

Mesure embarquée de la qualité acoustique de l'infrastructure ferroviaire

Baldrik Faure, Claire Chaufour

SNCF, Dir. Innovation & Recherche
1/3, avenue François Mitterrand
93212 La Plaine Saint Denis CEDEX

Olivier Chiello, Anna-Rita Tufano, Marie-Agnès Pallas

Université de Lyon, IFSTTAR, CEREMA, UMRAE,
69675 Lyon

Nicolas Vincent, Emanuel Reynaud

Vibratec
28, chemin du petit bois
BP 36
69131 Ecully CEDEX
E-mail : emanuel.reynaud@vibratec.fr

Résumé

Pour les riverains des infrastructures ferroviaires, les émissions acoustiques constituent une préoccupation de premier plan. Parmi les sources incriminées, le bruit de roulement est prépondérant pour une large gamme de vitesses d'exploitation. Pour ce qui est de l'infrastructure, le niveau de bruit de roulement est principalement déterminé par deux paramètres : la rugosité des rails et le taux de décroissance des ondes vibratoires de la voie (TDR). Le projet MEEQUAI (MEsure Embarquée de la QUalité Acoustique de l'Infrastructure) vise à développer un système de mesure de la rugosité des rails et du taux de décroissance à l'aide de microphones et d'accéléromètres embarqués sur un train. Ce système a pour objectif principal d'améliorer la connaissance des données d'entrée pour la réalisation de cartographies acoustiques. Cependant, il ouvrira également de nouvelles opportunités pour le suivi dans le temps de la qualité acoustique des infrastructures ferroviaires ainsi que pour la maintenance des points singuliers tels que les joints de rail et les appareils de voie.

Dans cet article, les mécanismes de génération du bruit de roulement sont présentés, notamment à travers le rôle de la rugosité et du taux de décroissance. Les principaux systèmes de mesure de ces paramètres sont passés en revue et les limites des méthodes indirectes examinées. Enfin, les résultats des premières études numériques et expérimentales réalisées dans le projet sont exposés. Ils valident les premières briques de l'approche retenue dans MEEQUAI.

Abstract

The noise emissions are a major concern for residents living along railway lines. For a large range of conventional speeds, railway noise is dominated by rolling noise. The contribution of the track to rolling noise is mainly driven by the level of rail roughness and by the track decay rate (TDR). The MEEQUAI project (On-board measurement of the acoustic quality of the infrastructure) aims to develop a system capable of measuring the rail roughness and the TDR using acoustic and acceleration signals measured on-board. The main objective of this system is to provide better input data for the realisation of noise mappings. However, it will also bring opportunities in terms of acoustic monitoring of the tracks over long time or in terms of track maintenance for specific and singular hotspots such as rail joints or switch and crossings.

In this paper, the physical mechanisms responsible for rolling noise are presented, including the influence of both the track decay rate and the effective roughness. The main measurement systems of these parameters are reviewed and the limits of the indirect methods are highlighted. Finally, the results of the first numerical and experimental studies are showed and comfort the approach proposed within MEEQUAI.

C **ontexte**

Au cœur d'un environnement concurrentiel tendu, le transport ferroviaire dispose d'un atout majeur à travers ses faibles impacts environnementaux. Parmi ceux-ci les émissions acoustiques font l'objet d'une attention particulière, tant au niveau sociétal que législatif. Les ouvertures récentes des lignes à grande vitesse SEA (Sud-Est-Atlantique) et BPL (Bretagne-Pays de la Loire) ont ainsi été accompagnées de vives réactions de la part des riverains sur la question acoustique. Pour protéger la santé

des populations et répondre à leurs préoccupations sur la qualité de leur environnement acoustique, des règles nationales et internationales ont été établies et évoluent sans cesse. C'est le cas notamment de la directive européenne 2002/49/CE relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement [1]. Cette directive impose aux États Membres la réalisation de cartes stratégiques de bruit sous certaines conditions et la mise en place de plans de prévention en conséquence. Pour la prochaine échéance de réalisation de ces cartes en 2022, une méthode commune sera imposée aux États Membres : CNOSSOS-EU (Common NOise aSSessment methOdS) [2].

Une des particularités de cette méthode en ce qui concerne les transports ferroviaires est la nécessité de renseigner des données d'entrée propres à chaque type de source. En conséquence, le bruit de roulement aujourd'hui décrit par une puissance de source dans la méthode française, sera décrit par un ensemble de paramètres physiques et mécaniques caractéristiques de la voie et du matériel roulant. Parmi ceux-ci, la rugosité du rail et les taux de décroissance de la voie (TDR¹) sont des paramètres essentiels déterminant la contribution acoustique de la voie (cf. section « *Bruit de roulement et caractéristiques de la voie* », page 16). Ainsi, la pertinence et la représentativité des cartes réalisées à l'aide de la méthode CNOSSOS reposent sur la qualité des données d'entrées telles que la rugosité du rail et les taux de décroissance². La mesure de ces quantités se fait actuellement de façon locale et statique, nécessitant l'intervention d'équipes d'essai en voies pour plusieurs heures. Ces protocoles, bien que très précis, ne permettent pas le recueil de données sur de grands linéaires de voie et de façon régulière. Dans le cas où l'Etat Membre ne disposerait pas de données fidèles et mesurées, la méthode CNOSSOS [2] propose en Annexe G des valeurs tabulées pour les paramètres d'entrée du système, incluant donc la rugosité du rail et la fonction de transfert voie. Cependant, par lien de cause à effet, les niveaux de bruit de roulement obtenus à partir de ces valeurs peuvent varier de plusieurs dB par 1/3 d'octave selon les termes source utilisés. Cette variabilité compromet la représentativité des cartographies et conduit au risque que les plans de prévention qui en découlent soient inappropriés. Cette forte dépendance est illustrée Figure 1 dans le cas de la rugosité.

