

# Le bruit des infrastructures de transports ferroviaires : nouvelles données et perspectives

Pascal FODIMAN

*Chargé de mission bruit à la direction déléguée développement durable et environnement*

SNCF – Direction de la Stratégie  
34 rue du Commandant Mouchotte  
75699 PARIS Cedex 14

## PREAMBULE

Cet article s'intéresse au domaine du bruit des infrastructures de transports ferroviaires, au sens de la réglementation actuelle, que l'on qualifie dans ce document de « bruit en environnement ». Dans ce contexte, le bruit à l'intérieur du train, qui s'apparente à la notion de confort des passagers ou de bruit au poste de travail, n'est pas pris en compte. De plus, le bruit des activités industrielles de la SNCF, comme le bruit dans les gares ou les zones de parage des rames, n'est pas traité.

Enfin, le bilan et l'analyse des problèmes de bruit en environnement s'inscrivent dans une approche système du mode ferroviaire. Les pistes de réflexion proposées ne prétendent pas de substituer aux stratégies d'investissement pour les sous-systèmes du matériel roulant ou de l'infrastructure ferroviaires, qui dépassent le seul cadre du dossier bruit.

## INTRODUCTION

Le bruit est un phénomène indissociable de bon nombre d'activités humaines et étroitement associé au processus d'urbanisation et de développement de l'industrie et des transports. En effet, 35 à 40 % de la population française se déclare gênée par les bruits à leur domicile. Si le bruit des transports représente 55 % de cette gêne, le bruit des trains n'en représente que 2% [1].

En revanche, le bruit est à ce jour un des aspects les plus significatifs de l'impact environnemental du transport ferroviaire. Il a donné naissance à de nombreuses initiatives pour la prise en compte de ses aspects techniques, économiques et sociétaux, pour lui permettre ainsi de développer durablement ses activités.

Parmi ces initiatives, la décision récemment prise par l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC), d'approuver l'admission au trafic international de matériels roulants équipés de semelles de frein en matériaux composites de type « K » est une étape majeure. Elle est de nature à montrer la capacité technique des différents acteurs de la communauté ferroviaire à relever les défis que lui posent les exigences de développement durable.

Au-delà des aspects environnementaux, les dispositions réglementaires européennes ont modifié sensiblement le paysage communautaire en matière de transport ferroviaire. La traditionnelle approche intégrée, voire unipolaire, de son organisation fait place à une répartition nouvelle des responsabilités, entre des acteurs multiples dont les intérêts peuvent diverger. Dans ce contexte, la place d'une entreprise ferroviaire comme la SNCF se trouve sensiblement modifiée, et son positionnement stratégique en matière d'environnement sonore nécessite une réflexion approfondie, qui intègre l'ensemble des éléments de cette nouvelle donne.

## LA PROBLEMATIQUE DU BRUIT DES TRANSPORTS :

### *Les principes*

#### *Préserver la santé des riverains*

Aujourd'hui en Europe, la gêne de long terme de jour, et dans une moindre mesure les effets sur le sommeil la nuit ou la communication parlée en soirée, constituent les effets les plus significatifs du bruit des transports terrestres sur la santé, pour des expositions à des niveaux non critiques (c'est à dire hors points noirs bruit, tels que définis par la réglementation française)[2].

C'est vraisemblablement une des raisons qui a conduit à retenir essentiellement, dans la réglementation actuelle sur le bruit des transports, les indicateurs de gêne de long terme, liés à la notion de trafic qui lui est associée.

La prise en compte de la gêne instantanée ou des effets sur le sommeil constituent une exigence émergente dans le domaine du risque environnemental, qui vise à préserver la santé des populations riveraines soumise à l'exposition à des bruits le plus souvent associée à des occurrences de passage de convois élémentaires. Si la recherche dans ce domaine se développe, peu d'études faisant appel à des paramètres physiologiques ont été réalisées à ce jour dans le domaine des transports terrestres [3].

Au travers de la mise en relation des niveaux de gêne avec le niveau d'exposition au bruit [4], qui ne recouvre pas encore aujourd'hui les situations de multi exposition, le principe d'une limitation de la gêne sonore de long terme associée au bruit des transports terrestres est à la base des réglementations nationales et européennes. Pour la plupart d'entre elles, la prise en compte d'un bonus ferroviaire mis en évidence dès 1983, y est intégrée. Celui-ci tient compte, à niveau de bruit équivalent, d'une perception de gêne moindre du mode ferroviaire, par rapport aux autres modes de transport.

La pertinence de ce bonus, variant entre 3 et 5 dB(A) par rapport au mode routier, est confirmée par des études récentes [5], y compris de façon plus nuancée dans des situations de multi exposition [6]. Elle pourrait se révéler plus importante de nuit, ou une différence de niveaux sonore de 10 à 12 dB(A) a pu être identifiée, à niveau de gêne comparable [32].

#### *Prévenir les nuisances*

Selon ce principe, le maître d'ouvrage d'une infrastructure nouvelle ou le gestionnaire d'une infrastructure existante est tenu d'évaluer a priori l'impact des modifications induites par l'infrastructure de transport par l'établissement d'un dossier d'impact. Les situations sonores avant et après modification sont ainsi évaluées, et des objectifs de résultats peuvent être établis.

Bien entendu, ce principe, largement appliqué en Europe, suppose que les effets du bruit sont prédictibles, et que les indicateurs associés sont quantifiables et reproductibles ; de plus il requiert la mise en œuvre d'outils de simulation de plus en plus performants, en raison d'une exigence de précision des résultats toujours plus forte.

Dans certains cas, comme en France, les résultats de ces études prévisionnelles, menées dans le cadre des études d'impact, doivent être confirmés par la mesure in situ, qui seule valide le respect des objectifs.

#### *Responsabilisation des acteurs – le principe du pollueur payeur*

Selon ce principe, le responsable des nuisances doit réparer le préjudice causé. Dans le traitement des dossiers d'impact par exemple, le maître d'ouvrage est le garant du respect du bruit de l'infrastructure de transport, par l'obligation de résultat qui lui est imposée. À ce titre, la question

du contrôle du niveau de bruit à la source est posée. Plus encore, la mise en place d'une stratégie d'incitation à l'exploitation de matériels silencieux ou de sanction financière pour le non-respect de seuils d'émission selon le cas, est en cours d'expérimentation dans certains pays européens.

En revanche, le principe du pollueur-payer pose la question de la capacité de quantifier les parts respectives des contributions sonores émises par le matériel roulant et la voie. Si les recherches en cours dans ce domaine [7], [8] sont encourageantes, leur mise œuvre opérationnelle à l'échelle du réseau transeuropéen n'est pas encore d'actualité, et dépendra vraisemblablement de la mise en œuvre de systèmes d'identification des véhicules (par balises du type IAV par exemple).

### **Quel indicateur de la gêne sonore en environnement ?**

Une caractérisation de la gêne sonore en environnement suppose l'emploi d'un indicateur (cf. encart : quelques rappels d'acoustique), qui permette à la fois :

- une bonne évaluation des effets du bruit, c'est à dire une bonne corrélation avec les différents effets du bruit sur la santé, et essentiellement la gêne sonore de long terme,
- une relative simplicité d'emploi dans des situations très variées, au travers de critères de mesurage et de prédiction,
- une facilité de compréhension, qui favorise le dialogue entre les différentes parties prenantes.

Toujours est-il que la perception de la gêne sonore n'est pas déterminée par les seuls critères acoustiques. Les attentes mais aussi la difficulté d'une approche objective de la question n'en sont sans doute que plus grandes.

En effet, les deux approches suivantes prévalent :

- l'approche énergétique, qui consiste à identifier l'énergie sonore d'un trafic sur une infrastructure et période données (comme le  $L_{pAeq,T}$ ). Elle présente l'avantage d'être la plus facilement prédictible à l'aide des outils de simulation ;
- l'approche événementielle, fondée sur des indicateurs comme le  $L_{Amax}$  (niveau de bruit « maximal »), ou le *SEL* ( de l'anglais Single Event Level) associés à des occurrences d'un événement, dont la corrélation avec la gêne de long terme est en revanche moins pertinente dans le domaine ferroviaire. En effet, cette approche est peu adaptée à la caractérisation d'évènements sonores de trafic comme les passages de trains, d'une durée variable. De plus les indicateurs concernés se révèlent peu reproductibles dans des conditions de trafic comparables, et de ce fait difficilement exploitables pour les études prédictives.

D'un point de vue réglementaire, l'approche énergétique est la plus répandue dans le monde :

- en France, l'indicateur  $L_{pAeq,T}$  sur 24 heures prévaut pour l'ensemble des transports terrestres ;
- en Europe, l'indicateur  $L_{DEN}$  introduit récemment par la directive européenne pour la gestion du bruit ambiant [4], introduit une pondération qui dépend de la période considérée, et qui pénalise le bruit en soirée et de nuit respectivement de 5 et 10 dB(A).

Notons au passage que le décibel pondéré A, unité sous jacente à celle de niveau sonore du trafic [9], prend ici toute sa dimension. En effet, un abaissement du niveau de bruit de 3, 5 ou 10 dB(A) revient en effet à réduire :

- l'énergie sonore associée (du point de vue physique) respectivement d'un facteur 2 (la moitié), 3 et 10, et incidemment
- le trafic associé, ou le nombre de sillons, c'est à dire la capacité de l'infrastructure de transport, dans des proportions comparables, à savoir respectivement d'un facteur 2 (la moitié), 3 et 10.

Compte tenu des investissements que représentent réalisation de ces infrastructures, le choix des descripteurs du bruit, et par-là même des limites légales qui leur sont associées, revêt une importance toute particulière.

