalier moyen divisé par 17 qui est utilisé pour caractériser la gêne des riverains des voies routières. On peut aussi utiliser le Leq calculé ou mesuré pendant la période 8 h - 20 h ce qui revient au même dans la plupart des situations urbaines (cf. réf. biblio. n° 7 - partie 1, chapitre 3).

le Leq est défini comme "la moyenne de l'énergie perçue pendant une période T" (voir annexe "éléments d'acoustique") :

Pour une voie routière, il dépend :

- du débit global des véhicules ;
- de sa composition en véhicules des différentes catégories (véhicules légers, poids lourds) ;
- de la puissance acoustique moyenne des véhicules de chaque catégorie ;
- de la vitesse moyenne du flot de circulation ;
- de l'allure de la circulation (selon qu'elle est fluide, pulsée, accélérée ou décélérée) ;
- de la distance à la voie et des conditions de propagation du bruit dans le site.

* Avant 1976, c'était le L_{50} (niveau atteint ou dépassé pendant 50 % du temps qui était utilisé. Mais celui-ci avait le désavantage de n'être représentatif du phénomène physique que si l'échantillon des niveaux sonores instantanés était suffisant pour que la répartition statistique des niveaux sonores soit proche d'une loi de Gauss, (soit pour des circulations de plus de 500 véh/heure). Pour des trafics plus faibles, on ne sait plus interpréter ce que représentent les indices de la série statistique.

Pour l'évaluer, il convient d'utiliser les méthodes décrites dans le Guide du Bruit des Transports Terrestres, fascicule "Prévision des niveaux sonores" (réf. biblio n° 6).

Le choix de ce paramètre peut se justifier comme suit :

- il existe entre le Leq et le débit horaire des véhicules circulant sur une voie routière une relation stable et répétitive ;
- il prend en compte à la fois le nombre d'événements acoustiques pendant une période donnée, l'importance (en niveau ou en puissance) de chacun de ces événements et la durée d'exposition des récepteurs qui perçoivent le bruit, puisqu'il réalise l'intégrale du signal acoustique pendant la durée d'observation ;
- il établit une représentation plus pertinente que les indicateurs de crête (L_{max} , L_1) ou que les indicateurs d'émergence ($L_1 - L_{90}$, $L_{50} - f(\sigma)$ par exemple) pour des circulations composées seulement de quelques passages de véhicules isolés, à forte émergence ;
- il représente correctement le phénomène physique ;
- il a permis la définition d'un seuil d'apparition significative de la gêne des personnes et des populations, et donc le choix d'un objectif à atteindre lors des aménagements de voiries ;
- cet indice permet à la fois le constat d'une situation existante et la prévision des niveaux de bruit, puisqu'il est bien corrélé au débit et que le débit d'une route constitue, lui, une valeur que l'on sait prévoir pour l'avenir.

L'apparition et le développement récent du Leq court nous a confirmé encore dans l'intérêt de mesurer les bruits en Leq et de ne plus utiliser les indices de la série statistique (L_1 , L_{10} , L_{50} , L_{90}).

b) Unité : le dB(A)

Le Leq est mesuré en dB(A). Bien que l'utilisation de cette "unité" ait pu être discutée au profit d'unités telles que dB(C) ou dB(D), elle représente assez bien ce que l'oreille perçoit réellement en présence d'un bruit routier. Deux raisons principales ont poussé en 1976 à ne pas remettre en cause ce choix établi antérieurement :

- Le CSTB a montré, en 1973 (réf. bibliographique n° 1), que le spectre en fréquences, rencontré en moyenne aux abords immédiats d'une voie routière, est relativement stable. Quelle que soit donc la valeur qui sert à le caractériser, il est permis de penser qu'il est toujours possible d'en déduire les autres valeurs établies une fois pour toutes. Ceci est d'autant plus vérifié qu'on a même pu créer un "spectre de bruit routier normalisé" (cr. Guide du Bruit des Transports Terrestres - fascicule "Prévision des niveaux sonores" - partie 1, chapitre 4).

- Nous disposons d'une masse importante de connaissances sur la gêne des personnes et ses corrélations avec des mesures de bruit exprimées en dB(A). Changer d'unité, ce serait perdre ce capital. D'autre part, grâce aux corrélations avec la gêne, même si le dB(A) n'est pas, en toute rigueur, l'indicateur le mieux adapté, on a su tenir compte de ses imperfections.

En d'autres termes, comme l'on sait faire en géométrie, "un raisonnement juste sur une figure fausse", c'est à partir de mesures en dB(A) que l'on a le mieux appris à apprécier la gêne des personnes et des populations.

II - REGLEMENT DU BRUIT ROUTIER

La réglementation du bruit des Transports Terrestres comporte un ensemble de textes clairs et cohérents entre eux, qui porte sur l'ensemble des situations que l'on peut rencontrer sur le terrain.

a) La route est à construire près des bâtiments existants.

Dans ce cas, c'est la loi du 10 Juillet 1976, relative à la protection de la nature, et en particulier son article 2 qui constitue la base juridique fondamentale. Le décret 77-1141 du 12 octobre 1977 a précisé les modalités d'application de la loi en ce qui concerne l'étude d'impact à réaliser lors des études préalables à la réalisation des ouvrages.

En ce qui concerne le bruit, le texte opérationnel permettant l'application de la loi a été constitué par la circulaire 78-43 du 6 Mars 1978 du Ministère des Transports. Ce texte a été récemment remplacé par la circulaire du 2 Mars 1983, relative à "la protection contre le bruit aux abords des infrastructures routières du réseau national".

Le bruit y est assimilé à un dommage de travaux publics, qui doit faire l'objet de travaux de remise en état s'il atteint un niveau tel qu'il provoque une gêne "spéciale et anormale".

Très brièvement, il y a lieu de retenir que cette circulaire impose aux services concepteurs d'infrastructures de transports que la contribution du bruit apportée par une voie que l'on crée ne dépasse pas 65 dB(A), évalués en Leq (8 h - 20 h) en façade des bâtiments qui existaient avant que la route ait été déclarée d'utilité publique (principe d'antériorité). Elle précise également les seuils à respecter en cas de transformation d'une voie existante.

La circulaire 82-908 du 27 Septembre 1982 précise la façon de prendre en compte la gêne nocturne ce qui est complémentaire à celle de mars 1983. Elle montre comment l'indicateur choisi dans la circulaire du 2 Mars 1983 suffit à analyser la plupart des situations, et comment cet indicateur doit être interprété et complété si nécessaire, pour tenir compte, dans les cas exceptionnels, d'un contexte particulier ou d'une situation spécifique de gêne nocturne. Dans ce dernier cas, on utilise un double indicateur, Leq (8 h - 20 h) et Leq (0 h - 5 h), et l'on retient la situation la plus favorable comme représentative (Leq (0 h - 5 h) doit être inférieur à 55 dB(A)).

b) Des bâtiments sont à construire à proximité des voies de transports (routières ou ferroviaires) existantes.

Dans ce cas, c'est à la fois le "code de l'urbanisme" et le règlement de construction qui constituent les fondements juridiques de notre action.

La modification du code de l'urbanisme du 31.12.76 a, en effet, permis d'assimiler le bruit à une nuisance grave, telle que les inondations ou les avalanches et nous a donné la possibilité de réglementer la construction de ce fait. Trois arrêtés, du 7 Juillet 1977, ont précisé les conditions d'application de cette modification de la loi.

Le texte vraiment opérationnel a été constitué par l'arrêté interministériel du 8 Octobre 1978. Il vient d'être modifié (sans changement de fond, mais avec des adaptations techniques, tenant compte des acquis récents) par l'arrêté du 23 Février 1983 relatif à l'isolement acoustique des bâtiments d'habitation contre les bruits de l'espace extérieur.