Projet MEEQUAL

Lancé en octobre 2017, le projet collaboratif MEEQUAL, piloté par Vibratec et regroupant l'IFSTTAR et SNCF Innovation et Recherche, a pour ambition de développer un prototype industriel de mesure embarquée de la rugosité du rail et des TDR. Le concept sur lequel repose le système MEEQUAL est la résolution d'un problème inverse de bruit de roulement (cf. section : « *Mesure indirecte des caractéristiques de la voie* » page 17) : estimer les caractéristiques acoustiques de la voie à partir de capteurs vibro-acoustiques sur le matériel roulant. Ce concept fait écho aux travaux de thèse de P.-E. Chartrain [3], déjà présentés dans Acoustique & Techniques [4].

Outre la collecte des données d'entrée pour la réalisation des cartes stratégiques de bruit, le système MEEQUAL devrait créer de nouvelles opportunités pour la maintenance et le suivi de la qualité acoustique des voies. L'atout majeur d'un système embarqué est tout d'abord la possibilité d'effectuer des mesures régulières sur de grands linéaires. Cela permettra à la fois de connaître les conditions d'exploitation qui influencent l'évolution de la qualité acoustique de l'infrastructure (trafic, armement de la voie) mais également de piloter plus efficacement les plans de protection contre le bruit ferroviaire. Un autre atout est la richesse de l'information recueillie. Les signaux enregistrés par les capteurs sont en effet influencés par d'autres éléments présents sur l'infrastructure, notamment les points singuliers comme les défauts de rail, les joints ou les appareils de voie (cf. Figure 2, page suivante).

1- TDR pour Track Decay Rate en anglais

2- Dans la méthode CNOSSOS les TDR sont inclus dans une quantité plus globale, la « fonction de transfert voie » qui tient également compte du rayonnement acoustique du rail et des traverses.

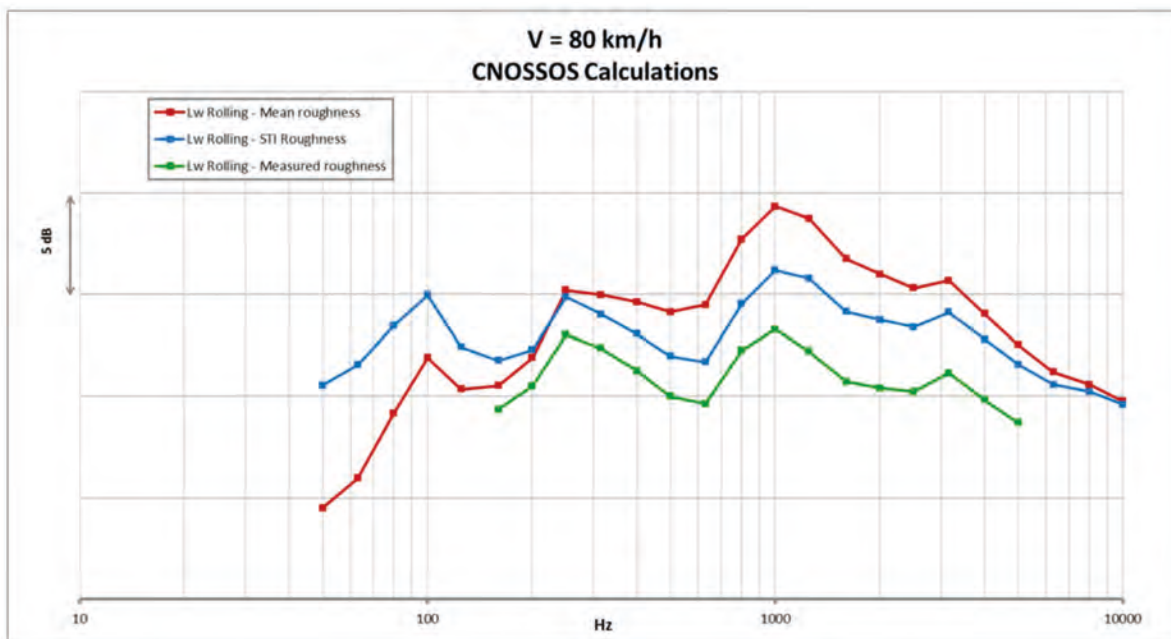


Fig. 1 : Spectres en puissance de la source « bruit de roulement » calculés selon la méthode CNOSSOS à l'aide des données tabulées de l'annexe G pour trois spectres de rugosité rail différents.
Source power spectrum for rolling noise estimated with the CNOSSOS method using tabulated data from Annex G and three different spectra for rail roughness.



Fig. 2 : Exemples de points singuliers source de bruit. Joint de rail éclissé (gauche). Défauts de type squat (centre). Cœur de croisement (droite).
Examples of singular points source of noise.

Or, l'état des points singuliers est un facteur critique du réseau faisant l'objet d'une maintenance fastidieuse et coûteuse. Grâce au développement de traitements de données adaptés, le système permettra de détecter, caractériser et suivre les points singuliers.

Bruit de roulement et caractéristiques de la voie

De nombreuses sources de bruit contribuent à l'émission acoustique au passage d'un véhicule ferroviaire. On peut notamment citer les bruits liés au contact roue/rail dont le bruit de roulement, les bruits des équipements tels que les moteurs (traction), compresseurs, ventilateurs et autres organes électriques, et les bruits aérodynamiques liés aux perturbations de l'écoulement de l'air autour du train. La contribution de chacune de ces sources au bruit global dépend de la vitesse mais pour une large gamme de vitesses d'exploitation, c'est le bruit de roulement qui constitue la source principale. Il dépend fortement des caractéristiques de la voie circulée, au niveau de l'excitation et du rendement vibro-acoustique [5].