### **Les spécificités ferroviaires**

Dans le domaine du bruit des transports, les spécificités ferroviaires méritent d'être commentées. Elles sont d'ordre divers :

#### **Une approche intégrée du système ferroviaire**

L'intégration du système ferroviaire et ses contraintes de sécurité majeures sont historiques et essentielles. Elle a vraisemblablement été déterminante dans le développement des performances de ce système et son optimisation globale, tant en matière d'énergie que sur la sécurité des circulations.

Associée à l'interface entre l'infrastructure et le matériel roulant, elle prévaut aussi, comme nous le détaillons plus loin, dans le domaine physique des mécanismes de génération du bruit de roulement.

En revanche, la mise en œuvre opérationnelle de solutions techniques nouvelles ne doit pas remettre en question les acquis techniques. C'est pourquoi elle peut s'avérer délicate, voire être perçue comme incompatible avec l'optimum technique existant.

#### **Une maîtrise de la modélisation des mécanismes de génération du bruit**

Une autre conséquence de cette intégration a sans doute été le développement précoce de modèles physiques de comportement, prenant en compte l'interface roue/rail.

En effet, l'étude théorique des mécanismes de génération du bruit des trains a été engagée dès le milieu des années 1980. La mise au point des premiers modèles de comportement validés (figure 1), et des méthodes expérimentales associées, s'est concrétisée à la fin des années 1980,

grâce au développement des outils de modélisation modernes. Les années 1990 ont vu la mise au point de prototypes originaux [10], [11], qui ont démontré outre la pertinence des différents modèles physiques, la possibilité d'une réduction du bruit à la source, et une première estimation de leur impact au travers de scénarios de réduction du bruit à la source [12], [29].

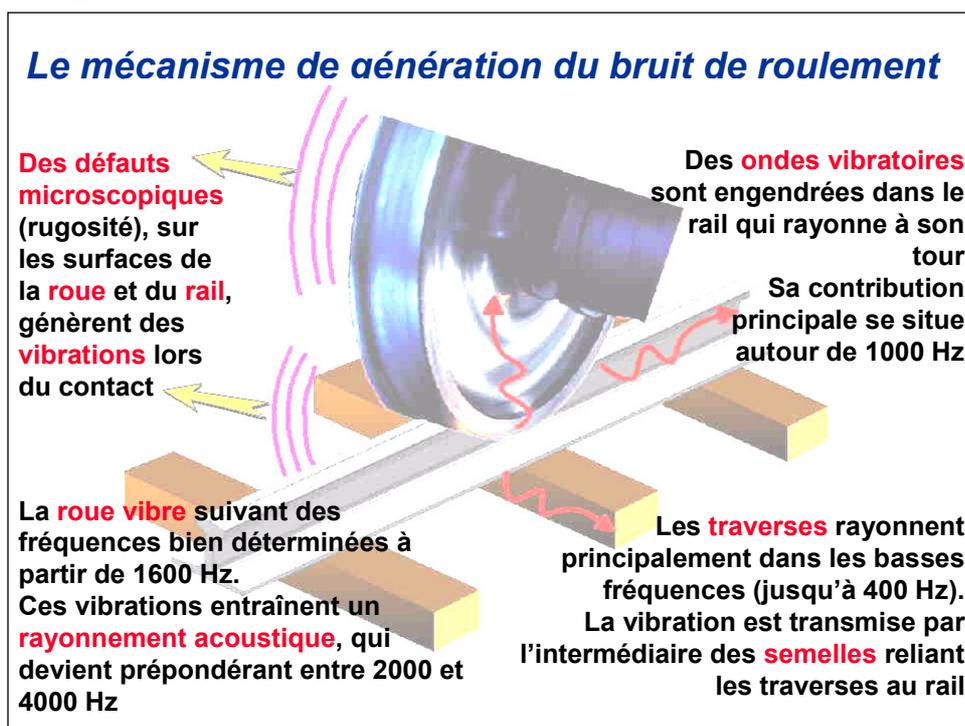


fig. 1

La figure 2 présente des prototypes de roues silencieuses issues de ces recherches.

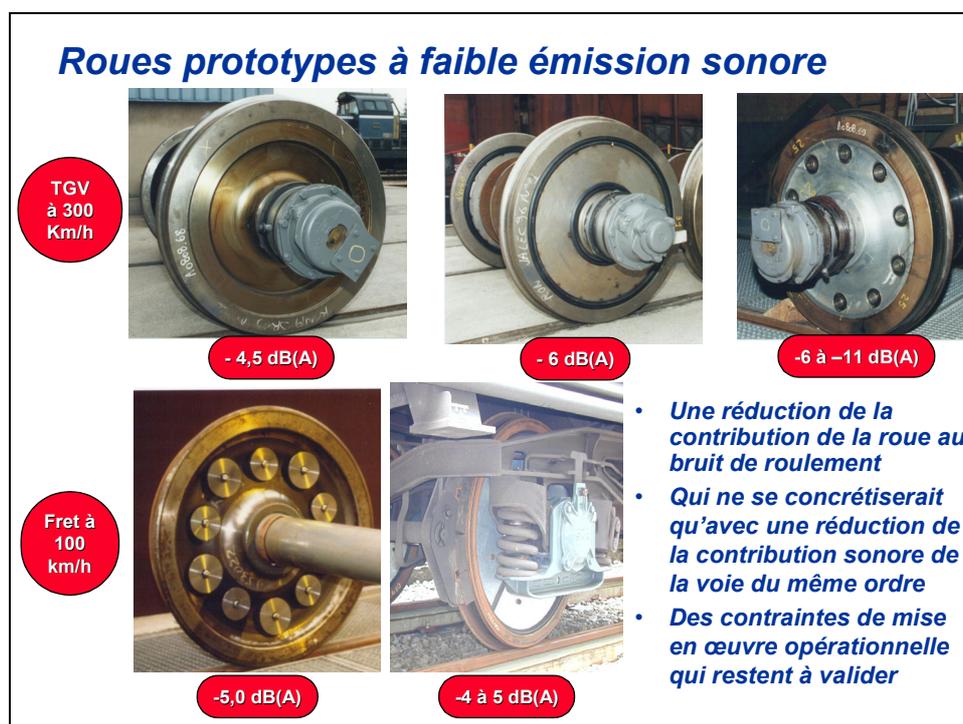


fig. 2

### *Spécificités des modes d'exploitation*

Le bruit des transports terrestres est intimement lié aux trafics induits. Pour ce qui concerne le rail, les caractéristiques du trafic sur sa période de référence de 24 heures, sont les suivantes :

- un trafic périodique, dont les occurrences de passage des circulations sont relativement bien connues ;
- une période effective de bruit du trafic considéré importante à chaque passage, mais limitée sur une durée courte, qui préserve des périodes de calme relatif, au regard du bruit ambiant ;
- un nombre de circulation faible (quelques centaines de convois au maximum dans la journée) sur les infrastructures les plus sollicitées, à comparer aux quelques dizaines de milliers de véhicules/jour des infrastructures routières les plus chargées, qui conditionnent le bruit du trafic sur la période de référence.

### *Une dimension sociétale du transport ferroviaire*

En dépit d'atouts environnementaux largement crédités au système ferroviaire, le bruit reste un de ses maillons faibles, alors que la sensibilité aux nuisances sonores des transports dans les pays développés ne cesse de s'accroître depuis une vingtaine d'années. Citons quelques enjeux de société associés aux transports ferroviaires [13] :

- c'est un transport collectif lourd, qui ne bénéficie pas d'une image de proximité, comme c'est le cas du transport routier ;
- de plus, le faible nombre de ses acteurs fait que ceux-ci sont plus facilement identifiables vis-à-vis des nuisances engendrées, auprès de l'opinion ou la puissance publiques. Dans ce contexte, la lutte contre le bruit pourrait devenir un des avantages concurrentiels permettant de différencier les opérateurs, au travers d'arguments de communication auprès du public.

## L'APPROCHE REGLEMENTAIRE : LA NOUVELLE DONNE INDUITE PAR LE CONTEXTE EUROPEEN

Dans le domaine ferroviaire européen, de nouvelles structures de fonctionnement ont été inspirées par le modèle aéronautique. Si la justification d'une telle approche dépasse le cadre de cet article, son incidence dans le domaine réglementaire doit tenir compte de l'interaction très forte entre le mobile et son infrastructure.

Pour ce qui concerne la politique européenne en matière d'environnement sonore [14], la directive 91/440/CEE [15] relative au développement des chemins de fer communautaires, dans sa version la plus à jour qui intègre les modifications introduites par la Directive 2001/12/CE [16] précise le mode de fonctionnement du chemin de fer communautaire. Elle stipule notamment la séparation :

- des « entreprises ferroviaires » chargées de la fourniture d'une prestation de transport, et
- des « gestionnaires d'infrastructure » responsables de l'établissement et de l'entretien de l'infrastructure, et éventuellement des systèmes de régulation et de sécurité de celle-ci, comme c'est le cas actuellement en France.

En outre, cette directive précise les droits d'accès et de transit pour les différentes prestations de transport ferroviaire sur le réseau transeuropéen.

Sur cette base réglementaire, deux familles de textes ont été élaborées, qui portent sur :

- la réduction du bruit à la source,
- la limitation de la gêne sonore en environnement.

