

ANNEXE 3 - Bruits et vibrations liés aux transports sur voies ferrées : données SNCF

Niveaux de bruit à proximité des lignes de chemin de fer

L'approche réglementaire est fondée sur la considération de niveaux sonores caractérisant la gêne de long terme, représentative de la situation acoustique moyenne du site pour un intervalle de référence donné. Les descripteurs associés sont exprimés sur des intervalles de référence de 24 heures, intégrant la période jour (6h à 22h) et de nuit (22h à 6h)⁷.

Afin d'évaluer ces descripteurs pour la réalisation d'études d'impact ou de cartographies sonores, la Nouvelle Méthode de Prévision du Bruit FERroviaire (NMPB FER) (1998), a été développée. Elle s'inspire de la méthode NMPB mise en œuvre dans le domaine routier et y adapte les spécificités ferroviaires. Elle repose sur une description des sources de bruit avec la prise en compte des principaux effets de propagation dans une approche de long terme, incluant les effets météorologiques.

Méthode de prédition du bruit de trafic – spécificités ferroviaires

Pour les circulations ferroviaires évoluant entre 60 et 300 km/h, la répartition des contributions sonores relatives (véhicules, bruit des auxiliaires embarqués à bord du convoi) a été établie au regard des différentes composantes du bruit ferroviaire (bruit de roulement résultant du contact roue sur rail, bruit d'origine aérodynamique résultant de l'écoulement de l'air autour de ces mêmes véhicules. Chaque source ponctuelle équivalente est affectée d'un niveau de puissance sonore exprimée en dB(A), par bande d'octave depuis 125 Hz jusqu'à 4000 Hz, correspondant au trafic ferroviaire supporté par cette voie de circulation.

Principes de l'évaluation du bruit ferroviaire en environnement

Bien que la Directive européenne 2002/49/CE relative à la l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement ait prescrit l'évaluation du bruit reçu par les riverains, tout comme les législations nationales en ont prescrit la limitation, celui-ci dépend du trafic (nombre, vitesse, et nature des circulations de chaque type), et de la distance du récepteur à la voie.

Pour diminuer le bruit reçu par les riverains, on peut donc agir :

⁷ Les études portant sur la propagation du son en milieu extérieur ont montré que (1) la durée de ces périodes était la mieux adaptée, le choix de périodes plus courtes n'étant pas pertinent en raison du caractère aléatoire des variations des conditions météorologiques sur des durées trop courtes ; (2) leur caractère reproductible et prédictible s'avérerait satisfaisant en pratique.

- Sur le nombre de circulations : une telle action peut être très pénalisante pour la capacité de l’infrastructure : il faut diviser le trafic par deux pour gagner 3 dB(A) et le diviser par 10 pour gagner 10 dB(A) ;
- Sur la vitesse des circulations où, au-delà de 60 km/h et dans la très grande majorité des cas, la contribution du bruit de roulement est majoritaire ; il faut diviser la vitesse par un facteur 2 pour gagner 9dB(A). Là aussi une réduction significative du bruit a une influence notable sur la capacité de l’infrastructure en termes de sillons ou de trafic ;
- En mettant en place des protections acoustiques, l’atténuation apportée varie de 3 à plus de 15 dB(A) suivant le type de train et d’écran (un écran acoustique coûte entre 1000 € et 1500 € par mètre linéaire) ;
- En agissant enfin sur le bruit à l’émission de chaque type de train. Cette stratégie de réduction du bruit à la source, apparaît d’autant plus attrayante que des progrès importants ont été accomplis ces dernières années tant sur le bruit des trains de voyageurs classiques que pour les trains à grande vitesse ;
- Limiter le bruit à l’émission permet de garantir, indépendamment de la mise en place de protections sonores, que l’émission acoustique de chaque type de train ne dépasse pas une certaine limite, et ménage ainsi *a priori* une certaine capacité de circulation, sans imposer des protections supplémentaires. Dans le cas des zones urbaines à fort trafic, où la protection apportée par les écrans n’est pas illimitée, la capacité de trafic est préservée. Certains états tels que l’Autriche, l’Italie ou la Suisse ont déjà pris des dispositions réglementaires pour limiter le bruit émis par les circulations ferroviaires. La réglementation européenne en cours d’élaboration vise aussi cette réduction à la source⁸ en s’appuyant sur les Spécifications Techniques d’Interopérabilité (STI)⁹.