Excitation par la rugosité

Le bruit de roulement est généré au niveau du contact roue/rail par les irrégularités verticales des surfaces de contact appelées rugosités, caractérisées par leur contenu spectral dans le domaine des longueurs d'onde λ . La superposition des irrégularités roue et rail constitue la rugosité combinée. Elle peut être déterminée sous l'hypothèse de décorrélation entre les défauts roue et rail. Lors du roulement, cette rugosité combinée induit un déplacement relatif imposé macroscopique entre la roue et le rail : la rugosité effective. La relation entre la rugosité combinée et la rugosité effective est liée aux phénomènes intervenant dans la zone de contact roue/rail et peut être représentée par un filtre fréquentiel. Dans le repère mobile se déplaçant à la vitesse de roulement V , le contenu fréquentiel de la rugosité $r_{eff}(f)$ peut ainsi directement se déduire du contenu spectral de la rugosité $r_{eff}(\lambda)$ à partir du changement de variable $f = V/\lambda$. La rugosité « acoustique » correspond à la partie du spectre de rugosité générant des vibrations dans le domaine audible, soit à des longueurs d'onde de 3 mm à 40 cm environ, avec des amplitudes allant de 0,1 à 50 μm .

Vibrations roue et voie

À une fréquence donnée, la rugosité combinée effective $r_{eff}(f)$ induit des vibrations au contact qui résultent d'une interaction entre la roue et le rail. D'un point de vue qualitatif, c'est la structure la plus souple qui va se déformer le plus sous l'effet de la rugosité (roue, rail ou contact selon la bande de fréquence). La propagation des vibrations dans la roue est généralement décrite à l'aide d'une approche modale, les roues monoblocs classiques vibrant sur une trentaine de modes dans la bande 100-5 000 Hz, avec des résonances faiblement amorties à partir de 1 500 Hz. Les vibrations de la voie sont plutôt analysées à l'aide d'une approche ondulatoire. Les ondes vibratoires principales se propageant dans le rail sont des ondes de flexion verticales et latérales. Chaque onde est caractérisée par une constante d'atténuation β indiquant l'atténuation de l'amplitude efficace des vibrations en $e^{-\beta|x|}$ en fonction de la distance x par rapport au point d'excitation. En terme de niveau vibratoire, cette constante peut être convertie en un taux de décroissance $\text{TDR} = 8,686 \beta$ en dB/m.

Rayonnement roue et voie

Le bruit émis est lié au rayonnement acoustique de la roue et de la voie qui peut être appréhendé en première approche à l'aide de facteurs de rayonnement. Les modes de roue résonnent dans leur zone de fort rayonnement (facteur de rayonnement proche de 1). La puissance acoustique rayonnée par la roue dépend donc principalement des vibrations au point de contact, des déformées modales et de la surface de la roue. En ce qui concerne le rail en vibrations verticales ou latérales, la puissance rayonnée W_R est donnée par :

$$W_R = \rho_0 c \sigma h_{eq} \int_{-\infty}^{\infty} |v_R|^2 e^{-2\beta|x|} dx = \rho_0 c \sigma h_{eq} |v_R|^2 \frac{8,686}{\text{TDR}} \quad (1)$$

où σ est le facteur de rayonnement du rail, h_{eq} est la hauteur équivalente de rayonnement tandis que ρ_0 et c sont respectivement la masse volumique et la vitesse du son dans l'air. Cette puissance est ainsi directement fonction de la vibration du rail au point de contact v_R (excitation par la rugosité effective r_{eff}) et du TDR (propagation vibratoire).



Fig. 3 : Mesure directe de TDR vertical selon EN 15461 (gauche). Mesure directe de rugosité rail selon EN 15610 ; règle de mesure fixe (centre) et chariot mobile (droite)
 Direct measurement of vertical TDR according to EN 15461 (left). Direct measurement of rail roughness according to EN 15610; using a ruler (centre) and a trolley (right)

Mesure directe des caractéristiques de la voie

Les mesures directes bénéficient d'un cadre normatif dans la réglementation européenne. Le mesurage du TDR selon la norme EN 15461 consiste à estimer l'atténuation des ondes vibratoires verticales et latérales le long du rail à l'aide d'un accéléromètre fixe et d'une excitation au marteau d'impact mobile (cf. Figure 3 gauche). Le mesurage de la rugosité selon la norme EN 15610 consiste à estimer les irrégularités verticales des deux files de rail à l'aide de règles de mesure fixes (cf. Figure 3 centre) ou de chariots mobiles (cf. Figure 3 droite).

Ces mesures sont fastidieuses et coûteuses car elles nécessitent l'intervention en voie de personnel qualifié ainsi qu'une interruption de trafic pour plusieurs heures. Il n'est pas réaliste d'envisager de telles mesures pour la réalisation des cartes stratégiques de bruit. Ces dernières sont en effet requises pour l'ensemble des agglomérations de plus de 100 000 habitants, ce qui correspond à un grand linéaire de voie.

Mesure indirecte des caractéristiques de la voie

Contrairement aux mesures directes pour lesquelles les capteurs sont appliqués directement sur la surface du rail, les mesures indirectes s'intéressent à des grandeurs qui résultent de l'interaction roue/rail, comme le bruit ou les vibrations des boîtes d'essieux ou du rail, et desquelles la rugosité combinée effective et/ou les TDR sont déduits (cf. Figure 4).