Une des difficultés que présente cette approche duale, en associant réception et émission du bruit, réside dans le fait que la réduction des émissions sonores se place dans une logique de concurrence intermodale (routier et ferroviaire pour ce qui concerne les transports terrestres) ou intra modale (pour ce qui concerne différents opérateurs de transports d'un même mode), alors que la gestion du bruit ambiant vise l'objet même de protection de l'environnement des riverains, par la limitation des doses d'énergie sonore reçue. Ainsi, si la réduction des valeurs d'émission sonore à la source permet d'accroître les performances environnementales du système ferroviaire, l'expérience montre que la logique d'accroissement du trafic et de rentabilité des investissements des infrastructures de transport, ne conduit pas nécessairement à la réduction des nuisances pour les riverains. Ce constat est semble-t-il commun aux différents modes de transports modernes.

### **Réduction des émissions sonores**

Les attentes de la Commission sur ce point sont doubles et s'inscrivent dans une logique d'interopérabilité, sur la base des exigences environnementales respectives de la directive 96/48/CE [17] (grande vitesse), et 2001/16/CE [18] (rail conventionnel). Elles visent à :

- favoriser la concurrence intra modale entre constructeurs de matériels roulants à l'échelle européenne. Pour cela, il est nécessaire d'assurer l'homogénéité des seuils de bruit émis, et les méthodes de contrôle. Cette concurrence contribuerait ainsi finalement, par le jeu de limites plus exigeantes au fur et à mesure des progrès permis par la recherche ferroviaire en acoustique, à limiter la contribution des circulations ferroviaires au bruit émis dans l'environnement ;
- consolider la compétitivité du mode ferroviaire face aux autres modes. En effet, à niveau équivalent imposé par les exigences environnementales, la réduction du bruit émis est une des conditions de développement du trafic.

Du point de vue de leur mise en œuvre, l'application de ces principes fait l'objet dans le domaine ferroviaire des Spécifications Techniques d'Interopérabilité (STI) : plutôt que d'établir une direc-

tive spécifique pour le bruit ferroviaire, il a été jugé plus efficace d'inclure le bruit à l'émission comme « paramètre de base » dans les STI « matériel roulant ». Ces dernières sont déclinées respectivement pour la grande vitesse [19] et le rail conventionnel [20], et leur mise en œuvre dans la domaine du bruit est accompagnée par le projet européen NOEMIE [21] (figure 3), dont l'objectif est de :

- fournir une base de données commune de niveaux d'émission sonore comparables et reproductibles de la plupart des trains à grande vitesse existant en Europe,
- contribuer à la définition d'une voie de référence exploitée (et donc compatible avec une exploitation commerciale), dont les performances sont adaptées aux conditions d'essai d'homologation acoustique des matériels roulants, permettant ainsi la reproductibilité et la comparaison des valeurs de bruit mesurées sur différents sites de référence ;
- proposer et valider une méthodologie de mesurage commune, permettant de :
  - caractériser les paramètres déterminants de la qualité acoustique des voies de référence,
  - valider le choix des niveaux limites du bruit émis par les matériels roulants à l'échelle européenne.

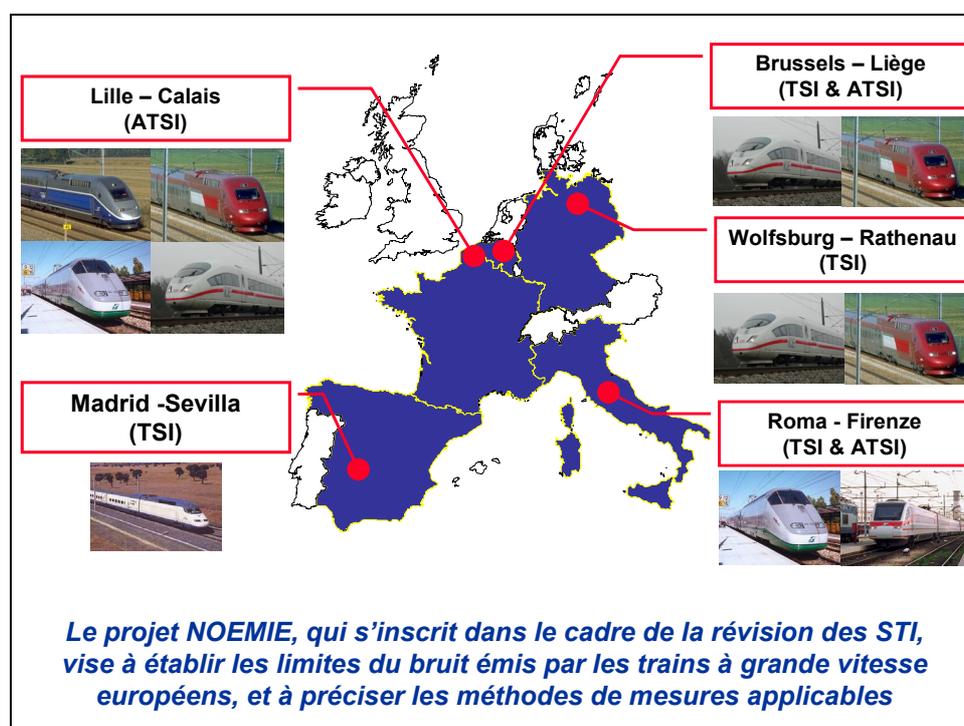


fig. 3

### **Limitation de la gêne sonore en environnement**

Dans le contexte de séparation de l'exploitation et de l'infrastructure, imposé par la directive Européenne 91/440/CE, la gestion du bruit ambiant revêt différents aspects, pour lesquels le rôle de chacun se doit d'être précisé. C'est l'objet de la directive 2002/49/CE [4] relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement, qui précise les principes édictés en 1996 à travers les conclusions du livre vert de la commission européenne sur la politique future sur le bruit.

Les exigences de la directive se traduisent par :

- une volonté d'harmonisation :

- des indicateurs de gêne, au travers de l'indicateur énergétique  $L_{DEN}$  (DEN pour « Day–Evening–Night »), utilisé notamment pour l'établissement de cartes stratégiques,
- des méthodes d'évaluation de l'exposition au bruit utilisée pour les études d'impact, à laquelle la SNCF contribue dans le projet européen HARMONOISE [22], ou de travaux de recherche pour l'évaluation des situations de multi exposition sonore [6] ;
- une amélioration de l'information au public, notamment par la cartographie des nuisances sonores, et la mise en œuvre de plan d'actions pour la réduction du bruit, qui sont menés en France sous maîtrise d'ouvrage de Réseau Ferré de France (RFF).

La transposition en cours de cette directive au droit français est attendue pour la mi-2004.

### **Une répartition des rôles**

Dans ce contexte, la répartition des rôles s'établit de manière plus explicite. En effet :

- le **gestionnaire d'infrastructure (GI)** apparaît comme le responsable du respect des dispositions réglementaires en matière de gêne sonore à proximité de l'infrastructure de transport dont il a la charge, pour le respect des niveaux de bruit reçu, pour l'élaboration de cartes de bruit, ou la réalisation d'études d'impact des projets d'aménagement. Pour être en mesure de respecter les limites réglementaires du bruit de trafic reçu en bordure de ses infrastructures, sa marge de manœuvre réside dans la maîtrise :
  - de la densité et de la vitesse du trafic, mais cela ne va pas dans le sens de l'utilisation optimale des infrastructures existantes.
  - des niveaux d'émission, dont il peut spécifier les limites en service pour chacun des différents matériels circulant sur l'infrastructure dont il a la charge. Ce rôle, associé à un pouvoir de police, pourrait être étendu dans l'avenir, avec l'apparition de nouveaux entrants.
  - de la mise en oeuvre de protections sonores (murs, merlons, etc.) ou d'une voie de conception silencieuse (absorbants, choix de semelles adaptées, etc.).
  - d'une politique de conception (voie silencieuse) et de maintenance (contrôle des défauts acoustiques de surface du rail) favorable notamment à la réduction du rayonnement propre de la voie.
- les **entreprises ferroviaires (EF)**, de par la présence même du matériel roulant qu'elles exploitent, sont considérées comme les principaux générateurs du bruit émis, même si cette responsabilité incombe aussi au gestionnaire d'infrastructure. Elles n'en sont pas moins responsables du respect des valeurs du bruit émis par son matériel, dans des limites qui lui seraient spécifiées pour une infrastructure donnée. Elles peuvent contribuer à la réduction du bruit émis par le système roue/rail par :
  - l'exploitation d'un matériel de conception silencieuse, dont les caractéristiques sont spécifiées aux constructeurs,
  - une politique de maintenance adaptée, respectueuse des états de surface des tables de roulement des roues notamment.
- Les **constructeurs de matériels**, qu'ils soient ensemble ou équipementiers, sont désormais responsables de leur conception. Ils répondent à une logique industrielle sur un marché international élargi, mais de plus en plus concentré, aux marges qui tendent à se réduire. Les conditions du marché lui imposent des règles de concurrence explicites : dans le domaine du bruit, celles-ci correspondent à des performances qui doivent pouvoir être évaluées (essais de type) de préférence en s'affranchissant de l'influence de l'infrastructure ou des conditions de maintenance du matériel en service.

- Les **autorités publiques** qui sont à l'écoute des attentes de la population, et dont les composantes régionales sont devenues les autorités organisatrices du transport ferré, avec un rôle décisionnaire qui va croissant,
- La **Commission Européenne**, qui par ses directives, est à l'origine des mutations en cours.

## LES OUTILS PREVISIONNELS POUR LA MAITRISE DE LA GENE SONORE

Les outils prévisionnels sont à la disposition du gestionnaire d'infrastructure pour la maîtrise de l'environnement sonore aux abords de l'infrastructure de transport. Ils lui permettent d'identifier par le calcul la gêne sonore en environnement, dont on sait qu'elle est assimilée à une dose de bruit reçu au cours d'une période donnée (d'une durée de 24 heures éventuellement découpée en périodes de journée, de soirée ou de nuit).