Cet arrêté impose un recensement général de toutes les voies bruyantes ou pouvant le devenir, dans le milieu urbain (il est alors intégré dans les plans d'occupation des sols) ou en milieu interurbain (il fait alors l'objet d'un arrêté préfectoral), et un classement en voies de type I (très gênantes) et de type II (gênantes).

Il permet d'examiner rapidement les conditions d'exposition des bâtiments à construire aux bruits qui proviendraient des voies I ou II situées dans un rayon de 200 m autour du projet de construction.

Cet arrêté permet ensuite d'imposer un isolement acoustique de façade au constructeur. Cet isolement peut être de 30, 35, 40 ou 45 dB(A) selon l'importance des nuisances existantes ou prévisibles.

Enfin, il impose des prescriptions techniques connexes à l'amélioration acoustique, ventilation, confort thermique d'été, incendie, sécurité, etc...

c) Planification et urbanisme

La circulaire du 15 Novembre 1978 de la Direction de l'Urbanisme et des Paysages a précisé les conditions d'application de l'arrêté du 8 Octobre 1978 dans le processus d'élaboration des plans d'occupation des sols.

Cette circulaire considère cette application comme base minimum. Elle esquisse quelques principes de prise en compte du bruit dans la conception de l'urbanisme, qui dépassent la stricte application de l'arrêté du 6.10.78.

d) Les bâtiments et les infrastructures (routières et ferroviaires) existents.

La mise en place d'une réglementation précise pour traiter des situations "existantes" les plus traumatisées est longue et difficile. L'une des causes de cette difficulté peut être l'inadéquation qui peut apparaître entre les seuils de bruit généralement admis comme admissibles et les moyens économiques et techniques considérables qu'il faudrait mettre en oeuvre pour traiter l'ensemble des situations de gêne existantes.

Cependant, une démarche a été entamée récemment.

Suite au rapport du groupe de travail présidé par l'Ingénieur Général BATSCH, un recensement de l'ensemble des "points noirs dus au bruit" a été réalisé auprès des services de l'Administration au début de l'année 1983 sur instruction du Premier Ministre (lettre du 30 Juillet 1982).

Le recensement a été dépouillé. Il permet de mieux situer les besoins économiques et techniques pour supprimer les points noirs situés à plus de 75 dB(A), et ceux situés dans la tranche 70 - 75 dB(A), de programmer notre effort sur plusieurs années, et de proposer une priorité dans les dossiers qui ont été élaborés.

III - REPRESENTATIVITE QUANT A LA GENE

a) Objectif quantifié d'une étude de bruit

L'analyse de la circulaire du 2 Mars 1983 précitée montre que lors de la création d'une voie nouvelle, l'objectif quantifié à respecter peut être sommairement exprimé de la façon suivante : la contribution acoustique de la voie nouvellement créée ne doit pas dépasser la valeur L_{eq}

(8 h - 20 h) = 65 dB(A). Pour autant que cela soit techniquement et économiquement possible, il convient de s'attacher à tendre vers des valeurs proches de 60 dB(A) et de donner priorité aux actions à la source.

Si le respect des objectifs précédents conduit à prévoir l'amélioration des isolements de façades, les prescriptions ci-dessus doivent être interprétées de la manière suivante : le surcroît d'isolement apporté à une façade de type ordinaire (qui atténue le niveau de bruit d'environ 22 dB(A)) doit être au moins égal à la différence entre le niveau de bruit prévisible et l'objectif. Ainsi, si l'on prévoit un niveau de bruit de 73 dB(A) et que l'on se fixe un objectif de 65 dB(A), l'isolement complémentaire de façade doit être d'au moins 8 dB(A), et l'isolement total à atteindre est d'au moins 30 dB(A).

b) Signification quant à la gêne

. Gêne globale :

Il est rappelé que le choix du Leq (8 h - 20 h) comme indicateur pertinent de la gêne des populations est issu des importantes études menées par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment et l'Institut de Recherche des Transports (Centre d'Evaluation et de Recherches des Nuisances et de l'Energie) à partir de 1970, dont l'essentiel est résumé dans le fascicule "Aspects de la gêne due au bruit de la circulation routière" du Guide du Bruit des Transports Terrestres (réf. biblio n° 3).

Parallèlement, des campagnes de mesure des niveaux sonores ont permis de connaître de façon extrêmement détaillée, les niveaux sonores auxquels ces riverains étaient soumis. Tous les indices, toutes les combinaisons d'indices (Leq, L₅₀, L₉₀, L_{L10}, LNP, etc...) ont été mesurés sur différentes périodes de temps.

Deux résultats sont issus de ces études :

- 1° - C'est le Leq mesuré ou prévu entre 8 h et 20 h qui est l'indicateur global le mieux corrélé avec les réponses de gêne. C'est donc lui qui est maintenant utilisé pour apprécier la gêne des riverains d'infrastructures de transports. Il est à noter que le Leq a été adopté au cours des dernières années par de nombreux autres pays, notamment l'Allemagne Fédérale, le Japon, les Etats-Unis d'Amérique, etc...
- 2° - La corrélation gêne-bruit, bien que faible, fait apparaître de façon significative, que la gêne d'une population est peu probable pour des niveaux inférieurs à Leq (8 h - 20 h) = 60 dB(A). Elle devient par contre quasi certaine pour des niveaux Leq (8 h - 20 h) supérieurs à 70 dB(A). De ces études résulte la fixation des objectifs à atteindre lors de la création d'infrastructures nouvelles.

Il importe de bien se rendre compte que le Leq (8 h - 20 h) n'est pas seulement représentatif de la gêne diurne. Il est représentatif de la gêne globale des populations soumises au bruit de la circulation, toutes périodes et tous effets confondus. Il est fiable dans les situations courantes, c'est-à-dire dans la plupart des situations effectivement rencontrées sur le terrain, pour lesquelles il existe une relation connue et stable dans le temps entre le trafic de jour et le trafic nocturne qui est proche de la moyenne nationale.

. Gêne spécifique en période nocturne.

L'indicateur ci-dessus est utilisé de façon opérationnelle pour évaluer la gêne globale (jour et nuit inclus) des personnes ou des populations.

Cependant, la période sur laquelle il porte (8 h - 20 h) lui confère une certaine ambiguïté. Bien des gens le rattachent en première analyse à la gêne de jour, et il est parfois difficile de le faire admettre comme indicateur représentant à la fois la gêne de jour et celle de nuit (ce qu'il est pourtant réellement). De plus, cet indicateur peut se révéler insuffisant pour des situations très particulières, notamment lorsqu'il y a un faible écart entre le bruit diurne et le bruit nocturne (écart inférieur à 5 dB(A)).

Pour ces raisons, la circulaire 82.908 du 27 Septembre 1982 sur la gêne nocturne institue le recours à un double indicateur, pour le jour et pour la nuit, lorsqu'il y a présomption d'une gêne spécifique en période nocturne.

Dans ce cas, il convient de respecter la plus contraignante des deux valeurs suivantes :

- si l'écart entre Leq (jour) et Leq (nuit) est supérieur à 10 dB(A), il faut et il suffit de veiller à ce que Leq (8 h - 20 h) soit maintenu inférieur à 65 dB(A) - à noter que la période nocturne prise ici en compte est la période 0 h - 5 h, et non la période de 20 h - 8 h.

- si l'écart entre Leq (jour) et Leq (nuit) est inférieur à 10 dB(A), il convient de veiller à ce que Leq (0 h - 5 h) soit maintenu inférieur à 55 dB(A).

L'indicateur spécifique de nuit a été mis au point grâce à des recherches sur la gêne apportée au sommeil.