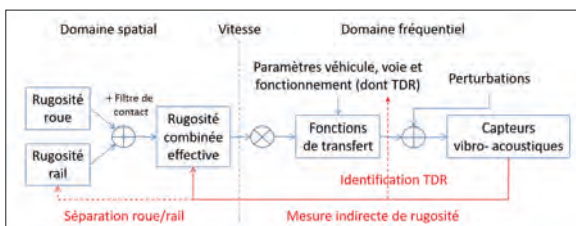


Fig. 4 : Principe de la mesure indirecte de rugosité et de TDR
 Principle of the indirect measurement of rail roughness and TDR

Les mesures indirectes sont effectuées dans le domaine temporel lors du passage d'un véhicule sur la voie, soit à poste fixe (mesures au passage), soit sur le véhicule lui-

même (mesures embarquées). Les mesures embarquées permettent notamment de qualifier des grandes longueurs de voie sans contraintes fortes sur le trafic. C'est le principe retenu dans le projet MEEQUAL.

Analyse des systèmes de mesure embarquée existants

Lecture de rugosité à partir d'accéléromètres sur boîte d'essieu

La mesure d'irrégularités de surface des rails à partir des vibrations de boîte d'essieu a été proposée et utilisée dès les années 80 par *British Rail Research* [6]. L'idée générale est d'estimer la rugosité combinée effective $r_{eff}(f)$ à partir des accélérations $\Gamma_{B,E}(f)$ sur la boîte d'essieu. Pour une file de rail, l'estimation s'effectue simplement par :

$$|r_{eff}|^2 = |H_{r-B,E}|^2 |\Gamma_{B,E}|^2 \quad (2)$$

où $H_{r-B,E}(f)$ est la fonction de transfert rugosité/boîte d'essieu en accélération.

La méthode est utilisée dans le système développé par le département technique du gestionnaire public du réseau ferroviaire Suédois Banverket (TRC « Strix ») [7] mais aussi dans le système « *High Speed Rail Corrugation Analyser* » (HSRCA) de la société RailMeasurement, utilisé en Australie et testé dans le projet LECV [8]. Les conditions de validité de la méthode ont également été étudiées sur le métro de Londres (projet TRANRED) [9]. Une technique similaire a été proposée pour le suivi de l'état de surface des rails SNCF dans le projet MONA [10]. Enfin, quelques éléments sont disponibles concernant l'implémentation et le test de la méthode par la société VUKV sur le réseau tchèque [11].

Lecture de rugosité à partir de microphones embarqués

La mesure des irrégularités de surface des rails à partir de microphones embarqués sur les véhicules est également assez répandue. Les premiers systèmes développés conduisent à une qualification de l'état de surface des rails par comparaison des niveaux de bruits globaux mesurés avec des valeurs gabarit. Ils ne permettent pas d'estimer un spectre de rugosité spatial.

C'est notamment le cas pour le système ABN (*AxleBox Noise measuring device*) développé par le Département de mécanique de l'Université de Florence [12], celui proposé dans le cadre du projet MONA [10], le système NoiseMon (*Noise Monitoring*) développé par AEA Technology (aujourd'hui Resonate Group) pour le réseau britannique [13] ou le système SMT (*Specially Monitored Track*) développé et installé par Deutsche Bahn (DB) sur la rame *Schallmesswagen* (SMW) [14].

Plus récemment, plusieurs équipes ont proposé l'utilisation de fonctions de transfert pour estimer la rugosité combinée effective $r_{eff}(f)$ à partir de la pression $p(f)$ mesurée par des microphones embarqués :

$$|r_{eff}|^2 = |H_{r-p}|^2 |p|^2 \quad (3)$$

où $H_{r-p}(f)$ est la fonction de transfert rugosité/pression acoustique.

Par rapport aux systèmes de qualification globale, la différence principale est la correction spectrale. Les systèmes existants se distinguent par le nombre et l'emplacement des microphones ainsi que par la manière d'estimer la fonction de transfert (expérimentalement ou par calcul). On peut citer notamment le système ARRoW (*Acoustic Rail-Influence Recording on Wheels*) proposé par la société M+P Consulting (groupe Müller-BBM) [15], la méthode LECAV proposée par SNCF mais non testée en roulage [3], le système développé dans le projet *Quiet Track* par la société Tyréns et installé sur le métro de Stockholm [16], le système belge développé par la société Infrabel et installé depuis 2011 sur l'engin de mesure EM130 et le système développé par la société SWECO pour les chemins de fer danois.

Autres méthodes de lecture de rugosité en embarqué

D'autres types de mesure ont été envisagés pour la lecture de rugosité en embarqué, parmi lesquelles les méthodes optiques [17], celles utilisant des capteurs à courants de Foucault ou des jauges de contraintes fixées sur les roues. Toutefois, ces méthodes semblent délicates à intégrer sur des véhicules circulant dans les conditions d'exploitation habituelles.

Limites des systèmes existants et pistes d'amélioration

Les méthodes indirectes utilisant des capteurs vibro-acoustiques et des fonctions de transfert offrent des performances encourageantes vis-à-vis des objectifs affichés par MEEQUAI. Le tableau 1 synthétise les différentes méthodes qui se distinguent par le type et l'emplacement des capteurs utilisés et la bande de fréquence dans laquelle elles sont théoriquement valides. Ces méthodes souffrent toutefois d'un certain nombre de limitations.

La première limitation concerne les domaines fréquentiels de validité. Une optimisation de l'emplacement des capteurs est possible mais une solution avantageuse est de combiner différents capteurs comme proposé par exemple dans la méthode LECAV [3].