La connaissance de cette gêne, estimée en France en des points récepteurs situés à 2 mètres en avant des façades des habitations proches de l'infrastructure considérée, permet ainsi de prendre les dispositions nécessaires adaptées à la situation locale. On respecte les seuils réglementaires, par le contrôle :

- du bruit créé par le passage de chaque circulation, par sa limitation à la source, et incidemment la « pollution sonore » qui lui est associée ;
- du trafic, par le nombre ou la vitesse des circulations sur celle-ci, au cours de la période considérée ;
- des conditions de propagation du son dans l'environnement, qui dépendent de la topographie des sites, des conditions météorologiques, ou de la présence de protections sonores, qu'elles soient naturelles ou non.

### ***Développement des outils prévisionnels***

Le développement des outils prévisionnels est intimement lié à l'évolution des capacités de traitement des ordinateurs. En effet, les modèles bidimensionnels, fondés sur des formulations analytiques, ont laissé progressivement la place aux modèles tridimensionnels de tracés de rayons, seuls capables :

- d'une représentation des topographies réalistes, et
- de la prise en compte de lois de propagations complexes, et des effets météorologiques.

Dans le domaine ferroviaire, le logiciel MITHRA-FER issu du domaine routier, a été adapté au mode ferroviaire sur l'initiative de la SNCF, pour lequel il a donné lieu à des campagnes de validation très complètes au début des années 1990.

Suite à loi bruit de décembre 1992, et ses exigences de prise en compte des effets météorologiques, ses algorithmes ont été adaptés, contribuant ainsi à la mise en œuvre de la Nouvelle Méthode de Prédiction du Bruit (NMPB), et sa version NMPB-FER actuellement utilisée dans le cadre des études d'impact bruit.

La méthode NMPB est une des méthodes recommandées par la directive européenne sur la gestion du bruit ambiant, vraisemblablement retenue par sa capacité à traiter uniformément les différents modes de transport terrestres. La figure 4 présente le type de résultat fourni par de telles études, ici dans le cas d'aménagement d'une ligne nouvelle.

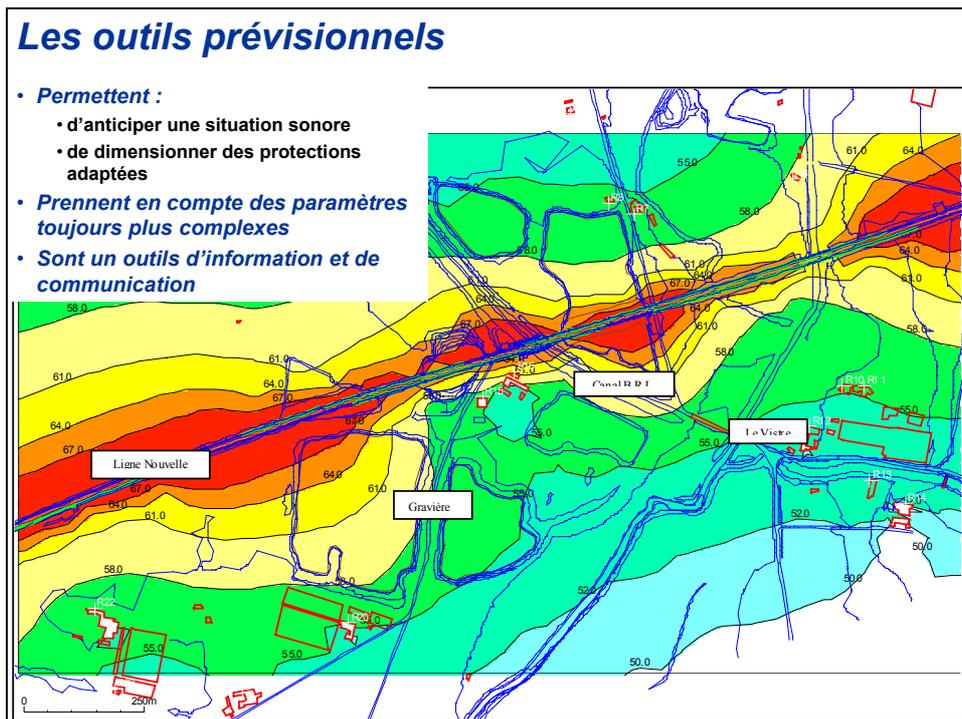


fig. 4

### Représentation des sources

La connaissance des sources sonores à l'arrêt ou au défilé au travers de leur position sur le train, de leur puissance ou de leur directivité fait partie des éléments qui contribuent à la pertinence des outils prévisionnels que nous venons d'évoquer. Plus encore, l'identification de caractéristiques réalistes d'exploitation et de maintenance du matériel et de la voie déterminera la pertinence des études d'impact bruit.

Dans ce domaine, la SNCF a développé dès 1994 des outils de mesure faisant appel aux techniques d'imagerie acoustique,

permettant une représentation graphique éloquentes des sources de bruit d'un train (figure 5). Ces travaux de recherche ont principalement servi à une meilleure connaissance de mécanismes de génération d'origine aérodynamique [31], plus importants à très grande vitesse, et d'une localisation plus difficile que pour les sources de roulement situées à proximité du point de contact roue-rail.

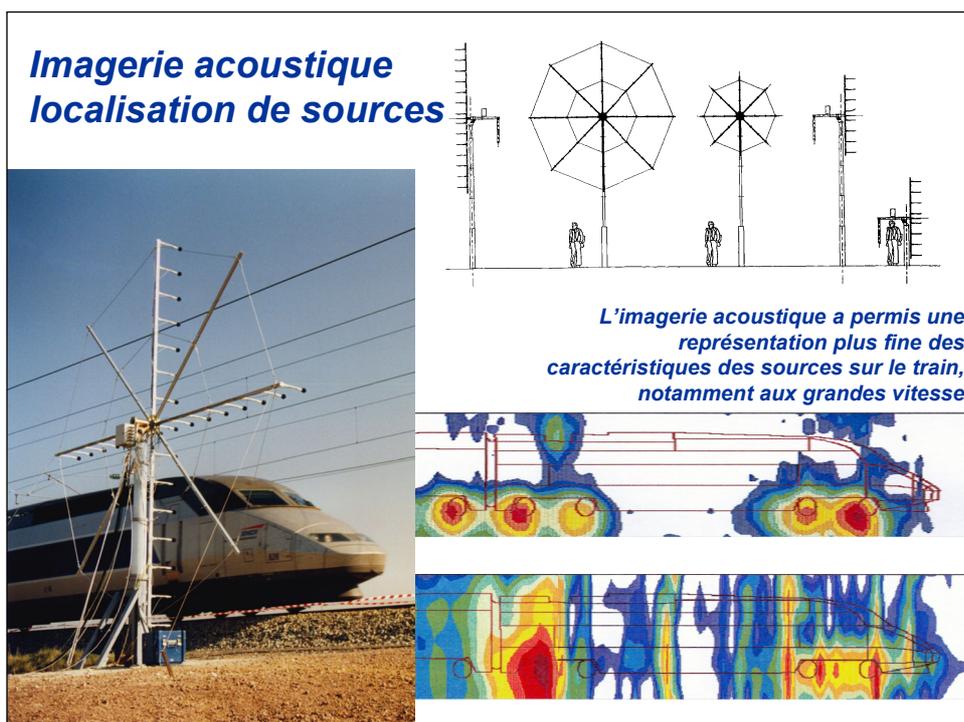


fig. 5

Ils ont permis de confirmer l'existence de sources sonores situées principalement en partie basse du train, et d'en préciser le contenu en fréquence, pour une intégration pertinente aux modèles d'émission des logiciels prévisionnels.

En revanche, les niveaux de bruit au passage des matériels d'une série donnée sont variables, même si l'amplitude de ces variations reste contenue par une maintenance régulière des états de surface des roues que lui imposent les usures mécaniques en service. Une approche statistique sur l'ensemble des matériels d'une série ou d'un type donné permet une représentation plus réaliste des variations du bruit émis dans le cadre des études d'impact. Des mesures au passage sont ainsi réalisées sur des échantillons représentatifs des différentes séries de matériels en service sur des voies de qualité courante. Une loi de répartition statistique permet d'associer une valeur moyenne et un écart type, ainsi qu'un spectre en fréquence à l'ensemble de la population considérée. Ces valeurs d'émission sont finalement adaptées aux données du projet (vitesses de circulation, longueur des convois) ou par analogie avec des matériels comparables dans le cas de matériels neufs pour lesquels les données mesurées en service font défaut.

La pertinence de ce modèle de représentation des sources ferroviaires, qui complète les outils de calcul prévisionnel, a été démontrée au travers d'études d'impact récentes comme celle de la LGV-Méditerranée [24].

## LA REDUCTION DU BRUIT A LA SOURCE

La question de la définition d'une stratégie de réduction des nuisances sonores en environnement est intimement liée, comme nous l'avons mentionné auparavant, à l'organisation des transports.

Dans ce contexte, le choix stratégique pour la SNCF d'une politique de réduction du bruit à la source présente l'avantage d'une plus grande efficacité économique, en alternative au traitement par des protections sonores classiques (murs antibruit), et sous réserve, comme nous le détaillerons plus loin, qu'elle soit menée conjointement sur la voie et le matériel roulant. Dans une moindre mesure, elle donne la possibilité de s'appuyer sur son savoir-faire technique, et dans le meilleur des cas de dégager un avantage concurrentiel en matière d'environnement, en comparaison à d'autres entreprises ferroviaires sur le réseau ferré français, mais aussi, dans une logique d'ouverture du marché sur l'ensemble des infrastructures européennes.