Caractérisation expérimentale du bruit dans l’environnement

La norme NF S 31-088¹⁰ présente les conditions de mesurage du bruit du trafic ferroviaire en environnement en vue de réaliser, un dossier d’étude d’impact sonore ou le contrôle d’objectif. Elle prend en compte les conditions de trafic par des techniques de codage, et les classes de conditions météorologiques associées, à l’exclusion de leurs variations de long terme. Le niveau de long terme

⁸ 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 ; 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.

⁹ (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 ; 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.

¹⁰ Norme française NF-S 31 088 : Mesurage du bruit dû au trafic ferroviaire en vue de sa caractérisation (1996).

est identifié à partir des mesures sur site, et le trafic ferroviaire « de long terme », en termes de nombre de passages et de vitesse associés

Caractérisation des niveaux de bruit à l'émission

La mesure du bruit à l'émission des trains a fait l'objet de travaux de normalisation dans le cadre des travaux de l'International Standard Organisation (ISO), et du Comité Européen de Normalisation (CEN). Ils ont notamment abouti à un projet de norme européenne Pr EN ISO 3095, toujours en discussion¹¹. Selon ces approches normatives, le niveau de bruit à l'émission d'un train est caractérisé classiquement dans trois conditions opérationnelles fondamentales : le bruit au passage, mesuré à vitesse constante, qui caractérise les conditions de circulation les plus courantes ; le bruit à poste fixe, qui est important pour éviter la gêne des riverains aux abords des zones de stationnement (véhicule à l'arrêt en gare, en cours de préparation dans un dépôt...)

Bruit au passage

Descripteurs acoustiques

Parmi les différents descripteurs utilisés pour caractériser le bruit au passage à vitesse constante d'un véhicule, le descripteur couramment utilisé par les opérateurs ferroviaires est essentiellement le « niveau équivalent sur le temps de passage » $L_{pAeq,tp}$, qui représente l'énergie acoustique moyenne émise au passage, mesuré à 25 mètres de la voie où circule le véhicule en essai. Le temps de passage tp représente l'intervalle de temps pendant lequel le train coupe la perpendiculaire à la voie passant par le microphone d'essai. Le $L_{pAeq,tp}$ est donné par la formule suivante :

$$L_{pAeq,tp} = 10 \times \log_{10} \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt$$

La distance de mesurage utilisée jusqu'à la mise en service de la grande vitesse était 7,5 mètres de l'axe de la voie, le microphone de mesure étant placé à une hauteur de 1,2 mètres par rapport à la surface de roulement (rail). Lors de la mise en service des trains à grande vitesse, la distance de 25 mètres par rapport à l'axe de la voie avait été adoptée par une majorité de réseaux pratiquant la grande vitesse (Allemagne, Italie, France), ainsi que par le Royaume Uni et les Pays-Bas.

Par ailleurs, il était reproché au descripteur de ne pas prendre en compte toute l'énergie sonore du signal, et notamment avant et après le passage de la rame au droit du microphone de mesure. La contribution cumulée de ces fronts montants et des cendants pour un TGV à 25 mètres est de l'ordre de 0,5 dB(A). Depuis quelques années, dans le cadre d'une tentative de rapprochement de ce

¹¹ Railway application – Acoustics – Measurement of noise emitted by rail bound vehicles, CEN Draft standard pr EN ISO 3095, January 2001

descripteur avec l'indicateur SEL (SEL ou *Single Event Level*) utilisé au Royaume-Uni, un nouveau descripteur avait été introduit dans le projet de norme européenne Pr EN ISO 3095. Ce descripteur, le TEL - *Transit Exposure Level* - (TEL = tp·SEL) est défini par la formule suivante :

$$TEL = 10 \times \log \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt$$

Dans ce cas, l'intégration se fait sur toute la durée du signal, mais l'énergie acoustique est ramenée forfaitairement sur la durée de passage. Ce descripteur présente l'avantage de prendre en compte la totalité de l'énergie acoustique du signal tout en étant proche du LpAeq,tp (la différence entre les deux descripteurs reste inférieure à 1 dB(A) pour une rame TGV à 300 km/h), et de ne pas afficher, dans la majorité des cas, une valeur supérieure à la valeur maximale du niveau instantané. C'était en effet le cas en Grande-Bretagne avec le descripteur SEL utilisé, pour lequel l'énergie est ramenée fictivement à une seconde.