La deuxième limitation est liée à la précision des fonctions de transfert, qui pour la plupart sont déterminées expérimentalement lors d'une étape de calibration.

Gamme de fréquence	Capteur	Système ou méthode
100 – 600/1000 Hz	Accéléromètres sur boîtes d'essieu	TRC Strix, HSRCA, TRANRED
500/1000 – 1500 Hz	Microphone en champ proche rail	LECAV
500/1000 – 5000 Hz	Microphone sous bogie	MONA, Quiet Track
1500 – 5000 Hz	Microphone en champ proche roue	ARRoW, LECAV, SWECO

Tabl. 1: Synthèse des méthodes de lecture de rugosité en embarqué avec fonction de transfert
Review of on-board indirect measurement methods for roughness using a transfer function

Cette calibration est insuffisante pour rendre compte des variations de la fonction de transfert lorsque certains paramètres s'éloignent trop de la configuration de référence [8] [15], en particulier les paramètres contrôlant le comportement dynamique de la voie (types de traverse ou de semelle sous rail) et les paramètres cinématiques tels que la vitesse de roulement ou la position du point de contact. Une méthode combinant modélisation et recalage expérimental est nécessaire si l'on souhaite optimiser l'emplacement des capteurs et paramétrer les fonctions de transfert.

D'autres limitations, comme celles liées aux perturbations acoustiques et vibratoires ou aux couplages vibro-acoustiques entre les deux files de rail sont également à examiner. Dans cette optique, l'utilisation simultanée de signaux provenant de plusieurs capteurs dans le cadre d'une analyse de type méthode inverse est notamment envisagée.

Lecture du comportement dynamique de la voie en embarqué

Un autre objectif du projet MEEQUAI concerne la mesure indirecte embarquée du comportement dynamique des voies circulées. Cet objectif est lié à deux besoins distincts : (i) l'ajustement des fonctions de transfert utilisées pour la lecture de rugosité ; dans ce cas, l'identification ou le recalage des paramètres d'un modèle semble suffisant, (ii) la fourniture de données caractéristiques du rendement vibro-acoustique de la voie ; dans ce cas, le système doit fournir des TDR ou des fonctions de transfert vibro-acoustiques.

Le principe d'une mesure indirecte des caractéristiques dynamiques de voie à l'aide de mesures embarquées sur un véhicule est particulièrement novateur. Seules deux études ont été identifiées sur le sujet. Dans la méthode LECAV proposée par SNCF [3], des doublets de microphones en champ proche du rail sont utilisés pour identifier le comportement dynamique de la voie le plus proche parmi ceux correspondant à un certain nombre de gabarits de voie. Dans le projet *Quiet Track*, un taux de décroissance est estimé à l'aide des différences de niveaux entre microphones placés à proximité des roues et dans l'espace inter-bogies [18]. La première n'a pas été testée en roulage tandis que la seconde semble conduire à des résultats peu précis sur l'ensemble de la bande de fréquences.

Pour autant, plusieurs idées sont à retenir. L'utilisation de microphones en champ proche du rail semble la plus à même de rendre compte du comportement dynamique de la voie.

Par ailleurs, les signatures acoustiques relatives permettent une identification indépendante du niveau d'excitation. Enfin, l'identification d'un type de voie parmi un ensemble de gabarits de voie permet de disposer d'une méthode plus robuste. La principale difficulté est donc d'identifier le capteur ou la combinaison de capteurs sensible et fidèle à ces indicateurs. La méthode LECAV constitue un pas important dans cette direction et mérite d'être complétée et testée de manière plus approfondie.

Premiers résultats du projet MEEQUAL

Les premiers résultats du projet concernent le calcul par éléments finis (E.F.) de fonctions de transfert paramétrées pour l'estimation de la rugosité par les méthodes indirectes identifiées dans le tableau 1 et l'optimisation du placement des capteurs vibro-acoustiques. Le cas des capteurs sur boîtes d'essieu et en champ proche roue/rail est présenté.

Simulation de l'interaction roue/rail et variabilité des voies

Le calcul des fonctions de transfert nécessite en premier lieu de connaître les relations entre les rugosités effectives sur les deux files de rail et les efforts s'exerçant sur les structures au niveau des contacts. Ces relations peuvent être facilement dérivées à partir d'un schéma d'interaction roue-rail, comme celui proposé dans [5]. En imposant l'équilibre des forces et la continuité des déplacements à l'interface, on obtient une relation entre les efforts dynamiques au point de contact (vecteur F), et les rugosités effectives r_{eff} (vecteur R) :

$$\{F\} = [A]^{-1}\{R\} = ([A_R] + [A_C] + [A_W])^{-1}\{R\} \quad (4)$$

La matrice A est la somme des matrices de réceptance au point de contact, relatives au rail (A_R) à la roue (A_W), et à la raideur de contact (A_C); chacune de ces matrices peut contenir des termes de couplage entre différentes directions, et entre les deux rails et les deux roues. Dans nos travaux, uniquement les directions latérale et verticale sont prises en compte, ce qui conduit à un problème de taille 4x4.

Les termes des matrices A_W et A_R sont obtenus numériquement à l'aide de modèles E.F. de l'essieu et de la voie ; les termes de la matrice A_C sont calculés analytiquement sur la base de la théorie du contact de Hertz, dans laquelle les termes tangentiels de pseudo-glisement sont également pris en compte [5].