Pour le système ferroviaire enfin, elle complète voire s'affranchit des solutions de protections sonores classiques (murs antibruit), le plus souvent inesthétiques, qui contribuent à dégrader l'image environnementale du transport ferré auprès de l'opinion publique.

Dans le domaine de la grande vitesse par exemple,

### Quelques rappels d'acoustique

Dans sa définition physique, le bruit est caractérisé par sa pression acoustique qui correspond à la fluctuation de la pression instantanée de l'air autour de sa valeur moyenne (pression atmosphérique). Elle est exprimée en Pascals (1 N/m<sup>2</sup>)

L'amplitude de pression acoustique que peut percevoir l'oreille humaine varie dans la pratique de  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa pour le seuil d'audibilité à plus de 100 Pa pour le seuil de la douleur. Cette variation, d'un facteur multiplicatif de l'ordre du million, est une des justifications de l'emploi d'une échelle logarithmique de base 10, exprimée en dB. De plus, pour tenir compte de la sensibilité de l'oreille humaine qui varie notamment en fonction de la fréquence des sons, une pondération de type A est employée, sans laquelle l'expression des niveaux de bruit en pratique n'aurait pas de sens physique.

Ce mode de représentation des niveaux de bruit, conduit à des règles inhérentes au calcul logarithmique. Il permet aussi d'expliquer les effets de masque de sources sonores de nature différente.

Dans la pratique, le signal sonore peut être exprimé en fonction :

du temps (signature acoustique),

de la fréquence (spectre sonore).

Enfin, pour simplifier la caractérisation des niveaux de bruit variables, on utilise couramment la notion de niveau sonore équivalent pondéré A : le  $L_{Aeq,T}$ , niveau de pression acoustique équivalent pondéré A, défini sur la période de temps  $T$  permet, pour un signal quelconque, de représenter une quantité d'énergie sonore équivalente à celle d'un signal continu sur une période de temps donnée. Son principal utilité est de synthétiser le résultat sous la forme d'un nombre scalaire unique.

Au cours de cette même période  $T$ , on peut identifier d'autres indicateurs de niveaux de bruit, comme :

le niveau  $L_{p,Amax}$ , est la représentation du niveau maximal du signal au cours de cette période, valeur intégré sur une période de temps forfaitairement très courte, le plus souvent prise à 125 ms. Ce niveau est souvent utilisé pour caractériser les pointes de niveaux associées à des événements sonore particuliers, mais est considéré comme moins représentatif de la gêne sonore de long terme ;

le niveau SEL (Single Event Level), qui consiste à concentrer forfaitairement la totalité de l'énergie sonore, identifiée au cours de la période  $T$ , sur une durée de 1 seconde. Quand la période  $T$  est associée à la durée d'un événement (le passage d'un train par exemple), le SEL permet de comparer les quantités d'énergie sonore de deux événements différents sur des périodes  $T$  comparables.

on peut mesurer le chemin parcouru depuis les premières rames « oranges » freinées avec des semelles en fonte, mises en service il y a maintenant plus de 20 ans, et modifiées depuis pour des raisons acoustiques : l'énergie (ou la pollution) sonore de chacune de ces rames de première génération a été réduite sur les séries de matériels les plus récentes, comme le TGV Duplex, d'un facteur 10, et ce avec une augmentation sensible des vitesses d'exploitation, et le maintien du niveau de sécurité des circulations, traditionnellement associé à l'image du rail.

L'examen des choix techniques qui ont conduit à l'amélioration des performances dans ce domaine, et leur éventuelle généralisation à d'autres types de matériels roulants, requiert au préalable l'examen des mécanismes de génération du bruit des trains.

### **Les mécanismes de génération du bruit**

Le bruit de roulement constitue la source principale du bruit ferroviaire dans la gamme des vitesses de circulation classiques jusqu'à 300 km/h. Intimement dépendant des caractéristiques mécaniques de l'interface roue-rail, dont les techniciens savent à quel point elle est d'une approche théorique complexe, il a donné lieu à des recherches dans le domaine acoustique depuis près de vingt ans. Sa modélisation repose sur les principes suivants (cf. figure 1) :

- le bruit est créé par une excitation mécanique. Celle-ci est provoquée par la présence d'imperfections géométriques sur la surface de roulement d'une amplitude de quelques dizaines de micromètres, réparties périodiquement sur les surfaces de roulement, conjointement sur la roue et le rail. Cette excitation de type déplacement imposée est désignée de manière impropre sous le terme de « rugosité »;
- l'énergie mécanique induite par cette excitation est dissipée essentiellement par déformation élastique des composants du système roue-rail-traverse, induite par leur mise en vibration. On parle alors de réponse vibratoire.
- cette énergie élastique est transformée par un mécanisme de rayonnement acoustique en ondes sonores,
- ondes sonores qui se propagent dans l'environnement.

La précision de ces modèles théoriques a été validée expérimentalement, et n'a cessé de croître, avec la prise en compte de mécanismes toujours plus complexes. Les principales conclusions à ce jour sont :

- la mise en évidence du fait que le bruit des trains est aussi celui de l'infrastructure, la contribution de cette dernière se révélant souvent largement prépondérante sur celle du matériel roulant [8], [11], [23] : c'est le cas notamment en France pour ce qui concerne les trafics fret ou banlieue aux vitesses les plus lentes, et notamment sur les ponts métalliques ;
- le fait que seule une prise en compte des interactions mutuelles entre la roue et le rail, au travers des caractéristiques de la zone de contact est de nature à rendre correctement compte des mécanismes, et permet d'identifier les contributions sonores respectives du matériel roulant et de l'infrastructure.

Pour être complet, il convient de citer d'autres mécanismes de génération, tout aussi complexes, qui viennent se superposer au bruit de roulement que nous venons de décrire, même si leur influence est plus limitée dans les conditions d'exploitation actuelles :

- Le bruit d'origine aérodynamique est vraisemblablement un des enjeux techniques d'une exploitation aux très grandes vitesses, au-delà de 320 km/h dans les configurations connues à ce

jour (figure 6). Associé aux caractéristiques d'écoulement des masses d'air autour de la rame, il peut aussi s'avérer sensible dans les parties hautes du train derrière écran, à des vitesses plus classiques.

- Enfin, citons le bruit associé aux sources mécaniques, comme les ventilateurs et les moteurs de traction, les mécanismes de crissement au freinage ou en courbe, ou encore les ponts métalliques pour lesquels des recherches en cours devraient aboutir à des solutions intéressantes. Pour ce qui concerne le bruit de traction (ventilateurs, bruit des auxiliaires, etc.), il relève des compétences de conception des constructeurs, au travers de spécifications techniques passant pas des critères plus rigoureux, l'optimisation des composants faisant abstraction des caractéristiques d'interface voie-matériel.

Tous ces mécanismes de génération font l'objet actuellement de travaux de recherche auxquels la SNCF contribue activement.

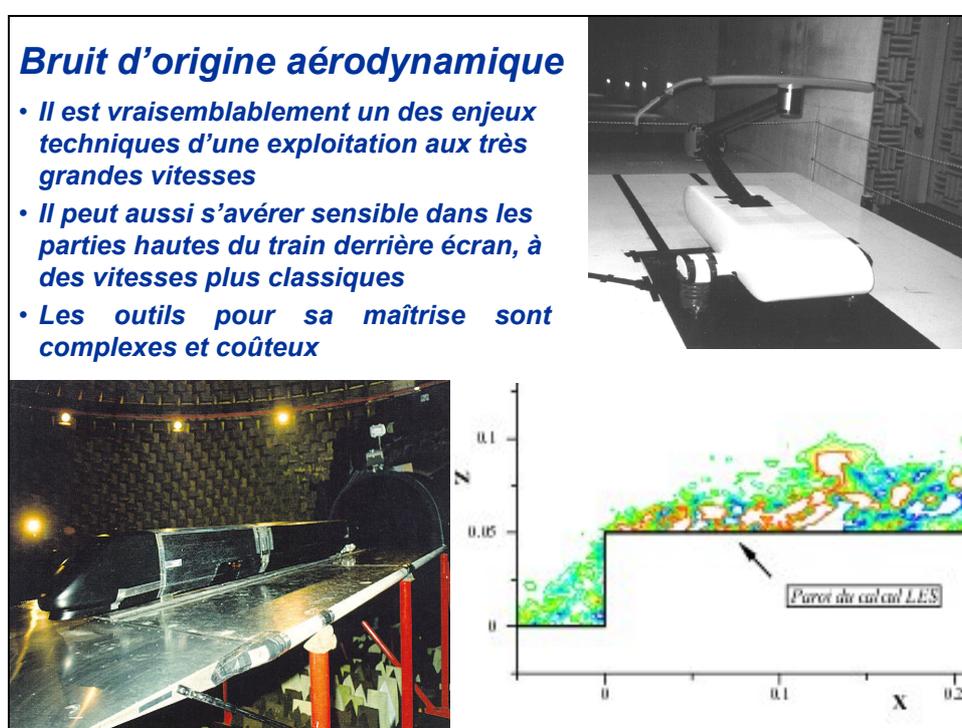


fig. 6

## **Les actions possibles sur les mécanismes d'émission**

### **La définition de solutions techniques innovantes**

L'utilisation intensive de ces modèles de génération a contribué à démontrer la faisabilité de solutions permettant une réduction potentielle du bruit de plus d'une dizaine de dB(A) par rapport à la situation actuelle, en faisant varier les nombreux paramètres physiques mis en jeu.