Grâce à l'observation de l'électro-encéphalogramme (EEG) de nombreux dormeurs, on sait maintenant que des événements acoustiques d'une certaine importance peuvent modifier le déroulement du sommeil et provoquer :

- . une diminution de la durée totale du sommeil,
- . une modification du déroulement naturel des stades de sommeil, et de la durée totale passée dans chaque stade.

Pour ne pas nuire à la qualité du sommeil et créer une situation d'inconfort, il convient de limiter le nombre des événements acoustiques qui modifient le déroulement naturel des stades de sommeil.

C'est donc le nombre d'événements au-dessus d'un certain seuil qui permet de caractériser la gêne nocturne. Or, l'indicateur physique le mieux corrélé au nombre d'événements, celui qui prend en compte à la fois l'importance des événements et leur durée, c'est le Leq. Ce n'est pas le L_1 , indice de crête, qui, lui, n'est relié qu'à l'événement le plus important au cours d'une période donnée.

Cependant, il existe une difficulté pour l'utilisation de ces seuils : si l'on sait prévoir le débit moyen journalier, le trafic nocturne, lui, et, dans ce trafic, la part des véhicules légers et celle des poids lourds sont très difficile à prévoir. Or, le nombre de PL nocturne détermine largement la connaissance, et donc la prévision du Leq nuit. Ceci fait l'objet de nombreuses recherches aujourd'hui.

IV - TECHNIQUES DE REDUCTION DU BRUIT

4.1 - Enjeu des mesures de réduction

Les situations de bruit maximum relevées in situ sont les suivantes :

* niveau instantané de crête : (bruit maximum d'une durée de 0,2 s enregistré au passage du véhicule) : 80 dB(A) pour les véhicules légers, 91 dB(A) pour les poids lourds, 76 dB(A) pour les véhicules 2 roues les plus bruyants, selon la réglementation applicable dans les pays de la Communauté Economique Européenne sur les niveaux de bruit maximum autorisés. En fait, certains dépassements de ces normes peuvent être constatés in situ : peu importants pour les véhicules légers, jusqu'à 100 dB(A) pour les poids lourds, jusqu'à 90 voire 95 dB(A) pour certains 2 roues. Ce sont ici, rappelons-le, des niveaux de bruit enregistrés sur des périodes très brèves : 0,2 à 0,5 seconde.

* niveau moyen maximum : (moyenne énergétique (Leq) des bruits perçus sur de longues périodes), jusqu'à 82 dB(A) en bordure immédiate du boulevard périphérique de Paris (220 000 véhicules par jour) durant la période (8 h - 20 h), et 82/83 dB(A) en bordure immédiate des autoroutes A1 - B6 au Sud de Paris, (4 x 3 voies de circulation soit une emprise de 70 m de largeur), pour 160 000 véhicules par jour circulant à 80/100 km/h, toujours exprimé en Leq (8 h - 20 h).

* les niveaux sonores moyens usuels : (Leq = moyenne énergétique des bruits perçus, il dépend du niveau maximum des sources et de la durée du bruit), que l'on observe couramment dans une rue de centre urbain ou aux abords d'une autoroute se situent aux alentours de 72 à 76 dB(A) en façade des habitations.

Rappelons ici, que dans une rue de centre urbain de 12 à 15 m de largeur, les niveaux moyens émis par des véhicules circulant à environ 50 à 60 km/h sont approximativement les suivants :

débits en véhicules par heure	Niveau sonores Leq (1 heure) en dB(A) *	débits journaliers approximatifs correspondants
6 v/h	51 dB(A)	90 v/j
60 v/h	61 dB(A)	900 v/j
100 v/h	63 dB(A)	1500 v/j
500 v/h	70 dB(A)	7500 v/j
1000 v/h	73 dB(A)	15000 v/j
2000 v/h	76 dB(A)	30000 v/j

Nous constatons qu'une rue apparemment très calme (6 véhicules/heure soit 1 véhicule toutes les 10 minutes) possède un niveau sonore de 51 dB(A) et que les rues normalement circulées ont des niveaux supérieurs à 65 dB(A). Les grandes voies de centre urbain ont toujours des circulations supérieures à 500 v/h et sont généralement exposées à plus de 70 dB(A).

On le constate, l'efficacité qu'il convient de donner aux actions de réduction de bruit est de l'ordre de 10 à 15 dB(A) dans les situations courantes, et jusqu'à 20 dB(A) dans les situations les plus critiques.

4.2 - Principales mesures de réduction du bruit.

L'action de réduction des bruits excessifs, pour être réellement et pleinement efficace, doit porter sur tout ou partie des maillons d'une chaîne qui va de la source émettrice à la personne qui subit le bruit. On peut distinguer 3 catégories de moyens de réduction du bruit :

- ceux qui portent sur la source elle-même (les véhicules en circulation) ;
- les écrans acoustiques : par définition ce sont tous les obstacles qui modifient la propagation du bruit et créent une zone "protégée" ;
- tous les éléments permettant un meilleur isolement acoustique des façades des bâtiments soumis au bruit.

L'action sur la source peut permettre, dans les hypothèses les plus optimistes, de diminuer de 3 à 5 dB(A) le niveau sonore des véhicules légers, de 7 à 8 dB(A) celui des poids lourds. C'est une action à long terme (il faut 10 ans pour renouveler 90 % du parc automobile et 20 ans pour le renouveler totalement). Elle est limitée en efficacité par le bruit de roulement qui n'a pas encore trouvé de solution technique satisfaisante à ce jour. Or, ce bruit devient prépondérant à plus de 60 km/h. Cette vitesse est pratiquée quand les routes sont dégagées, en particulier la nuit ! On le constate, l'action sur les véhicules ne permet pas de résoudre, à elle seule, le problème du bruit.

L'action sur les façades est de loin la plus efficace et la moins coûteuse. Elle permet d'améliorer l'isolement acoustique jusqu'à une valeur de 40 dB(A), c'est-à-dire 20 dB(A) d'efficacité supplémentaire par rapport à une fenêtre courante. De plus, elle protège du bruit de toutes les sources, et convient particulièrement sur les sites où des enchevêtrements routiers limitent l'efficacité des écrans acoustiques. Son inconvénient réside dans le fait qu'elle ne résout qu'une partie du problème, elle n'apporte le calme que fenêtre fermée, et ne protège pas les espaces extérieurs au niveau du sol.

Les écrans acoustiques constituent souvent une solution efficace (8 à 12 dB(A) d'efficacité en moyenne), qui protège les bâtiments, mais aussi les espaces extérieurs, et qui apporte une réduction du bruit immédiate dès sa construction. Les avantages qu'ils présentent expliquent leur développement dans la période récente.

La conception des voies peut "intégrer" la préoccupation bruit à toutes les étapes du processus d'élaboration des projets d'infrastructure. Elle portera sur les différentes caractéristiques de la voie :

- . le tracé (éloignement)
- . la position de la voie dans le profil en travers
- . le profil en long
- . les débits ou l'organisation des différents flux
- . les vitesses.

4.3 - Les écrans acoustiques : vers une optimisation des techniques.

a) Valeur du marché.

De nombreux écrans acoustiques ont été réalisés en France, le long des voies routières depuis 1972. On estime aujourd'hui la quantité d'écrans réalisés à environ 200 000 m² en dix ans, soit 40 à 50 km d'écran de hauteur comprise entre 3 et 4 m.

Ces écrans sont construits en matériaux ou combinaisons de matériaux divers parmi lesquels on trouve :

- béton (60 %),
- matériaux plastiques (4 %),
- mousse d'argile et briques absorbantes (5 %),
- verre et plastiques transparents (22 %),
- métal (5 %).