Différentes configurations de voie ont été modélisées par E.F., afin de disposer d'une base de données de réceptances du rail et de mettre en évidence la variabilité liée aux différentes architectures. Cette analyse permet de prendre en compte des variabilités de pose (voie sur ballast, pose directe), de caractéristiques dynamiques des semelles sous rail (raideur et amortissement), de profils de rail, de configurations de traverse (béton ou bois, monobloc ou bi-bloc). L'analyse a permis de statuer sur l'influence de certains paramètres sur la réponse dynamique de la voie : la raideur des semelles, la masse de la traverse (béton ou bois), et la pose de voie, sont les paramètres qui influencent le plus la réceptance du rail, surtout en direction verticale. Au contraire, le profil de rail, et l'amortissement des semelles ont peu d'influence sur le comportement dynamique.

Simulation des transferts rugosité/vibrations boîte d'essieu

Les accélérations au niveau des boîtes d'essieu peuvent être calculées à partir des fonctions de transfert entre point de contact et boîte d'essieu (matrice B_W) et de la force de contact. Une relation entre les rugosités et les accélérations sur boîtes d'essieu est ainsi obtenue :

$$\{\Gamma_{B.E.}\} = [B_W]\{F\} = [B_W][A]^{-1}\{R\} \quad (5)$$

La matrice A_N est construite à partir de calculs E.F. sur l'essieu, les mêmes qui fournissent les termes de la matrice B_N . Les équations ici présentées ont été transcrites dans un code Matlab®, qui a la structure de la figure 5. Les blocs en bleu concernent des calculs E.F. externes au code de calcul, tandis que les blocs en vert sont des routines du code.

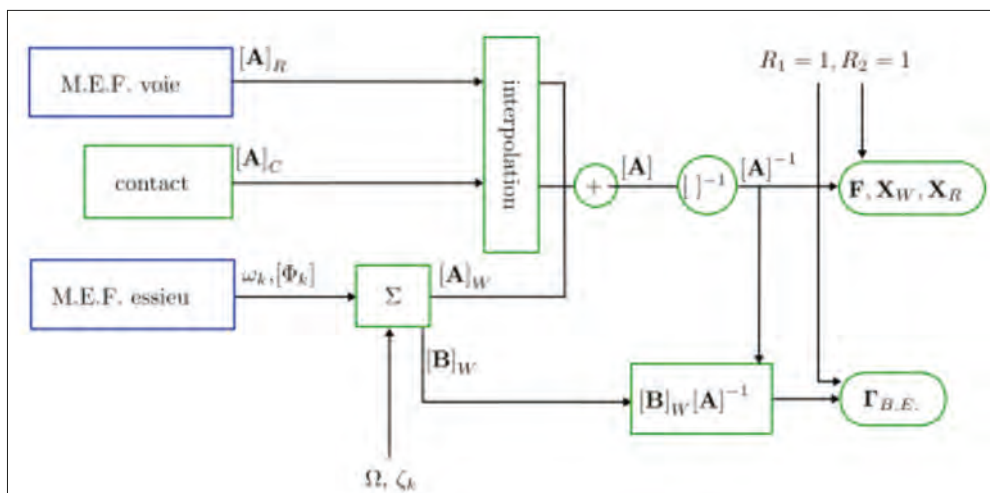


Fig 5 : Schéma du code de calcul
Code schematics

L'essieu choisi pour tester la méthode appartient à une voiture SNCF Corail. Une campagne d'analyse modale expérimentale a été réalisée sur l'essieu, pour recalibrer le modèle E.F. dans la gamme 50-2000 Hz. Afin de mieux caractériser le comportement des roulements de la boîte d'essieu, deux configurations expérimentales ont été envisagées: essieu seul sans contact avec la voie et essieu en contact avec la voie, chargée via ses suspensions primaires. Le recalage du comportement des boîtes s'est avéré trop exigeant vis-à-vis des données disponibles. Il a été donc décidé d'utiliser les transferts B_W mesurés, dans le contexte de la méthode de lecture de rugosité. Pour la suite, et pour d'autres modèles d'essieu pour lesquels une modélisation plus précise serait possible, on pourra utiliser les transferts issus du calcul, qui offrent un avantage en termes de temps par rapport aux mesures. On envisage donc une méthode hybride calcul/mesure, en fonction de la disponibilité de données sur l'essieu considéré. Concernant la réceptance ponctuelle au point de contact de l'essieu (A_W), il est possible d'utiliser les valeurs issues du calcul.

La figure 6 présente le résultat d'un calcul effectué à l'aide de ce code, en termes d'accélération pour une rugosité unitaire sur une file de rail; les différences entre approches hybrides calcul/mesure, sont mises en évidence.

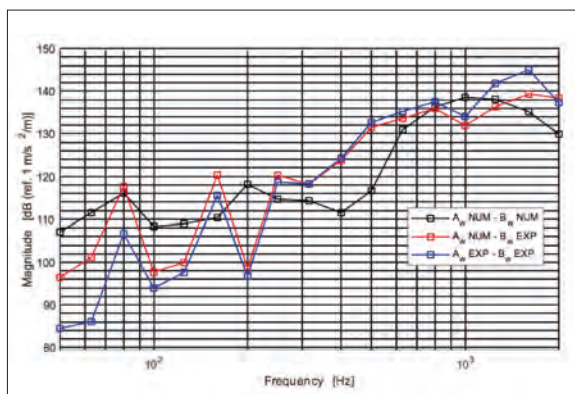


Fig. 6 : Transfert accélération/rugosité; trait noir : B_W et A_W calculées, trait rouge : A_W calculée B_W mesurée, trait bleu : B_W et A_W mesurées
Accélération/roughness transfert; black : B_W and A_W numerical, red : A_W numerical B_W experimental, blue : B_W and A_W experimental