Les investigations menées ont le plus souvent conduit à la mise en oeuvre de prototypes, qui s'appuient sur la maîtrise des principaux mécanismes et paramètres suivants :

- l'**excitation** par la réduction de la rugosité combinée roue/rail :
  - mise en place de freins à disques ou de semelles en matériau composite,
  - meulage préventif des rails ;

- les **réponses vibratoires** du système roue-rail-traverses :
  - géométrie des composants, et choix des matériaux constitutifs,
  - réduction de la raideur de contact roue-rail,
  - adjonction de systèmes d'absorption de l'énergie vibratoire ;
- le **rayonnement acoustique** des composants :
  - réduction des surfaces émissives,
  - meilleure prise en compte des mécanismes de rayonnement ;
- la **propagation** des ondes sonores en champ proche :
  - masquage des sources,
  - contrôle actif acoustique, qui consiste à réduire l'émission d'une source sonore en lui opposant une source secondaire en opposition de phase.

Dans tous ces cas de figure, ces travaux de faisabilité ont été menés dans des conditions d'essai en ligne sur le réseau ferré national, avec une prise en compte des principales contraintes du système ferroviaire. Ils ont permis de démontrer les performances acoustiques maximales susceptibles d'être obtenue dans ce contexte [10], [11].

#### ***Contraintes liées à l'intégration opérationnelle de composants à faible émission***

Les recherches précédentes ont aussi montré la difficulté de maîtriser l'ensemble des paramètres du contact roue-rail, et les contradictions techniques que l'optimisation acoustique pouvait engendrer. Ainsi, cette optimisation avait tendance :

- à rajouter de la matière là où les mécaniciens cherchaient à réduire les masses des structures, ou les masses non suspendues pour favoriser ainsi le comportement dynamique du matériel roulant sur la voie ;
- à inclure des matériaux nouveaux comme les matériaux composites ou l'aluminium, dont les performances (fatigue, frettage, couple électrochimiques) ou l'usage (maintenabilité) étaient d'une maîtrise délicate, sur des organes de sécurité, dans un contexte d'exploitation commerciale ;

De plus, la pose de nouveaux composants (comme les absorbeurs de vibrations sur la roue et le rail) posait de nouvelles questions sur les techniques et l'organisation de la maintenance.

Aussi, le processus d'homologation des composants à faible émission sonore doit-il prendre en compte l'ensemble des paramètres d'exploitation et de maintenance, dans des conditions acceptables vis-à-vis de la sécurité des circulations et des personnes, y compris dans des modes dégradés (résistance aux contraintes thermomécanique et de fatigue, comportement en voie ou en ligne, durabilité des matériaux utilisés, conductibilité, etc.).

#### ***L'état actuel des travaux***

Les solutions techniques les plus prometteuses en cours d'examen sont les suivantes :

- La première piste consiste à agir sur le matériel roulant [27], en remplaçant les semelles de freins qui assurent le freinage du train par frottement sur la surface de roulement de la roue. Les semelles en fonte, utilisée traditionnellement, dégradent cette surface et en accroissent fortement la rugosité. En revanche, les semelles de type K (en matériau composite), ou LL (en matériau

composite ou fritté), l'améliorent en la polissant, contribuant ainsi à réduire l'énergie sonore rayonnée par le système ; Dans le même esprit, les freins à disques, qui découplent les fonctions de roulement et de freinage, évitent la dégradation des surfaces de roulement. Ils se sont révélés une option pertinente sur remorques de TGV et, en dépit de leur coût d'investissement, resteraient une alternative technique à moyen terme pour les autres types de matériels (y compris le fret) ;

- La seconde piste de réduction du bruit à la source concerne la mise en place d'absorbeurs de vibrations sur les rails [26]. Ces dispositifs renforcent la capacité naturelle d'absorption d'énergie vibratoire de la voie, et réduisent sa contribution sonore, notamment aux plus faibles vitesses (figure 7).

### Composants de voie à faible émission sonore

- Une voie silencieuse est aussi nécessaire à la réduction efficace du bruit des trains
- Les absorbeurs de vibrations permettent de réduire sa contribution sonore
- Ils sont une alternative possible à la pose de murs antibruit

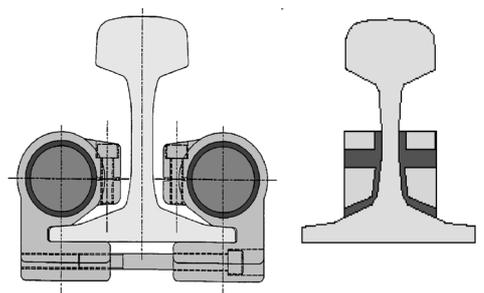


fig. 7

### Remplacement des semelles en fonte par des semelles de type K ou LL

Il est envisagé dans différents groupes de projets, qui se sont constitués à l'initiative :

- de l'Union Internationale des Chemins de Fer (UIC) et piloté par la SNCF, pour évaluer les performances au banc et en ligne de semelles de freins composites de type « K ». Ses conclusions ont conduit en septembre 2003 à l'approbation technique de l'admission au trafic international de matériels roulants équipés de semelles de frein de type « K » en matériaux composites. Elles confirment ainsi les homologations prononcées en septembre 2000 à titre provisoire. On sait en revanche que l'adoption de ces semelles pourra conduire à une modification importante des matériels roulants, les pressions de freinage s'avérant différentes entre la fonte et le matériau composite, ce qui nécessite le plus souvent la mise en place d'anti-enrayeurs ;
- sous l'impulsion de la Commission Européenne, pour la mise au point de la semelle de type « LL », dont le principal avantage en plus des performances acoustiques, serait de pouvoir se substituer directement aux semelles en fonte d'origine, en conservant notamment les pressions de freinage. Dans ce cas la modification du système de freinage s'en trouverait réduite, limitant ainsi l'impact de leur mise en place sur le coût de cycle de vie du matériel, notamment dans le

cadre du transport de fret. Les conclusions définitives de cette étude ne sont pas connues à ce jour.

Toutes ces études font état d'une réduction du bruit émis comprise entre 5 et 10 dB(A).

En revanche, on relève un certain nombre de contraintes apportées par ce type de solution :

- tout d'abord, le respect des performances de freinage est rendu plus difficile, et impose un examen attentif des paramètres d'influence sur la sécurité des circulations ;
- ensuite, la modification des règles de maintenance des matériels roulants, et des coûts qui lui sont associés ;
- enfin, la nécessité d'un rééquipement de la totalité des matériels existants à l'échelle européenne, sur une période courte, condition nécessaire au constat d'une réduction effective du bruit en environnement : en effet, avec une hypothèse de renouvellement « naturel » des matériels de l'ordre de 3% par an, la réduction du bruit attendue ne se révélerait qu'au bout d'une trentaine d'années.

L'impact de ce rééquipement est le plus sensible dans le domaine du fret, et concerne en France plus de 100 000 wagons : les premières études évoquent un investissement de l'ordre de 3 à 7000 € par véhicule. À l'échelle européenne, le chiffre avancé est de l'ordre de 4 Milliards d'€ pour une flotte de 650 000 wagons concernés [28], sans préjuger de l'incidence sur le coût d'exploitation, qui ne sera connu qu'après un retour d'expérience. Il convient sans doute de rester prudent sur ces chiffres. En effet, une telle opération de rééquipement, complétée par le renouvellement ou la radiation de matériels anciens d'une moyenne d'âge importante (28 ans pour la France), pourrait sans doute contribuer à redynamiser le transport de fret intra européen par la mise en place de matériels plus adaptés aux besoins des clients.

En tout état de cause, une telle décision de rééquipement, compte tenu de son implication financière ne peut être prise à l'échelle d'une entreprise seule, fût-elle ambitieuse en matière d'environnement, sans un montage financier adapté, à l'échelle européenne. On est bien loin de la politique helvétique, souvent citée en référence, qui a fait le choix politique validé par voie référendaire, de contribuer au financement des modifications du matériel de ses exploitants nationaux, et qui envisage d'imposer une écotaxe aux utilisateurs étrangers de son infrastructure, dont les matériels ne respecteraient pas les seuils qu'elle s'est fixés.

En conséquence, si d'un point de vue technique le principe de l'admission en trafic international de matériels fret freinés avec des semelles en matériau composite est acquis depuis septembre 2003, un certain nombre de réserves pourraient en retarder la généralisation, en raison :

- de conditions d'homologation encore lourdes et coûteuses et
- d'un mode de financement qui reste à définir.

Dans le domaine du transport voyageur en revanche, la SNCF a entrepris un certain nombre d'investigations pour développer des semelles composites adaptées aux contraintes techniques propres à ce type de trafic. Elles ont conduit à la mise en place :

- de freins à disques sur les remorques de TGV, ou sur certaines séries de motrices DUPLEX, qui comme pour les semelles composites, réduisent les émissions sonores.
- de semelles composites sur les motrices TGV, ou sur les matériels voyageurs,

Pour ce qui concerne les matériels à grande vitesse, on peut donc parler de généralisation des dispositifs de freinage silencieux.

Pour les autres matériels voyageurs régionaux, et en fonction des choix des autorités organisatrices des transports, la mise en place de matériels neufs équipés de ces dispositifs ou le rééquipement

des matériels existants peut être envisagé. On peut citer à titre d'exemple la convention en cours avec la région administrative Île-de-France, pour l'équipement, avec des semelles de freins en matériau composite, de 600 véhicules existants de la ligne C du Réseau Express Régional (RER) dès 2004.