Prise en compte dans les études prévisionnelles

L'usage de ces descripteurs, au travers de la norme Pr EN ISO 3095, permet de statuer sur les performances d'émission du matériel roulant dans le cadre de leur homologation. En revanche, dans des conditions d'exploitation commerciale, l'état de maintenance des matériels et de la voie conduit à des valeurs d'émission qui peuvent varier d'une rame à l'autre, ou d'un site à l'autre. Pour tenir compte de cette réalité dans le cadre des études prévisionnelles de gêne sonore dans l'environnement, une méthode statistique spécifique a été mise en œuvre. Elle permet d'induire, à partir d'un échantillon de mesures, une valeur moyenne représentative de l'état acoustique d'une population de matériels, dans des conditions de mesure (vitesse, distance à la voie circulée) et à un instant donné. De plus, elle précise les conditions de dispersion par rapport à un état de référence moyen. Ce niveau de référence est représentatif de l'ensemble de la population de matériels considéré, et non plus seulement de l'échantillon objet de la mesure. Il est pris en compte dans les calculs prévisionnels de gêne sonore.

Les mécanismes de génération du bruit des trains

Le bruit de roulement

Le bruit de roulement constitue la source principale du bruit ferroviaire, pour les vitesses classiques, mais aussi pour la première génération de TGV (TGV Sud-Est orange, avant rénovation).. Cet état de fait a justifié des travaux importants de modélisation et d'expérimentations, rassemblant une expertise internationale, qui ont donné lieu à la mise en œuvre du modèle TWINS (*Track Wheel Interaction Noise Software*). Développé par l'Union Internationale des Chemins de Fer (UIC), le modèle TWINS de prévision du bruit de roulement a été validé en ligne pour des configurations

voyageurs et fret et pour des vitesses conventionnelles dans plusieurs pays d'Europe, ainsi qu'en France pour le bruit de roulement des TGV au delà de 300 km/h.

Ces principes sont présentés sur la figure 9.

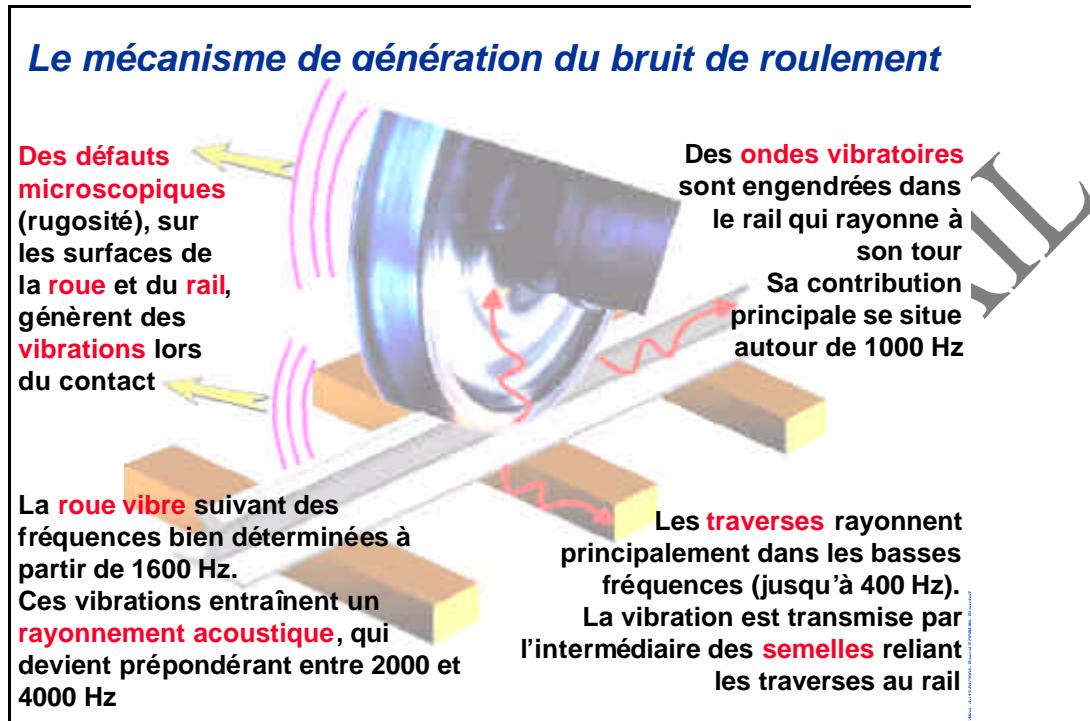


Figure 9 : Les mécanismes de génération du bruit de roulement

Ce modèle a permis non seulement la prévision du bruit de roulement dans différentes situations européennes, mais aussi la définition et la conception de solutions pour la réduction du bruit.