A ces écrans, il faut ajouter les buttes de terre réalisées le plus souvent en périphérie ou le long des routes de liaison interurbaines. Il faut également ajouter, de plus en plus, les écrans construits le long de voiries départementales ou communales nuisantes.

b) Bilan

Cependant, la gestion de ce marché n'a pas actuellement permis de trouver les optimums technologiques, économiques et industriels auxquels on aurait pu s'attendre.

Un groupe de travail, créé au sein du Conseil Général des Ponts et Chaussées et présidé par Monsieur l'Ingénieur Général BATSCH, a pu faire les observations suivantes à ce sujet :

- ce marché est d'ampleur limitée, mais non négligeable ;
- les exigences techniques minimales ne sont pas toujours respectées lors de la conception des ouvrages ;
- les produits réalisés peuvent être considérés comme coûteux ;
- l'apparence des écrans, bien que très élaborée, et résultant d'importantes études, est parfois discutable et discutée ;
- le marché est marqué par le fait que pour chaque ouvrage, une solution nouvelle est réinventée ;
- la concurrence pour la dévolution des études et marchés d'exécution n'est pas toujours suffisamment ouverte pour aboutir au moindre coût ;
- la réception des ouvrages nécessite la mise au point des méthodes plus performantes.

c) Perspectives.

La Direction des Routes a mis au point et développe à présent une stratégie plus précise pour la gestion du marché des écrans acoustiques.

Ses objectifs peuvent être formulés de la façon suivante :

- Recherche d'un moindre coût pour les ouvrages ;
- mise en oeuvre d'une stratégie d'organisation du marché basée sur les orientations suivantes :
 - . recherche d'une industrialisation de tout ou partie des éléments entrant dans la composition des écrans acoustiques, et réutilisation d'éléments modulaires ou de procédés technologiques complets sur différents sites ;
 - . rationalisation de l'approche visant à l'intégration architecturale et urbaine des écrans. Situation de l'intervention des architectes dans le processus d'étude et définition plus précise des objectifs de cette intervention ;
 - . meilleure définition du contenu acoustique des études et recherche de procédés permettant de faire respecter réellement les recommandations et exigences techniques minimales.

Il convient d'ajouter que ces objectifs sont à rechercher dans le respect des contraintes générales ou spécifiques qui marquent la mise en oeuvre des écrans en bordure des voies routières et notamment :

- pérennité suffisante des ouvrages ;
- minimisation des coûts d'entretien,
- respect des contraintes liées à la sécurité, que ce soit pour les usagers de la voie ou les tiers ;
- mise en oeuvre d'ouvrages répondant à un bon niveau d'exigence en matière architecturale et urbaine ;
- diffusion d'une recommandation technique par la Direction des Routes qui portera sur :
 - . le contenu et la conduite des études de conception des écrans acoustiques,
 - . la dévolution des marchés d'études,
 - . la dévolution des marchés de travaux,
 - . la réception des ouvrages.
- rédaction d'une note type :
 - . présentation d'un cadre type pour les notes de calcul de bruit,
 - . présentation d'un cadre type pour les descriptions des mesures in situ.

- rédaction de clauses types de marchés,
- rédaction d'un catalogue de solutions de base,
- mise en oeuvre d'un programme de recherche - développement et expérimentation sur les écrans acoustiques,

Les efforts en cours pour rationaliser les choix techniques et mieux adapter les produits aux conditions réelles de leur implantation, aux fonctions réelles qu'ils assument et aux conditions économiques du marché devraient permettre de trouver encore des produits de meilleure qualité, d'efficacité accrue, pour un moindre coût.

La mise en oeuvre opérationnelle de ces produits devrait permettre de modifier l'image de marque des grandes voies modernes : rocares, voies rapides urbaines, que l'Etat met en oeuvre et réalisera dans l'avenir. Le respect du calme nécessaire pour les riverains de ces voies devrait constituer le meilleur argument pour désamorcer des plaintes encore trop souvent légitimes, et participer à une conception des projets dont la qualité incontestable constituera le plus beau résultat.

II - LA NECESSITE DE POURSUIVRE LES REFLEXIONS

Les réflexions qui ont été menées au sein du groupe de travail dans le but d'élaborer le présent document de synthèse ont également permis de mettre en évidence les thèmes de recherche qui nécessitent d'être lancés ou approfondis.

Cette esquisse de programme de recherche est précédée d'une présentation des études actuellement en cours.

II.1. ETUDES EN COURS

Les études et recherches dans le domaine du bruit ferroviaire se poursuivent, soit au sein même des entreprises exploitantes, soit en collaboration avec des organismes extérieurs. Elles complètent ou s'intègrent dans les programmes d'études conduites par l'Union Internationale des Chemins de Fer (U.I.C.). Les études en cours sont présentées ici en distinguant l'aspect "gêne" et l'aspect "physique".

II.1.1 - ETUDES RELATIVES A LA GENE

- Une étude menée par l'I.R.T.-CERNE en liaison avec la S.N.C.F. a pour but de suivre les réactions d'une population à l'implantation d'une ligne nouvelle. 2 sites ont été choisis pour cette étude : l'un le long de la ligne T.G.V. Sud-Est et l'autre le long d'une ligne de banlieue. L'étude a pour but de séparer l'impact acoustique proprement dit de l'impact du changement de situation en prenant en compte les facteurs sociaux et notamment l'attente de la population.
- Une étude en laboratoire, également menée par l'I.R.T.-CERNE, a pour but d'évaluer l'interaction entre bruit de fond et bruit de passage supplémentaires, et les notions de cumul de niveaux sonores (effet de masque, d'émergence), et de juger de la nécessité d'apporter des corrections en fonction de la situation.
- La S.N.C.F. poursuit ses propres recherches en matière de gêne due au bruit de train, en prolongement de l'étude réalisée par l'I.R.T.-CERNE en 1978, et approfondit ainsi la comparaison avec la gêne occasionnée par le bruit routier.
- En collaboration avec les réseaux européens, la R.A.T.P. et la S.N.C.F. participent aux travaux du comité "Bruit dans le domaine ferroviaire" créé par l'Office de Recherches et d'Essais (O.R.E.) de l'U.I.C.. L'étude de la gêne est l'un des thèmes retenus par ce comité.

II.1.2 - ETUDES ACOUSTIQUES ET TECHNOLOGIQUES

- Des études fondamentales, destinées à mieux connaître les mécanismes de génération du bruit, sont actuellement en cours, soit dans le cadre de l'U.I.C., soit au niveau français.
Le comité de l'O.R.E. mentionné ci-avant travaille sur les thèmes suivants :
- . étude de la génération du bruit au contact rail-roue (participations de la S.N.C.F. et de la R.A.T.P.)
- . étude du bruit rayonné par les wagons de marchandises (participation de la S.N.C.F.)
- . étude du bruit dû aux locomotives électriques et diesels (participation de la S.N.C.F.).

Les constructeurs de matériels ferroviaires intègrent le critère bruit dans la conception des matériels futurs. Ainsi la R.A.T.P. s'efforce-t-elle d'allier performances et silence au niveau de la motorisation d'"Aramis".

- Les directions concernées de la S.N.C.F. et de la R.A.T.P. travaillent dans le sens d'une amélioration continue des matériels modernes, tant sur le plan du bruit perçu par les passagers que sur celui de la nuisance subie par les riverains. Parmi les études menées dans ce sens par la R.A.T.P., on peut citer l'insonorisation des caisses, la réduction des émissions sonores dues aux mécanismes des portes et aux circuits pneumatiques de freinage, la réduction du bruit de roulement par l'utilisation d'essieux orientables et de roues insonorisées.
- Des études spécifiques au bruit rayonné par les ponts métalliques sont menées par la S.N.C.F. et la R.A.T.P. en liaison avec l'Institut de Chimie et de Physique Industrielles (I.C.P.I.) de Lyon.
- La S.N.C.F. et la R.A.T.P. continuent d'étudier les phénomènes de propagation du bruit et des vibrations. La S.N.C.F. s'efforce d'optimiser la mise en oeuvre des différents types de protection (notamment merlons et écrans) pour les zones sensibles.