### ***Mise en place d'absorbeurs dynamiques sur le rail***

La seconde piste de réduction du bruit à la source concerne la mise en place d'absorbeurs de vibrations sur les rails. Ces dispositifs sont des systèmes mécaniques fixés, espacés régulièrement le long du rail, qui renforcent la capacité naturelle d'absorption d'énergie vibratoire de la voie, à l'aide de matériaux viscoélastiques, et réduisent sa contribution sonore, notamment aux plus faibles vitesses. Différentes techniques de fixations (fixation mécanique, puis collage, et enfin par clips) ont pu être testées dans le cadre d'études de faisabilité dont l'origine remonte à 1994.

L'efficacité des absorbeurs est déterminante dans des configurations d'exploitation où le bruit de roulement, et plus encore la contribution sonore du rail prédomine. C'est le cas des vitesses classiques associées aux trafics du type banlieue ou fret. Elle peut être isolée, et estimée sur une voie française, à une valeur comprise entre 4 et 5 dB(A).

De plus, le coût de revient de cette solution la rendrait compétitive et complémentaire des protections sonores plus classiques.

En revanche, et comme pour le matériel roulant, un certain nombre de questions techniques demeurent, qui concernent la maintenance de la voie ou le respect de l'intégrité mécanique de ses composants, liés à la pose de ces absorbeurs.

Parmi celles-ci, citons les critères de gabarit géométrique, d'influence sur la maintenance des composants de la voie, de tenue thermomécanique, ou d'innocuité vis-à-vis de la signalisation (circuits de voies). La validité des solutions vis-à-vis de certains de ces critères est encore à démontrer sur des prototypes industriels, qui font actuellement l'objet en France d'une démarche d'homologation menée par la SNCF, sous maîtrise d'ouvrage de RFF.

Le résultat de ces investigations, associées à la mise en place de semelles composites sur le matériel dans des conditions d'exploitation commerciale, pourrait s'avérer particulièrement intéressant.

### ***A plus long terme, repenser l'optimisation du système***

Comme nous venons de le voir, les critères d'optimisation du système roue-rail vis-à-vis de l'émission sonore sont multiples.

Aussi dans ce contexte, l'approche actuelle s'inscrit dans une démarche d'adaptation (ou de rajout) des contraintes du système pour une prise en compte de critères acoustiques. Le système roue-rail est modifié avec des composants (par exemple une semelle composite ou un absorbeur de vibrations) dont les performances acoustiques ont été démontrées, pour en valider le comportement vis-à-vis de l'ensemble des critères existants, et s'assurer que le système ainsi constitué répond aussi à toutes les contraintes techniques de performances, d'exploitation, de maintenance et de sécurité. Cette démarche d'homologation présente l'avantage de n'autoriser la mise en service opérationnelle que des sous-systèmes ou composants qui ont passé avec succès l'ensemble des tests de qualification, y intégrant des périodes d'essai en ligne dont les conditions se rapprochent de celles du service commercial. En revanche, elle a aussi des inconvénients :

- elle considère les critères d'homologation les plus récents comme un rajout, voire une sur contrainte des critères existants ;
- elle est longue est fastidieuse, parfois itérative, et requiert de nombreux essais de qualification, souvent complexes dans des domaines techniques très différents ;

- si elle assure au mieux le respect de spécifications établies, elle ne garantit pas le succès de l'opération : si l'un des tests d'homologation n'est pas validé, il peut se révéler nécessaire de reprendre la démarche complète pour un nouveau composant ;
- il n'est pas démontré qu'elle est la plus efficace d'un point de vue économique.

Comme cela a été le cas pour démontrer la faisabilité de solutions acoustiques innovantes, l'optimisation et le développement de solutions opérationnelles peuvent bénéficier d'une approche qui intègre :

- la spécification préalable des performances attendues du système,
- l'examen des conditions requises pour atteindre ces performances, au niveau de chaque composant,
- une analyse économique des différentes solutions.

Cette approche devrait tirer avantage de collaborations avec des constructeurs ou équipementiers, voire avec d'autres réseaux ferroviaires, par le biais de la réalisation de démonstrateurs silencieux, véritables vitrines technologiques qui rassembleraient les composants les plus performants, dans des conditions d'exploitation les plus proches du domaine opérationnel.

### **Aspects financiers**

Exigence croissante des temps modernes, la qualité de l'environnement acoustique a un coût, dont nous avons pu percevoir l'incidence sur des cas très concrets. Parmi les responsables des nuisances sonores engendrées, le mobile et l'infrastructure ont leur contribution relativement équilibrée [8], [23].

La complémentarité des solutions techniques à la source n'en est que renforcée, y compris par rapport aux solutions plus classiques, à base d'écrans antibruit par exemple. En effet, ces solutions éprouvées, qui permettent de réduire le niveau de bruit de 5 à 8 dB(A), restent coûteuses : un mur antibruit coûte de l'ordre de 1000 à 1500€ le mètre linéaire.

Ainsi, l'alternative d'une pose de semelles composites sur le matériel contribue à la réduction de la contribution acoustique de la voie. Dans le même esprit, la pose d'absorbants de vibration du rail permet de réduire les composantes de bruit du matériel. Dans les deux cas, les gains se traduisent en termes de trafic ou de sillons, en autorisant une exploitation plus intense et donc une meilleure rentabilisation des infrastructures, à coût environnemental constant.

Dans ce contexte, au cours des projets STAIRRS [28] et Coût du dB [12], projets visant notamment à évaluer des solutions de réduction du bruit selon leur rapport coût/efficacité, différentes combinaisons de scénarios de réduction du bruit ont été comparées.

Parmi les conclusions, la solution tout écran reste une solution coûteuse, qui peut être avantageusement remplacée dans certains cas par des actions de réduction du bruit à la source ou par la combinaison de solutions de réduction du bruit à la source et de protections locales.

Par exemple, dans le projet Coût du dB, les scénarios suivants ont été testés :

Type de solution	Scénario																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
FREINAGE COMPOSITE FRET		✓		✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓		
Freinage composite voyageur (Banlieue, TER, Corail)			✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓	✓		
Meulage local des rails					✓	✓	✓							✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Roues optimisées (absorbeurs sur roue)																				✓	✓	✓		
Absorbeurs sur voie							✓	✓	✓					✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓
Écrans absorbants											✓	✓	✓				✓	✓	✓					✓

La figure 8 suivante illustre la classification de ces scénarios suivant le couple de critères (coût, efficacité de la solution). Le coût est indiqué en pourcentage du coût du scénario le plus élevé.

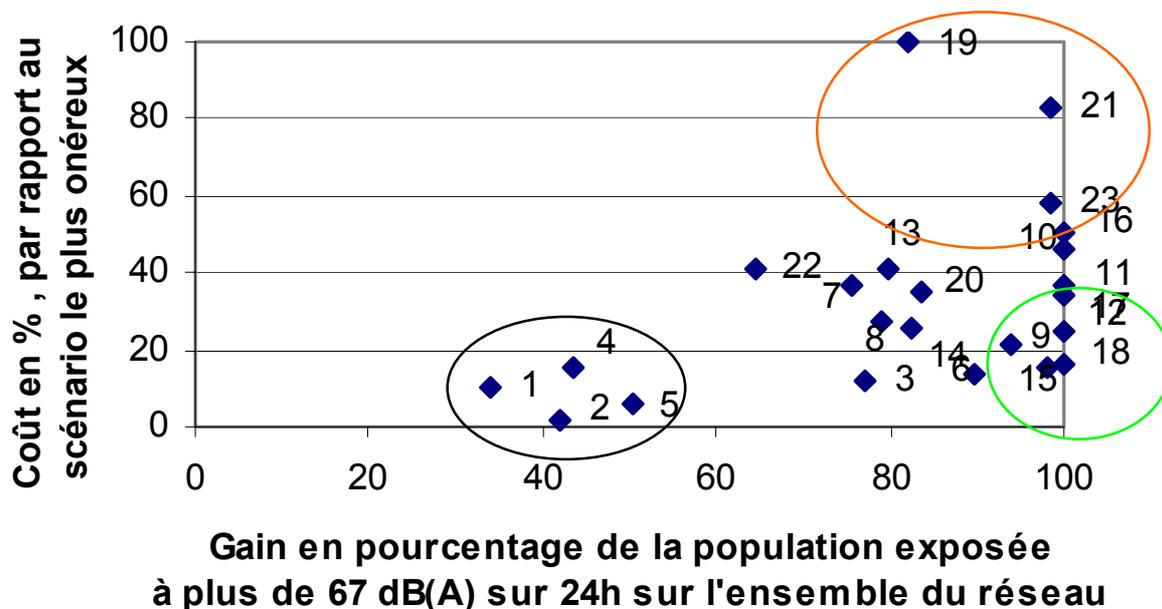


Figure 8 : classification coût/efficacité des scénarios

Les numéros correspondent aux différents scénarios testés présentés dans la table :

- un premier groupe (cercle noir) de scénarios parmi les coûts les moins élevés, mais protégeant environ 50 % de la population exposée. Il s'agit de solutions sur le matériel roulant, éventuellement combinées avec le meulage préventif des rails.
- Un deuxième groupe (en orange) présente les coûts les plus élevés. Il s'agit principalement de solutions tout écran ou proposant l'utilisation de roues optimisées.
- le troisième groupe (en vert) paraît être le plus prometteur. En effet, il combine un coût raisonnable en comparaison des différents scénarios considérés, tout en protégeant plus de 95 % de la population exposée.