Le bruit d'origine aérodynamique

Le développement des TGV a suscité une attention particulière vis à vis du bruit d'origine aérodynamique, associé aux caractéristiques d'écoulement des masses d'air autour de la rame, qui se révèle dominant aux très grandes vitesses, au-delà de 320 km/h (cf. figure 10).

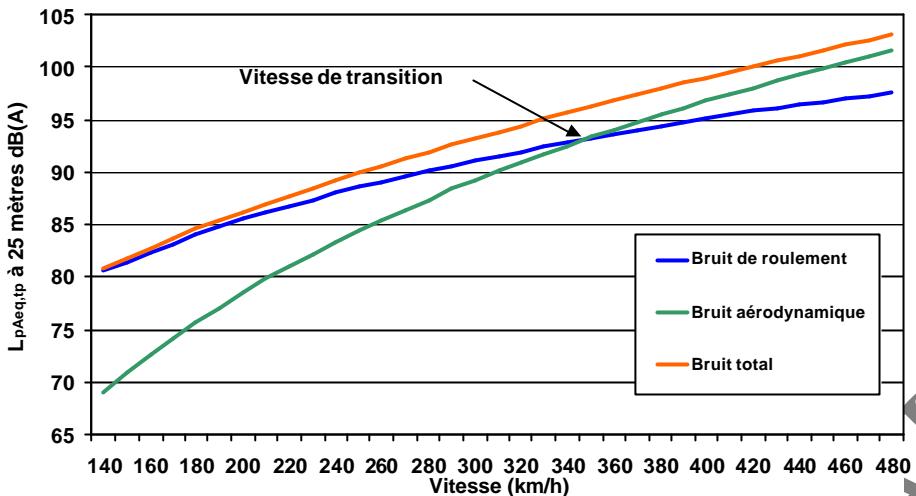


Figure 10 : L'évolution du bruit des trains en fonction de la vitesse

Le bruit d'origine aérodynamique reste malgré tout beaucoup plus difficile à modéliser que le bruit de roulement, et sa caractérisation expérimentale demande des précautions particulières. Des antennes acoustiques, spécialement adaptées pour les TGV ont permis de localiser et caractériser les différentes sources de bruit et leur importance relative sur les rames.