Les études de la R.A.T.P. visent également à limiter la transmission aérienne par des écrans et surtout la transmission solidienne par l'utilisation de nouvelles poses de voie et de nouveaux matériaux amortissants.

- Des études d'impacts sont réalisées lors des créations de lignes nouvelles et des modifications importantes d'installations existantes. En ce qui concerne le projet de desserte de l'Ouest de la France par des trains à grande vitesse, des études acoustiques très complètes ont été réalisées ou sont en cours de réalisation :
 - . sur le tracé existant entre Montparnasse et Montrouge, la S.N.C.F. s'est engagée à réduire la nuisance de bruit subie par les riverains grâce à l'apport des travaux réalisés pour le T.G.V. Atlantique. Pour atteindre cet objectif, la S.N.C.F. effectue de nombreuses mesures afin de décrire la situation présente et des calculs prévisionnels intégrant divers scénarios de protection afin d'évaluer la situation future.
 - . Sur le tracé futur en banlieue parisienne, les études en cours doivent permettre de sélectionner les solutions optimales de protection acoustique.
 - . Sur le reste du tracé, plus de 2 000 études acoustiques partielles ont été effectuées, il s'agit maintenant d'étudier certains points particuliers et notamment les contournements de Tours et du Mans.

II.2 - ESQUISSE D'UN PROGRAMME DE RECHERCHES

Les thèmes de recherche sont regroupés ci-après en distinguant l'étude de la gêne et les études acoustiques et technologiques. Pour chaque thème sont indiqués entre parenthèses les organismes susceptibles de travailler sur le sujet.

. Etude de la gêne

- Effets physiologiques (cardiovasculaires) provoqués par des bruits à fort niveau de crête ; effets sur le sommeil et notamment l'endormissement.

Une étude spécifique sur les bruits de train, analogue à ce qui a été réalisé pour les bruits des deux roues ou des poids lourds, pourrait être engagée.

- Caractères spécifiques de la gêne psychosociologique due aux bruits de train :
 - . Enquête longitudinale sur adresses I.N.S.E.E. choisies en bordure de voies ferrées, pour la prévision de la sensibilité aux phénomènes sonores.
 - . Enquêtes en profondeur sur les habitants proches des voies ferrées, pour étudier la dynamique de la gêne (notamment comment se construisent les représentations collectives, comment se développent et s'entretiennent les phénomènes de rumeur).
 - . Analyse psycho-acoustique de l'effet d'un événement isolé à forte énergie acoustique ; bruyance, critères d'identifications, émergence, intelligibilité, effets de masque, conséquences sur la vie sociale... .
 - . Vérification, sur un grand échantillon matériel, de l'extension des effets pathogènes différentiels de l'exposition prolongée (15 à 20 ans) à différentes sources de bruit (routier ou ferroviaire).

- Indicateurs :

- . Vérification et précision du champ d'application des indicateurs actuels (Leq 8 h - 20 h) au regard de leur aptitude à représenter la gêne des populations et des individus.
 - . Recherche éventuelle d'indicateurs plus adaptés à la représentation de la gêne globale ou de certains aspects sectoriels (gêne nocturne, gêne en période de soirée...) et mise au point éventuelle d'une batterie d'indicateurs couvrant l'ensemble des situations de gêne (voies à grande vitesse, voies à forts trafics de trains de marchandises, proximités des gares,...).
 - . Recherche de seuils adaptés à ces indicateurs. Ces seuils pourront déterminer deux limites pour chaque indicateur : limite entre confort et non-confort, limite entre inconfort et gêne individuelle et sociale.
 - . Vérification de la validité du "bonus" rail par rapport à la route (généralement admis comme le fait qu'une gêne équivalente est engendrée par un "Leq voie ferrée" supérieur de 5 dB (A) à un "Leq voie routière").
 - . Effets physiologiques des vibrations ; étude de la gêne "sensible" par mise en jeu de vibrations d'éléments secondaires (planchers, vitres, cloisons) ou émissions indirectes de bruits aériens.
- Etude des sites jumelés route-rail, lois de composition des bruits ; composition et apparition des réactions de gêne.
Le rapport GEFUR pourra servir de document de base.

. Etudes acoustiques et technologiques

- Technologie des écrans : recherches visant à optimiser la technologie des écrans actuellement mis en oeuvre le long des voies ferrées, dans le sens d'une efficacité acoustique accrue ou maintenue et d'une minimisation des coûts tout en respectant les sujétions d'entretien et d'exploitation (emplacement, dimensions, formes, matériaux utilisés, préindustrialisation et répétitivité des ouvrages réalisés), selon une démarche analogue à celle mise en oeuvre pour les écrans routiers au cours des dernières années.
- Recherche de protections adaptées pour réduire le bruit à proximité des appareils de voie.
- Analyse des problèmes spécifiques rencontrés à proximité des gares de voyageurs, gares de triage, chantiers.
- Recherche spécifique pour l'amélioration "acoustique" des viaducs métalliques.

- Analyse des mécanismes de génération du bruit sur les véhicules en circulation : contact roue - rail, influence du rail, des traverses, effets de caisse, de bogies,...
- Analyse des vibrations transmises par voies solidiennes et basses fréquences éventuelles transmises par voie aérienne.
- Amélioration des modèles de prévision du bruit des trains :
 - . recherche d'application de modèles plus précis sur l'efficacité des écrans
 - . meilleure définition des lois de propagation
 - . création d'un programme adaptable sur calculette ou micro-ordinateur.

. Transports urbains ferroviaires

En dépit d'une localisation plus restreinte que les réseaux des transports interurbains, ce type d'activité ferroviaire concerne de grandes métropoles à forte densité d'habitation. L'expérience des gestionnaires des réseaux de transports urbains ferroviaires a montré certains aspects très particuliers de la gêne aux riverains, qui pourraient donner lieu à des recherches spécifiques portant sur trois thèmes :

- l'activité ferroviaire pendant la période d'endormissement (et non pendant le sommeil, puisque au moins à Paris, les circulations cessent vers 1 h 15) engendre une gêne spécifique et distincte des gênes en période de soirée ou nocturne. Sa nature pourrait être approfondie et précisée par des recherches adaptées ;
- l'importance des événements sonores isolés pendant les derniers cycles du sommeil ("le premier train de 5 h 30" à la reprise du service) reste à étudier. La création de modèles de prévision, d'indicateurs adaptés est encore à réaliser ;
- la synergie bruits-vibrations dans des situations particulières, sujet en position horizontale, accrochage de résonances vibratoires d'éléments mobiliers, lits par exemple, est encore à explorer.

A N N E X E

ELEMENTS D'ACOUSTIQUE

I - PRESSION SONORE - NIVEAU DE PRESSION SONORE - DECIBELS

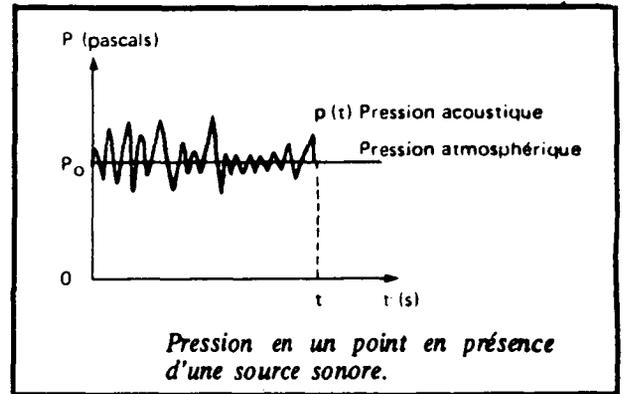
Les vibrations acoustiques se traduisent en un point par des variations de la pression qui, en l'absence de perturbations, est P_0 , la pression atmosphérique, et par une mise en vitesse des particules d'air situées en ce point.