Simulation des transferts rugosité/pression en champ proche roue et rail

Les champs acoustiques autour d'une roue et d'une voie isolées ont été calculés à l'aide d'un logiciel E.F. qui permet de résoudre un problème de rayonnement. Pour chacun de ces systèmes, un couplage faible fluide-structure est considéré. La condition aux limites acoustique est imposée en termes de champ de déplacement sur la surface de la structure ; ce champ de déplacement est issu de calculs E.F. structurels, réalisés à l'aide des modèles décrits aux paragraphes précédents, pour une excitation correspondant à un effort unitaire vertical au point de contact roue-rail. Le maillage acoustique E.F.

est adapté à la fréquence d'analyse : différents maillages sont utilisés pour différentes plages de fréquences, et pour chaque maillage, la taille du domaine ainsi que la taille de maille sont dimensionnées sur la longueur d'onde. Un baffle est présent dans le domaine, afin de simuler la présence du ballast ; les caractéristiques d'absorption du ballast sont prises en compte en appliquant une condition aux limites de type admittance sur le plan de baffle, issue de modèles analytiques.

Pour le rayonnement de la roue, on se focalise sur les fréquences de résonance jusqu'à 5 000 Hz, et en particulier sur les modes R_n (radial à n diamètres nodaux) et $1_{L,n}$ (axial à 1 cercle nodal et n diamètres nodaux), qui contribuent majoritairement au bruit de roulement. Le champ lointain est simulé par des éléments infinis. Le calcul permet d'obtenir le champ de pression aux fréquences de résonance de la roue ; à titre d'exemple, la figure 7 montre le champ de pression à la fréquence de résonance du mode R_2 (contribution la plus importante au bruit de roulement). La tendance générale est à avoir un champ de plus en plus complexe et directif, au fur et à mesure que la fréquence augmente, en raison de recombinaisons de plusieurs ondes, qui engendrent de nombreuses franges d'interférence. Le champ de pression est en général plus homogène aux fréquences de résonance des modes radiaux qu'à celles des modes axiaux. La présence d'un baffle complexifie largement le champ de pression autour de la roue, même en champ proche.

Une position optimale pour un capteur microphonique a été identifiée, sur la base de deux critères concernant l'impédance de rayonnement en champ proche $Z' = \rho/\rho_0 c_0 V_n$:

- Z' stable le long d'une génératrice ; cela donne plus de souplesse vis-à-vis de la précision de positionnement du microphone. Ce critère est prioritaire.
- $|Z'|$ proche de 1 ; cela permet d'éviter le calibrage acoustique dans la méthode inverse.

Toutefois, cette simulation ne prend pas en compte la présence de nombre de surfaces à proximité de la roue, qui perturbent le champ (essieu, suspension primaire, fond de caisse). Pour cette raison, une analyse plus approfondie qui intègre ces éléments dans le champ de la roue est à effectuer, pour tirer des conclusions plus pertinentes sur la position optimale du microphone pour l'application de la méthode MEEQUAI.

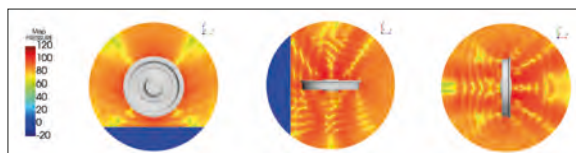


Fig. 7 : Champ de pression autour de la roue à la fréquence 1 646 Hz (mode R2 de la roue)
Pressure field around the wheel at 1646 Hz (wheel mode R2)

Concernant le rayonnement de la voie, l'analyse a été faite sur dix fréquences dans la bande [0 – 2 000 Hz]. Le champ lointain est simulé par une couche absorbante parfaitement adaptée (PML), ce qui est plus avantageux en termes de temps de calcul, dans ce cas de figure, par rapport à une simulation par éléments infinis.

Le modèle représentant la voie comprend huit traverses ; cette taille de modèle est le meilleur compromis entre une représentation fiable du champ proche (surtout en direction longitudinale), et des temps de calcul qui, pour ce type de structure, peuvent devenir trop importants pour des hautes fréquences.

À titre d'exemple, la figure 8 montre le champ de pression autour de la voie, à la fréquence 900 Hz. Le rail sur lequel la force de contact est appliquée est celui de gauche, et on voit bien que c'est le rail excité qui rayonne majoritairement. La fréquence 900 Hz étant proche de la « *pinned-pinned frequency* » [5], le champ est assez stationnaire en direction longitudinale.

Sur la base des critères mentionnés ci-dessus, une position optimale pour le capteur microphonique sera identifiée; les mêmes réserves faites pour la roue, concernant l'influence d'autres éléments d'architecture, s'appliquent ici.

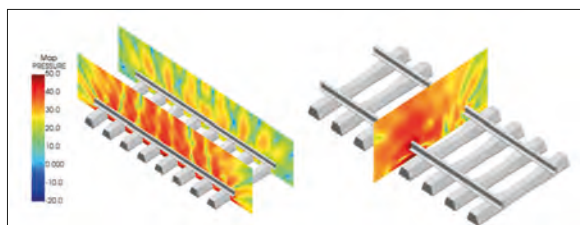


Fig. 8 : Champ de pression autour de la voie à la fréquence 900 Hz. *Pressure field around the track, at 900 Hz.*