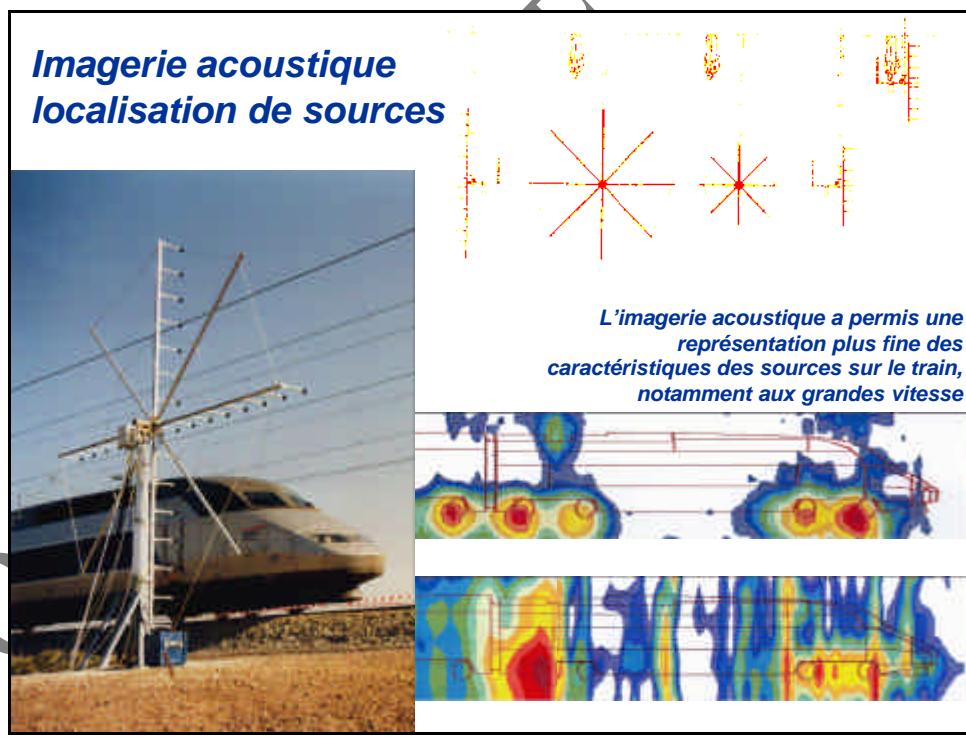


Figure 11 : Localisation des sources en mouvement

En revanche, pour la caractérisation du bruit d'origine aérodynamique dans la zone du bogie où il prédomine (mais se trouve superposé au bruit de roulement), le développement d'un traitement de signaux issus de sondes de mesures spécifiques a été nécessaire (projet de coopération franco-

allemande DEUFRAKO). À partir des ces mesures, un modèle quantitatif du bruit aérodynamique dans la zone bogie a été développé.

La modélisation du bruit aérodynamique a été abordée dans le cadre de projets soutenus par le PREDIT. Dans ce cadre, des méthodes avancées en aérodynamique telle la LES (Simulation des grandes échelles de la turbulence) ont été couplées à des méthodes numériques en acoustique. Les calculs sont cependant actuellement limités à des configurations simplifiées (effet de marche ou cavité bidimensionnelle). Un modèle du bruit aérodynamique du pantographe a par ailleurs été développé dans le cadre du projet DEUFRAKO.

Moyens de réduction des niveaux de bruit à la source

Solutions à court terme

Parmi les solutions techniques envisageables à court terme, deux pistes semblent présenter des avantages remarquables :

Agir sur le système de freinage du matériel

La première piste consiste à agir sur le matériel roulant, en supprimant les semelles de frein qui assurent le freinage du train par frottement sur la surface de roulement de la roue, et en les remplaçant, soit par des disques, solution coûteuse mais performante, (remorques de TGV) ; soit par des semelles de freins en matériaux composites¹². Ces modifications permettent une réduction effective de l'énergie sonore sur l'ensemble des voies , de l'ordre de 5 à 10 dB(A) (c'est à dire 3 à 10 fois moins d'énergie sonore associée).

L'adoption de semelles en matériaux composites présente en revanche un certain nombre de contraintes :

- le respect des performances de freinage est rendu plus difficile, et impose un examen attentif des paramètres d'influence sur la sécurité des circulations ;
- la modification des règles de maintenance des matériels roulants et des coûts qui lui sont associés ;
- la nécessité d'un rééquipement de la totalité des matériels existants sur une période courte.,

L'impact de ce rééquipement est le plus sensible dans le domaine du fret, et concerne en France plus de 100 000 wagons : l'investissement est de l'ordre de 3 à 7000 € par véhicule. À l'échelle européenne, le coût avancé est de l'ordre de 4 Milliards € pour une flotte de 650 000 wagons concernés. En conséquence, si d'un point de vue technique, l'Union des Chemins de Fer (UIC) a acté depuis septembre 2003 le principe de l'admission en trafic international de matériels fret

¹² Les semelles en fonte, utilisées traditionnellement pour la majorité des matériels roulants, dégradent la surface de roulement au cours des freinages et en accroissent fortement la rugosité. En revanche, les semelles en matériaux composites, qui sont amenées à les remplacer la « polissent », contribuant ainsi à réduire l'énergie sonore rayonnée par le système.

freinés composite, un certain nombre de réserves pourrait en retarder la généralisation, en raison de conditions d'homologation encore lourdes et coûteuses, et d'un mode de financement qui reste à définir.