En un point et à un instant donnés, la pression résultante totale est P .

La pression acoustique est donné par la relation :

$$p(t) = P - P_0$$

$p(t)$ varie avec le temps.



Un bruit est la sensation qui correspond à une variation aléatoire de la pression acoustique. Ainsi, la pression acoustique résultant du passage d'un train donne une sensation de bruit. Les variations en fonction du temps de la pression acoustique correspondant à un bruit présentent généralement peu d'intérêt et on utilise plus volontiers leurs propriétés statistiques. C'est ainsi qu'on peut se contenter de connaître $p(t)$ par sa valeur efficace, p_{eff} , entre deux instants extrêmes t_1 et t_2 définie par :

$$p_{eff}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) \cdot dt$$

La période $t_2 - t_1$ correspond, dans les appareils de mesure (sonomètres) à la constante de temps sur laquelle le signal est indiqué, soit slow (0,5 s), soit fast (0,2 s), le dernier étant utilisé pour la mesure du bruit des trains.

Or l'énergie d'un son étant justement proportionnelle au carré de P_{eff} , le rapport entre l'énergie sonore minimale détectée par l'oreille et l'énergie sonore maximale supportée est de 1 à 10^{12} ; c'est dire que l'on a à faire à des chiffres difficilement manipulables. L'acousticien préfère donc utiliser une échelle logarithmique de quantification.

C'est ainsi qu'il a défini le NIVEAU DE PRESSION SONORE noté L_p ou L

$$L = L_p = 10 \log_{10} \frac{P_{eff}^2}{P_o^2}$$

où p_o est la pression de référence égale à 2.10^{-5} Pascal. Elle correspond sensiblement à la plus petite fluctuation de pression de l'air que l'oreille puisse détecter, pour un ensemble d'individus.

L (ou L_p) s'exprime en DECIBELS noté dB.

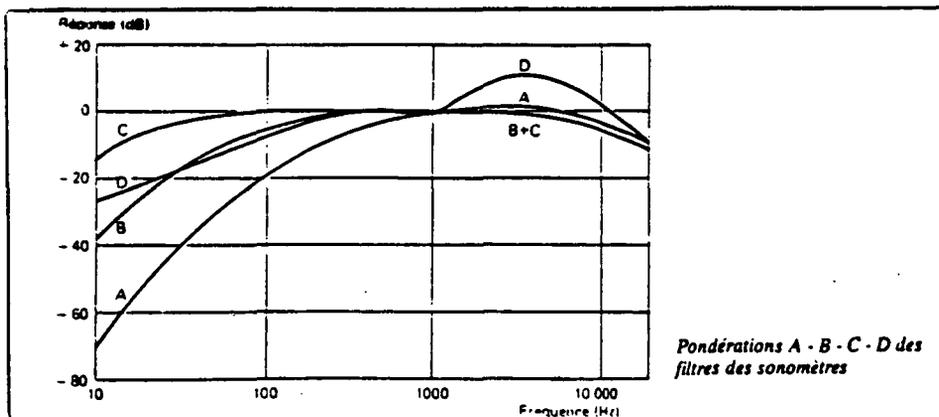
II - LA PERCEPTION DU BRUIT

II.1 - Niveau instantané - Pondération A

Le niveau de pression sonore ainsi exprimé en dB est une grandeur physique : il ne traduit pas la perception du son par l'homme.

L'oreille en effet n'est pas sensible de la même manière aux différentes fréquences du domaine audible (20 Hz à 18 000 Hz).

Pour tenir compte de cette sensibilité et après de très nombreuses mesures et études, les acousticiens ont mis au point une série de filtres de pondération correspondant à la réponse de l'oreille pour différents niveaux d'excitation. La réponse en fréquence de ces filtres est exprimée par les courbes de pondération (A, B, C, D) tracées sur la figure ci-dessous.

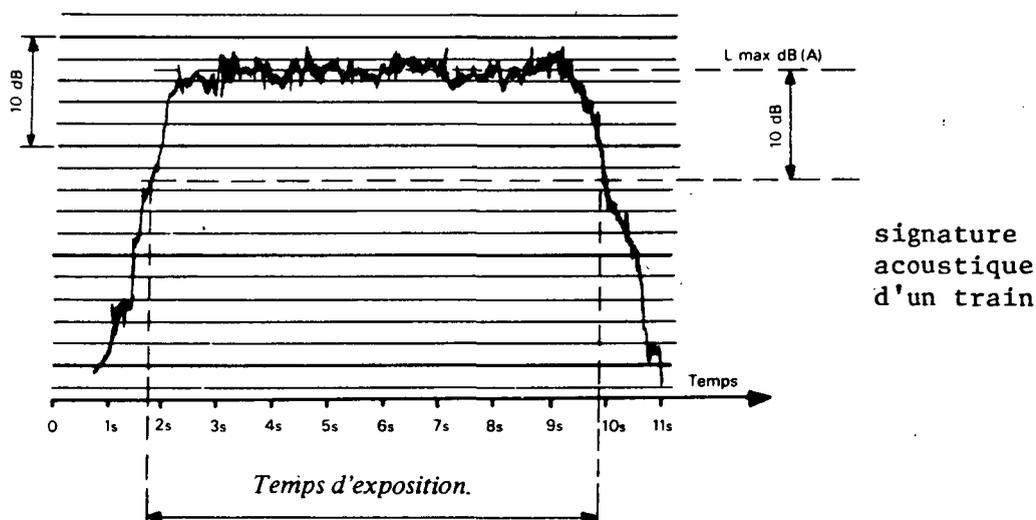


En fait, pour la grande majorité des bruits - bruits industriels et bruits de trafic terrestre - la réponse de l'oreille est proche du filtre "A" ; dans la pratique, les niveaux de pression sonore reçus correspondant à ces types de bruits - de trains en particulier - sont exprimés selon l'unité dB (A). Tous les appareils de mesure du bruit - appelés sonomètres - sont équipés au minimum d'un filtre de pondération "A", de sorte qu'on peut y lire à chaque instant la valeur du niveau et de la pression sonore, exprimée en dB(A), effectivement reçue par l'oreille humaine.

II.2 - Prise en compte de la durée dans la perception du bruit

II.2.1 - Définition de la durée ou "temps d'exposition"

Le bruit, quelle que soit sa composition en fréquence, a été défini comme une variation aléatoire du niveau de pression acoustique au cours du temps. C'est donc un phénomène essentiellement fluctuant dans le temps, bien illustré par exemple par "la signature acoustique" d'un train qui traduit la variation du niveau de pression acoustique reçue par un observateur pendant le passage d'un train.



L'observation de cette signature temporelle permet de repérer essentiellement deux grandeurs

- . le niveau maximum, noté L_{max} , reçu au cours du passage
- . le facteur de durée, égal au rapport du niveau d'exposition au bruit L_{Ax} , sur le niveau maximum L_{max} . $t_e = \frac{L_{Ax}}{L_{max}}$
- . par convention, pour un bruit de train, les praticiens utilisent un facteur de durée appelé temps d'exposition, défini comme

$L_{max} - 10$.

pour exprimer la perception d'un bruit ou prendre en compte cette durée d'exposition.

Remarque : Le lecteur trouvera dans le chapitre II le calcul de cette grandeur.

II.2.2 - Les indices statistiques

Différents indices permettent de décrire le bruit sur une période de temps. Les principaux sont issus soit de l'analyse statistique, soit des indices énergétiques.