Conclusion

La mesure embarquée de la qualité acoustique des voies ferroviaires est aujourd'hui nécessaire pour qualifier les réseaux à grande échelle. L'enjeu concerne non seulement l'alimentation des modèles de prévision pour les cartographies de bruits stratégiques, mais aussi l'optimisation de la maintenance. L'état de l'art sur le sujet montre qu'une mesure indirecte de la rugosité des rails et des caractéristiques dynamiques de la voie à partir de capteurs vibro-acoustiques embarqués semble possible mais qu'un certain nombre d'améliorations doivent être apportées aux méthodes existantes, en particulier dans l'estimation des fonctions de transferts entre les quantités à mesurer et les signaux délivrés par les capteurs. Le projet MEEQUAL se propose de combiner calcul et mesure pour optimiser l'estimation des transferts et l'emplacement des capteurs tout en prenant en compte la variabilité des poses de voie. Dans cette première phase du projet, des simulations par éléments finis des transferts entre rugosité et accélération sur boîtes d'essieu ainsi qu'entre rugosité et pression en champ proche roue et rail ont été réalisées. Le calcul des transferts entre rugosité et pression dans la cavité bogie sont en cours. Les prochaines étapes concernent la validation de ces transferts sur un matériel à poste fixe puis le développement et le test des méthodes inverses en roulage.

Remerciements

Le projet MEEQUAL a été sélectionné dans le cadre de l'appel à projet FUI-AAP23 du Fond Unique Interministériel (FUI). Il est subventionné par la Banque Publique d'Investissement (BPI France) et la région AURA via le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER - ce projet est cofinancé par l'Union Européenne).

Ce travail a été réalisé au sein du Labex CeLya (ANR-10-LABX-0060) de l'Université de Lyon, dans le cadre du programme "Investissements d'Avenir" (ANR-16-IDEX-0005) géré par l'Agence nationale de recherche (ANR).

Références bibliographiques

- [1] Directive 2002/49/CE du Parlement européen et du Conseil du 25 juin 2002 relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement, 2002. <http://data.europa.eu/eli/dir/2002/49/oj/fra>.
- [2] Directive (UE) 2015/996 de la Commission du 19 mai 2015 établissant des méthodes communes d'évaluation du bruit conformément à la directive 2002/49/CE du Parlement européen et du Conseil, 2015. <http://data.europa.eu/eli/dir/2015/996/oj/fra>.
- [3] P.-E. Chartrain, Lecture acoustique de la voie ferrée, Thèse de doctorat, Aix-Marseille, 2013. <http://www.theses.fr/2013AIXM4748>.
- [4] P.-E. Chartrain, E. Bongini, P.-O. Mattei, Evaluation expérimentale de la force d'interaction roue/rail partir du bruit de roulement, *Acoustique & Techniques*. 69 (2012) 10–15.
- [5] D.J. Thompson, *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*, Elsevier, 2009.
- [6] R.B. Lewis, A.W. Richards, A new method for the routine measurement of rail-head corrugations, *Rail International*. 17 (1986) 37–41. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=276022>.
- [7] J. Spannari, A new approach of assessing rail roughness, in: 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring, Derby, UK, 2008. doi:10.1049/ic:20080322.
- [8] E. Bongini, S.L. Grassie, M.J. Saxon, 'Noise Mapping' of a Railway Network: Validation and Use of a System Based on Measurement of Axlebox Vibration, in: *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, Springer, Tokyo, 2012: pp. 505–513. doi:10.1007/978-4-431-53927-8_60.
- [9] N. Vincent, E. Augis, Technical support for the TRANRED Project (final report), Vibratéc, Ecully, France, 1999.
- [10] N. Vincent, P. Bouvet, P. Balthazard, Aide à la conception d'un chaire des charges pour une chaîne de mesure acoustique du bruit de roulement - Projet MONA, Vibratéc, Ecully, France, 1995.
- [11] L. Phamová, P. Bauer, J. Malinský, M. Richter, Indirect Method of Rail Roughness Measurement – VUKV Implementation and Initial Results, in: *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2015: pp. 189–196. doi:10.1007/978-3-662-44832-8_25.
- [12] A. Bracciali, L. Ciuffi, R. Ciuffi, P. Rissone, Continuous External Train Noise Measurements Through an On-Board Device, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 208 (1994) 23–31. doi:10.1243/PIME_PROC_1994_208_230_02.
- [13] A.E.J. Hardy, R.R.K. Jones, S. Turner, The influence of real-world rail-head roughness on railway noise prediction, *Journal of Sound and Vibration*. 293 (2006) 965–974. doi:10.1016/j.jsv.2005.12.019.
- [14] B. Asmussen, H. Onnich, R. Strube, L.M. Greven, S. Schröder, K. Jäger, K.G. Degen, Status and perspectives of the "Specially Monitored Track," *Journal of Sound and Vibration*. 293 (2006) 1070–1077. doi:10.1016/j.jsv.2005.08.066.
- [15] A.H.W.M. Kuijpers, W. Schwanen, E. Bongini, Indirect Rail Roughness Measurement: The ARROW System within the LECAV Project, in: *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, Springer, Tokyo, 2012: pp. 563–570. doi:10.1007/978-4-431-53927-8_67.
- [16] M. Höjer, M. Almgren, Monitoring system for track roughness, in: *Proceedings of EuroNoise 2015*, Maastricht, The Netherlands, 2015. <http://www.conforg.fr/euronoise2015/proceedings/data/articles/000169.pdf>.
- [17] F. Fidicaro, G. Licitra, A. Bertolini, E. Maccioni, M. Paviotti, Interferometric rail roughness measurement at train operational speed, *Journal of Sound and Vibration*. 293 (2006) 856–864. doi:10.1016/j.jsv.2005.08.062.
- [18] M. Höjer, QUIET-TRACK - WP 1, Monitoring system for noise related track parameters and severe wear, (2016). http://www.quiet-track.eu/wp-content/uploads/2016/04/604891_WP01_TYRENS_2016-03-14-1.pdf.