Agir sur la contribution sonore de la voie

La seconde piste de réduction du bruit à la source concerne la mise en place d'absorbeurs de vibrations sur les rails (cf. figure 12). Ces dispositifs renforcent la capacité naturelle d'absorption d'énergie vibratoire de la voie, et réduisent sa contribution sonore, notamment aux plus faibles vitesses. La réduction du bruit émis est alors de 4 à 5 dB(A) (c'est à dire de l'ordre de 2,5 à 3 fois moins d'énergie sonore).

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**

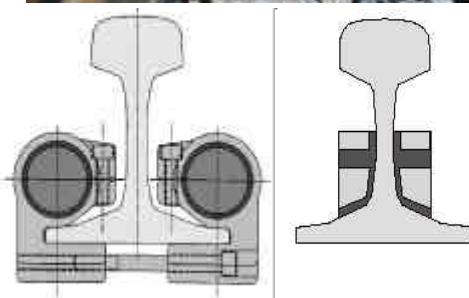


Figure 12 : Composants de voie à faible émission sonore

Comme pour le matériel roulant, un certain nombre de questions techniques demeure, qui concernent la maintenance de la voie ou le respect de l'intégrité mécanique de ses composants, liés à la pose de ces absorbeurs. En revanche, le coût de revient de cette solution la rendrait compétitive et complémentaire des protections sonores plus classiques.

Les pistes à moyen terme

Dans le domaine du bruit de roulement, on peut agir sur la réponse et le rayonnement de la roue et du rail. Ainsi, l'optimisation de la forme ou des matériaux constitutifs de la roue a une influence sur sa réponse vibratoire et l'excitation de ses modes de vibration. Le développement d'absorbeurs de vibrations ou d'écrans rapportés sur la toile de roue permet de réduire encore la puissance

acoustique émise par celle-ci de plusieurs dB(A). Des prototypes de roues optimisées pour le bruit ont été développés et testés en ligne¹³.

Cependant, la réduction du bruit émis par des roues « silencieuses » n'est vraiment effective que si des solutions similaires sont développées conjointement pour la voie l'efficacité des absorbeurs de vibrations du rail atteint alors 6 ou 7 dB(A) quand ils sont associés à des roues optimisées.

Dans le domaine des sources d'origine aérodynamique, le développement des méthodes expérimentales ou de simulation permettra, grâce notamment à des travaux menés en soufflerie anéchoïque, la mise au point de composants toujours plus discrets (pantographes) et d'optimiser les formes des carénages rapportés sur les caisses des rames à grande vitesse.

Les solutions classiques : écrans de protection

L'écran de protection reste une solution de base éprouvée, bien que très coûteuse, qui permet de réduire le niveau de l'infrastructure de 5 à 8 dB(A). Toutefois, au cours des projets visant notamment à évaluer des solutions de réduction du bruit selon leur rapport coût/efficacité, différentes combinaisons de scénarii de réduction du bruit ont été comparées. Elles montrent que 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, différents scénarii ont été testés associant diverses combinaisons : freinage composite fret, freinage composite voyageur meulage des rails, roues optimisées avec absorbeurs, absorbeurs sur voies, écrans absorbants. Le coût des différentes combinaisons possibles a été mis en regard des gains obtenus en termes de diminution des populations exposées à plus de 67 dB(A) sur l'ensemble du réseau. Trois grands groupes de combinaisons apparaissent en termes de rapports coût efficacité.

- un premier groupe de scénarii parmi les coûts les moins élevés, mais protégeant environ 50 % de la population exposée. Il s'agit de solutions sur le matériel roulant (freinage), éventuellement combinées avec le meulage préventif des rails.
- un deuxième groupe présente les coûts les plus élevés. Il s'agit principalement de solutions tout écran ou proposant l'utilisation de roues optimisées.

¹³ Tests réalisés : pour les matériels fret dans le cadre du projet européen SILENT FREIGHT ou dans le cadre du développement de dessertes urbaines à faible bruit ; pour les TGV, jusqu'à 300 km/h dans le cadre du projet RONA (Roue Optimisée vis à vis des Nuisances Acoustiques) soutenu par le PREDIT.

- un troisième groupe paraît être le plus prometteur. En effet, il combine un coût raisonnable en comparaison des différents scénarii considérés, tout en protégeant plus de 95 % de la population exposée. Il s'agit de combinaisons de solutions appliquées conjointement sur le matériel roulant (changement du système de freinage) et sur l'infrastructure (voies).

DOCUMENT DE TRAVAIL