Il ressort donc de cette étude que la combinaison de solutions appliquées conjointement sur le matériel roulant (changement du système de freinage), et sur l'infrastructure paraissent ainsi les plus pertinentes.

Finalement, l'approche économique de solutions optimisées mérite d'être conduite de manière la plus transverse possible pour intégrer tous les éléments du système ferroviaire et leur interaction mutuelle. En effet, il serait difficile de convaincre un des acteurs ferroviaires de financer seul, sans contrepartie, des dispositifs réducteurs du bruit dont l'efficacité bénéficierait aussi aux autres acteurs.

En revanche, il semblerait raisonnable d'imaginer qu'un partage des investissements soit possible, dans une logique vertueuse bénéficiant à l'ensemble de mode ferroviaire, par une approche globale d'optimisation du système.

## **CONCLUSION : VERS LA NECESSAIRE COLLABORATION DES DIFFERENTS ACTEURS**

La forte intégration du système ferroviaire, liée à des raisons techniques et historiques n'est plus à démontrer. Dans le domaine acoustique, celle-ci est vérifiée une fois encore.

Face au défi qu'impose notamment la réglementation européenne, des solutions techniques existent, dont la faisabilité est démontrée. Elles sont complexes et leur mise en œuvre opérationnelle exige des compromis, souvent coûteux, dont l'impact dépasse le seul volet de l'acoustique ferroviaire.

Si ces solutions techniques sont de nature à contribuer fortement à la réduction des nuisances sonores en environnement, les exigences en la matière vont croissant. Sans de nouveaux progrès, la capacité de développement du mode ferroviaire pourrait s'en trouver réduite. Aussi, de nouvelles pistes de progrès, pour la conception silencieuse des matériels et de la voie, ou la maintenance de leurs performances acoustiques se font jour et doivent être explorées, pour consolider l'optimisation de l'ensemble du système, sous ses différents aspects techniques, financiers, et organisationnels, dans sa dimension européenne.

Quelles que soient les solutions retenues, il paraît aujourd'hui évident qu'aucun des acteurs n'est en mesure d'en assurer seul le financement, alors que l'impact favorable à la réduction du bruit profite à l'ensemble des parties prenantes de la communauté ferroviaire.

Ces différents arguments militent pour une collaboration étroite entre gestionnaires d'infrastructure et entreprises ferroviaires, qui peuvent trouver un intérêt commun au développement de solutions conjointes et complémentaires. Dans cette tâche, l'association des compétences techniques des constructeurs et équipementiers est une des conditions de réussite de cette entreprise ambitieuse.

Enfin, le niveau d'exigence en matière environnementale est tel, qu'une politique environnementale ambitieuse peut à terme constituer un avantage concurrentiel, et de ce fait devenir incontournable, à supposer que les avancées technologiques la rendent possible. La maîtrise des problèmes environnementaux serait alors une des conditions du développement du trafic, au même titre que la sécurité ou la qualité des services.

Le développement durable du mode ferroviaire est aussi à ce prix.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

D'une manière générale, le lecteur qui souhaite approfondir les aspects liés au bruit ferroviaire pourra consulter avantageusement les numéros « spécial bruit » de la Revue Générale des Chemins de Fer (RGCF) d'octobre et de novembre 2003.

- [1] Perception du cadre de vie et attitudes sur l'environnement, A. DUFOUR, rapport CREDOC n°86, octobre 1990.
- [2] La gêne due au bruit des transports terrestres, J. LAMBERT, Revue Générale des Chemins de Fer, octobre 2003.
- [3] Directive 2002/49/CE relative à la l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement, Journal officiel n°L189/12 du 18/07/2002 pp. 12–25.
- [4] Moehler U, Liepert M, Schuemer R, Griefahn B, 2000: Differences between railway and road traffic noise. J Sound Vib 853-864.
- [5] Elements for a position paper on dose response relationships between transportation noise and annoyance, H. M. E. MEDIEMA, C. G. M. OUDSHORN, TNO report PG/VGZ/00.052, July 2002.
- [6] Évaluation de la gêne due à l'exposition combinée aux bruits routier et ferroviaire, P. CHAMPELOVIER, C. CREMEZI., J. LAMBERT, rapport INRETS-LTE/SNCF n°0242, septembre 2002.
- [7] Results of the METARAIL round robin test for railway rolling noise, M. G. DITTRICH, G. POLONNE, M. KALIVODA, J. LUB, P. FODIMAN, W. HANREICH, sixth International Congress on Sound and vibrations, 1999, Lyngby, Denmark.
- [8] Environmental railway noise : a source separation measurement method for noise emissions of vehicles & track, F. LETOURNEAUX, O. COSTE, C. MELLET, P. FODIMAN, Forum Acusticum, Sévilla 2002.
- [9] Quelques définitions relatives au bruit, P. PINÇONNAT, Revue Générale des Chemins de Fer, octobre 2003.
- [10] Groupe de travail MONA-RONA-VONA – Synthèse finale des travaux (rapport SNCF RVA/LG/rout/c/970729, L. GUCCIA, 1997.
- [11] OF WHAT Project – Final Report, ERRI RP 22/84231151, 1993.
- [12] Projet Coût du dB : étude cout-bénéfice de différentes solutions du bruit, rapport SNCF, septembre 2000.
- [13] La problématique du bruit dans le cadre de l'évolution du système ferroviaire : le rôle du gestionnaire d'infrastructure, C. KESELJEVIC, Revue Générale des Chemins de fer, octobre 2003.
- [14] Directive 91/440/CEE du Conseil, du 29 juin 1991, relative au développement des chemins de fer communautaires, Journal officiel n° L 237 du 24/08/1991 pp. 1–25.
- [15] Directive 2001/12/CE du Parlement européen et du Conseil, du 26 février 2001, modifiant la directive 91/440, Journal officiel n° L 75 du 15/03/2001 pp. 1–25.
- [16] EU environmental noise policy: an integrated approach, G. PAQUE, proceedings of the 5<sup>th</sup> European Conference on Noise Control, EURONOISE 2003, Naples (2003).
- [17] Directive 96/48/CE du Conseil, du 23 juillet 1996 relative à l'interopérabilité du système ferroviaire transeuropéen à grande vitesse, Journal officiel n°L2354 du 17/09/1996, pp. 6–24.
- [18] Directive 2001/16/CE du Parlement européen et du conseil du 19 mars 2001, relative à l'interopérabilité du système ferroviaire transeuropéen conventionnel, journal officiel n°L 110, pp. 1–27.
- [19] Spécification technique d'interopérabilité relative au sous-système « matériel roulant » du système ferroviaire transeuropéen à grande vitesse, journal officiel n°L245/402 du 12/09/2002, pp. 402–506.
- [20] Projet de spécification technique d'interopérabilité relative au sous-système « matériel roulant » du système ferroviaire transeuropéen conventionnel. Volet bruit : bruit émis par les wagons, locomotives, automotrices et voitures, documents internes AEIF réf. RST-221-nF & 222-n.
- [21] Le projet NOEMIE : enjeux et perspectives pour la révision des Spécifications Techniques d'Interopérabilité (STI) sur le bruit émis par les trains à grande vitesse, P. FODIMAN, M. BANO, Journées SFA/SNCF bruit et vibrations, décembre 2003.
- [22] HARMONOISE: objectives and status of a EU funded project to develop harmonised prediction methods for road and railway noise, P. DE VOS, proceedings of the 5<sup>th</sup> European Conference on Noise Control, EURONOISE 2003, Naples (2003).
- [23] Railway noise: a review of recent progress and research, P.-É. GAUTIER, proceedings of the 5<sup>th</sup> European Conference on Noise Control, EURONOISE 2003, Naples (2003).
- [24] Nuisances phoniques de la Ligne TGV Méditerranée dans le sud de la Drôme, B. DESBAZEILLE & J.-N. BOUTIN, Rapport n°2002-0255-01 du Conseil Général des Ponts et Chaussées, août 2003.
- [25] Experimental validation of low noise wheel concepts: Application to freight and high speed traffics, P. FODIMAN, G. GABORIT, P.-É. GAUTIER, 12<sup>th</sup> Wheelsets congress, Qingdao, Chine, 1998.
- [26] Mise en voie d'absorbants dynamiques sur le rail pour la réduction du bruit de roulement, L. GIRARDI, F. FOY, M. FUMEY, RGCF, octobre 2003.
- [27] Bruit et matériel roulant : le couple roue-semelles composites. Réduction du bruit de roulement, J. RAISON, J.-J. VIET, RGCF, octobre 2003.

- [28] Implementation study UIC action plan, AE Technology, second progress report, M. BRENNAN, N. BOUKHALIL, P. DE VOS, F. VAN DER ZIJP, AEAT/03/2400071/007, sept. 2003.
- [29] The STAIRRS project: a cost effectiveness analysis of railway noise reduction on a European scale, J. OERTLI, proceedings of the 5<sup>th</sup> European Conference on Noise Control, EURONOISE 2003, Naples (2003).
- [30] La prise en compte du bruit dans les spécifications Techniques d'Interopérabilité : historique, évolution et perspectives, P.-É. GAUTIER, RGCF, avril 2004 (à paraître).
- [31] La recherche à la SNCF pour la réduction du bruit des trains, P.-É. GAUTIER, C. TALOTTE, P. FODIMAN, RGCF, juin 1999.
- [32] Elements for a position paper on night-time transportation noise and sleep disturbance, H. M. E. MIEDEMA, W. PASSCHIER-VERMEER, H. VOS, TNO Report 2002-59, January 2003