L'élément de base est l'évolution temporelle du niveau de pression sonore exprimée en dB(A).

Les indices statistiques définissent les niveaux atteints ou dépassés pendant un certain pourcentage de temps. Par exemple :

- le L_1 définit le niveau atteint ou dépassé pendant 1 % du temps : il est proche du bruit maximal,
- le L_{50} définit le niveau atteint ou dépassé pendant 50 % du temps : il caractérise le bruit moyen,
- le L_{90} (ou L_{99}) définit le niveau atteint ou dépassé pendant 90 (ou 99) % du temps.

Ces indices présentent l'inconvénient de n'être représentatifs que si l'échantillon statistique est suffisant et si la distribution est proche d'une loi normale (ce qui est rarement le cas du bruit ferroviaire). Pour une meilleure représentativité, et pour permettre de développer des méthodes de calcul automatique, on leur a préféré des indices énergétiques dont la formulation mathématique en fonction de l'énergie est connue de façon précise.

II.2.3 - Le niveau acoustique équivalent

Le NIVEAU ACOUSTIQUE EQUIVALENT, noté L_{eq} , exprime le niveau de l'énergie acoustique reçue par un observateur pendant la période de temps T, c'est à dire qu'il représente un niveau de bruit constant qui aurait été produit avec la même énergie que le bruit réellement perçu pendant cette période.

Un signal sonore dû à une circulation ferroviaire (ou routière) fluctue au cours du temps pendant une durée d'observation T. Pendant ce temps T, ce signal représente une certaine énergie acoustique. Le L_{eq} , c'est le niveau de la somme T de cette énergie au cours du temps, exprimée en décibels.

Ainsi, il s'exprime sous sa forme continue par :

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2_{eff}}{p_0^2} \cdot dt$$

soit, à partir du niveau instantané $L(t)$, l'expression suivante

$$Leq = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L(t)}{10}} dt$$

où $L(t)$ est le niveau de pression instantanée,

et sous sa forme discrète par :

$$Leq = 10 \log \frac{1}{T} \sum_i 10^{\frac{L_i}{10}} \cdot t_i$$

où L_i est le niveau instantané émis pendant l'intervalle de temps t_i .

Si $L(t)$ et L_i sont exprimés en dB(A), Leq sera également exprimé en dB(A). On le note souvent Leq_A .

Le Leq correspondant au passage d'un train peut être formulé avec une bonne approximation (voir la figure de la signature acoustique) de la façon suivante :

$$Leq_T = 10 \log \left[\frac{te}{T} \cdot 10^{\frac{Lmax}{10}} \right]$$

où T est la durée en secondes pendant laquelle on veut calculer Leq .

Formulations particulières :

. Leq sur la durée du passage : $T = te$

$$\text{alors } Leq = 10 \log \left[10^{\frac{Lmax}{10}} \right]$$

soit $Leq_{te} = Lmax$

. Leq du passage d'un train sur 1 heure

$$Leq_{1h} = 10 \log \left[\frac{te}{3600} \cdot 10^{\frac{Lmax}{10}} \right]$$

$$Leq_{1h} = L_{Max} + 10 \log te - 35,5$$

. Leq du passage de N_i trains identiques sur 1 heure

$$Leq_{1h} = L_{Maxi} + 10 \log t_{e_i} + 10 \log N_i - 35,5$$

. Leq du passage de plusieurs types de trains sur 1 heure

$$Leq_{1h} = 10 \log \sum_{i=1}^{i=h} 10^{\frac{Leq_i}{10}}$$

B I B L I O G R A P H I E .

1 - BRUIT FERROVIAIRE

- Guide du bruit des transports terrestres (6 fascicules)
- C.S.T.B. - Note de calcul du niveau acoustique équivalent du bruit de chemin de fer (janvier 1980)
- C.S.T.B. - Le bruit au voisinage des voies ferrées (septembre 1972)
- Documentation S.N.C.F.
 - Rapport A 42-01 - Rapport intérimaire 1975 sur le bruit ferroviaire
 - A 42-02 - Bruit des Chemins de fer
Etat des connaissances 1976
 - A 42-03 - Propagation du seuil dans l'environnement ferroviaire
Méthodes de calcul 1976
 - A 42-04 - Moyens de protection contre le bruit ferroviaire 1977
 - A 42-05 - Etude des paramètres "voie" et "matériel" influant sur le bruit ferroviaire 1979
- J. REYBAROY - Connaissances actuelles sur le Bruit dans le domaine ferroviaire (1976)
- H. AUTRUFFE - Article "Revue Générale des Chemins de Fer", mai 1975 : Chemin de Fer et Environnement.
- E. PARENT de CURZON - Article "Revue Générale des Chemins de Fer", mai 1982 : Prédétermination des niveaux de bruit dans l'environnement ferroviaire
- D. LANCIEN - M. VERNET - Séminaire T.C.E., novembre 1984 - "Trains à Grande Vitesse et Environnement".
- G. PACHIAUDI et M. VERNET - Le bruit des trains - Aspects physiques et psychosociologiques. I.R.T. - C.E.R.N.E., décembre 1984.

2 - DOCUMENTATION RELATIVE AUX METROS

- La R.A.T.P. et le bruit Bulletin de documentation
AVRIL-MAI 1978

 - Recherches sur la protection
contre les bruits d'origine
ferroviaire R.A.T.P. 1977

 - Problèmes de bruits et vibrations
dus aux transports ferroviaires
en milieu urbain ;
dispositifs de protection Travaux SEPTEMBRE 1981

 - Etudes paramétriques de méthodes
curatives pour la réduction de
vibrations dues au métro par un
code de calcul aux éléments finis Rapport de recherche
Ecole Centrale des Arts et
Manufactures
(diffusion restreinte)
- Rapports de l'Office de
Recherche et d'Essais de
L'Union Internationale
des Chemins de fer
- Comité O.R.E. C 137 "Bruit dans le domaine ferroviaire"
1. Exposition au bruit et RP 4 (octobre 1977)
gêne due au bruit RP 17 (avril 1981)
DT 125 (septembre 1981)

 2. Propagation des bruits de RP 5 (octobre 1977)
circulation dans les environs RP 6 (avril 1977)
des installations ferroviaires RP 10 (avril 1979)
RP 11 (avril 1979)

 3. Mesures de lutte contre le bruit RP 1 (avril 1975)
à prévoir dans les véhicules RP 8 (avril 1979)
ferroviaires anciens et machines RP 9 (avril 1979)
d'entretien de la voie RP 14 (septembre 1980)

 4. Bruit émis par le processus de RP 2 (octobre 1975)
roulement roue-rail et remèdes RP 3 (avril 1976)
possibles RP 7 (octobre 1977)
RP 13 (septembre 1980)
RP 15 (septembre 1980)
RP 16 (avril 1981)

 5. Comparaison acoustique des RP 12 (avril 1981)
différents types de ponts

- Comité C 163 "Bruit dans le domaine ferroviaire"

Publications en cours.

3 - BRUIT DES TRAMWAYS

- "Diminution du bruit dans la zone des bogies de véhicules de métro léger", par GROSS et MESCHEDE, (langue allemande).
- "Résultats des mesures de bruit des véhicules modernes de tramways, métros légers, métros et systèmes de transport non conventionnels", par GROSS et BLENNEMANN (langue allemande) ;
- "Propagation, émission de bruits et vibrations des véhicules urbains sur rails", par BLENNEMANN (langue allemande) ;
- "Possibilité de connaître les niveaux de bruits et vibrations à la source et de construire des véhicules sur rails moins bruyants", par BLENNEMANN (langue allemande) ;
- "Résultats de recherches pour la réduction des bruits et vibrations des systèmes de véhicules urbains sur rails", par GROSS et BLENNEMANN (langue allemande) ;
- "Diminution du bruit occasionné par les véhicules de tramway", par TOPFER, BEYERSDORF et GROSSMANN (langue allemande) 1 ;
- "Evaluation nationale du bruit des transports publics sur rail", par CHILSHOLM (ouvrage complet - langue anglaise).

4 - VIBRATIONS

- Modélisation du phénomène de propagation des vibrations dans les immeubles soumis à des excitations du type de celles rencontrées en milieu urbain - ECOPOL - 1980 (disponible au Ministère de l'Environnement - SRETIE).
- Point des connaissances concernant les vibrations mécaniques sous l'angle des facteurs humains. Docteur HO - INRS - Rapport du 25-06-81.
- Note technique "Etude et Modélisation du phénomène de transmission dans les sols des vibrations produits par les transports ferroviaires - Société BERTIN - Rapport Janvier 1980.
- Dégradation de l'environnement par les vibrations - Etude sur la propagation des ondes dans le sol - Laboratoire des Ponts et Chaussées de Strasbourg. 1982.

Comité O.R.E. D 151 "Vibrations"

- . D151 - RP 1 - Vibrations transmises par le sol.
Recherches destinées à l'évaluation du problème SEPTEMBRE 1981

 - . D 151 - RP 2 - Analyse des techniques utilisées
pour la protection contre les vibrations AVRIL 1982

 - . D 151 - RP8 - Expérimentation de dispositifs
élastiques sur la pose ballast dans les
souterrains du métro à paraître

 - . D 151 - RP 9 - Etude expérimentale des facteurs
influençant les vibrations et les bruits
secondaires produits par les circulations
ferroviaires à paraître
- Norme internationale ISO 2631 - 1978. Guide pour l'estimation de
l'exposition des individus à des vibrations globales du corps.
Référence n° ISO 2631 - 1978.
- Le Comité technique TC 108 de l'ISO est chargé de la révision de la
norme ISO 2631. Diverses études par ce Comité ont été réalisées en ce
qui concerne l'exposition des individus aux vibrations dans les
bâtiments.
- Draft proposal ISO/DP 2631/DADI (ISO TC 108/SC4 N 114) - 4/12/1981
- Handbook of urban rail noise and vibration control - Preliminary
Draft by H.J. SANRENMANN et G.P. WILSON
(Feb. 1981) - WILSON INRIG & ASSOCIATES INC
prepared under contract - DOT - TSC - 1613
- Prediction and control of noise and vibration in rail
Transit systems (1978)
L.G. KURTZWEIL et R. LOTZ
Report DOT n° UMTA - MA - 06 - 0025 - 78 8

5 - ETUDES DE GENE

- 1 - M. MAURIN - IRT-CERNE - Enquête nationale sur les nuisances dues aux transports en France. Collection Recherche Environnement n° 22 - Ministère de l'Environnement, Mission des Etudes et de la Recherche. 1er trimestre 1984.
- 2 - D. AUBREE - La gêne due au bruit des trains. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Janvier 1975
- 3 - M. VERNET, M. VALLET et al. - Gêne provoquée par les bruits de trains. Convention IRT-CERNE/SNCF. Rapport final NNB 139. Novembre 1979.
- 4 - M. VERNET - Comparaison between train noise and road noise annoyance during sleep. Journal of Sound and Vibration JSV-1983-8(2).
- 5 - Etude de la gêne due au bruit des trains. Compte rendu scientifique d'une recherche financée par la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique. D. AUBREE. Rapport Juin 1973.
- 6 - D. AUBREE et al. - Etude de la gêne provoquée par la transmission dans les immeubles des vibrations d'origine ferroviaire - GSM 81.2. DACB. 14 Septembre 1981.
- 7 - Effets du bruit de trafic ferroviaire seul et comparé à d'autres sources de bruit - Office de Recherches et d'Essais - Union Internationale des Chemins de Fer. Bureau d'études OBERMAYER - Munich (1984).

6 - BRUIT ROUTIER (pour mémoire)

- A. GUIDE DU BRUIT DES TRANSPORTS TERRESTRES (6 fascicules disponibles au C.E.T.U.R.) :
1. Présentation générale (Sept. 1976).
 2. Catalogue des cas (Sept. 1976).
 3. Aspects de la gêne due au bruit de la circulation routière (Sept. 1976)
 4. Recommandations techniques pour les ouvrages de protection contre le bruit (Mai 1978).
 5. Utilisation du verre dans la construction des écrans acoustiques (Sept. 1981).
 6. Prévision des niveaux sonores (Nov. 1980).

B. AUTRES TEXTES ET PUBLICATIONS SUR LE BRUIT ROUTIER

7. Fichier des écrans acoustiques existants.
C.E.T.U.R., réactualisation, Février 1982.
8. Circulaire du 2 Mars 1983 relative à la protection contre le bruit aux abords des infrastructures routières du réseau national. Ministère des Transports et Secrétariat d'Etat à l'Environnement et à la Qualité de la Vie.
9. Circulaire 82-9 8 du 27 Septembre 1982 relative à la prise en compte du bruit des Infrastructures routières - gêne nocturne, Direction des Routes.
10. Circulaire 82-57 du 25 Janvier 1982 relative aux travaux de protections acoustiques et d'isolation de façades nécessités par les infrastructures routières, Direction des Routes.
11. Acoustique et végétation. P. BAR, dossier du C.E.T.U.R., n° 17, Décembre 1982.
12. Circulaire 78-541 de Novembre 1978 relative à la protection contre le bruit aux abords des voies nouvelles des collectivités locales - Direction générale de Collectivités locales, Ministère de l'Intérieur.
13. Dossier du C.E.T.U.R. n° 1 : "Le Bruit dans l'exploitation des routes urbaines". P. BAR, CETUR 1979.
14. Notions d'acoustique à l'usage des architectes, ingénieurs et urbanistes. R. JOSSE, éditions Eyrolles, 1972 et rééditions.
15. "Bruit et formes urbaines, B. LOYE, P. BAR, CETUR 1981.

COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL

auteur du présent rapport

- M. NAESSANY , Chef du Service des Chemins de Fer, Président du groupe
- M. AUBREE , Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
- M. BONNARDEL , Institut de Recherche des Transports - Centre d'Evaluations et de Recherches des Nuisances et de l'Energie
- M. BRULE , Ministère de l'Environnement, Atelier Central
- M. COLLINE , RATP, Service Environnement.
- M. FLAHAUT , RATP, Service Environnement.
- M. LEGOFF , Ministère de l'Environnement, Mission Bruit
- M. LEVY , Service des Chemins de Fer, Direction des Transports Terrestres
- M. MONTAGNE , SNCF
- M. OLLIVIER , Direction des Transports Terrestres
- M. PARENT
DE CURZON , SNCF
- M. RAPIN , Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
- M. TOUDIC , SNCF
- Mlle VERNET , Institut de Recherche des Transports - Centre d'Evaluations et de Recherches des Nuisances et de l'Energie
- M. VERRIER , SNCF
- M. BAR , Centre d'Etudes des Transports Urbains - Rapporteur
- M. PACHIAUDI , Institut de Recherche des Transports - Centre d'Evaluations et de Recherches des Nuisances et de l'Energie - Rapporteur

Ce document est propriété de l'Administration.
Il ne pourra être utilisé ou reproduit même partiellement, sans
l'autorisation de l'Administration.

Ce document est disponible :

au Centre d'Etudes
des Transports Urbains

8, avenue Aristide-Briand
92220 BAGNEUX
Tel. 657.11.47

à la Direction des
Transports Terrestres

Service des Chemins de Fer
244, bd. Saint Germain
75007 PARIS

