

# Recherches menées à la SNCF pour la réduction du bruit aérodynamique des TGV

## Corinne Talotte,

SNCF, Direction de la recherche et de la technologie,  
Unité physique du système ferroviaire et confort,  
45, rue de Londres,  
75379 Paris CEDEX 08,  
e-mail : corinne.talotte@sncf.fr,

## Sylvie Guerrand,

SNCF, Direction de la recherche et de la technologie,  
Unité physique du système ferroviaire et confort,  
45, rue de Londres,  
75379 Paris CEDEX 08,  
e-mail : sylvie.guerrand@sncf.fr,

## Catherine Dine,

Agence d'essais ferroviaires,  
Section AEF-D2,  
21, avenue du Président Allende,  
94407 Vitry sur Seine CEDEX,  
e-mail : catherine.dine@sncf.fr

Les nuisances acoustiques induites par le trafic ferroviaire font partie des éléments à maîtriser pour la mise en projet de nouvelles lignes de chemin de fer. Aujourd'hui, compte tenu des progrès réalisés pour réduire le bruit de roulement, une réduction significative du bruit des TGV ne peut être envisagée sans réduction de la part de bruit aérodynamique, qui devient prépondérante au-delà de 300 km/h.

Les recherches menées auparavant en aéroacoustique dans d'autres secteurs avaient essentiellement couvert des applications comme les bruits de jet pour des écoulements supersoniques. Les problèmes types de l'aéroacoustique des véhicules terrestres tels que vitesse plus faible ou présence de géométrie complexe ne sont abordés que depuis plus récemment.

Autour d'un train roulant à grande vitesse se développe un écoulement turbulent complexe qui rencontre un certain nombre d'éléments structurels comme les bogies ou le pantographe. Le bruit dû aux écoulements autour du train peut être séparé en une part principale directement générée par l'écoulement sur des surfaces considérées comme rigides et autour de singularités, dont il sera question ici, et une part générée par l'action de l'écoulement sur la structure et dont la connaissance reste à approfondir.

Nous présentons dans cet article la démarche adoptée à la SNCF pour mener les recherches permettant de réduire le bruit aérodynamique des TGV.

- La première phase a consisté à bien identifier les sources de bruit lors d'essais en ligne et à l'aide de techniques d'antennerie spécifiquement développées.

- Un travail de fond a ensuite été effectué pour bien comprendre et caractériser ces sources (à l'aide d'études théoriques, expérimentales ou numériques).

- Des outils ont été développés pour modéliser de façon globale le bruit au passage des TGV à partir des sources caractérisées lors des études précédentes. L'utilisation de ce type d'outil, associée à une bonne connaissance des sources et des phénomènes physiques en jeu permettra d'envisager des pistes de solution.

- Des études prospectives sont également menées en parallèle pour mettre en œuvre des outils prédictifs de simulation numérique en aéroacoustique.

*Annoyance due to railway traffic noise is a very sensitive aspect concerning new high speed projects. Many studies have shown that aerodynamic noise becomes significant above 300 kph and can be predominant with the reduction of the rolling noise contribution. At the moment, for high speed trains, no further global reduction can be achieved if the aerodynamic noise is not reduced.*

*The objective of this paper is to present researches carried out at SNCF to reduce the aeroacoustic noise of TGV.*

*The first step of acoustic studies is to identify the different sources. We describe in this paper the different aeroacoustic phenomena representative of high speed trains and the technical ways carried out to characterise these phenomena. Specific tools have been developed from on line tests, wind tunnel experiments, theoretical studies or numerical simulations to characterise the different sources.*

*Methods of global modelling of a high speed train emission are also presented here. Finally, future development of new tools based on numerical simulation in aeroacoustics will be discussed.*

## Identification des sources aérodynamiques

La première étape qui a consisté à bien identifier les sources de bruit aérodynamique a été basée sur la réalisation de mesures par antennes microphoniques placées en bord de voie. Les méthodes d'antennerie acoustique sont classiquement utilisées, dans les souffleries par exemple. Cependant pour des applications en ligne, une méthode spécifique de traitement des mesures, prenant en compte l'effet Doppler introduit par la vitesse de circulation élevée des TGV, a dû être développée pour permettre une localisation et une première caractérisation des sources de bruit sur le train [1].

Pour ses besoins particuliers, la SNCF a aussi développé une antenne spécifique, plane en étoile, comme le montre la figure 1. Grâce au traitement des signaux enregistrés, les sources de bruit peuvent être localisées, caractérisées globalement en niveau et en fréquence et classées selon leur type (aérodynamique ou roulement). Des cartographies peuvent ainsi être obtenues pour différentes gammes de fréquences. La figure 2 montre un exemple de localisation des sources aérodynamiques sur la motrice dans une gamme de fréquence (80-350 Hz).

Le bruit généré par les différentes sources aérodynamiques ainsi identifiées peut être décomposé suivant deux types de phénomènes :

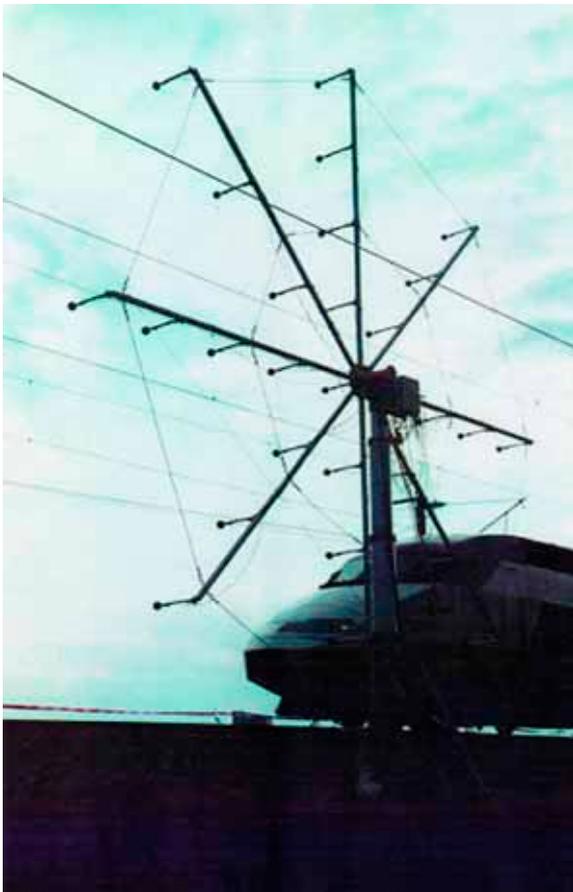


Fig. 1 : Mesures en ligne par antennerie acoustique

- Bruit généré par l'écoulement autour d'éléments structurels
  - lâcher tourbillonnaire à l'arrière du pantographe et de son équipement
  - cavités : cavité de pantographe, césures entre voitures, persiennes
  - bogies
  - ventilateurs

- Bruit généré par l'écoulement turbulent
  - couche limite turbulente sur les surfaces
  - séparation de couche limite sur le nez de la motrice avant
  - sillage turbulent de la motrice arrière

Les sources contribuant principalement au bruit aérodynamique sont, d'après les mesures réalisées, celles qui sont liées à la présence d'éléments structurels.

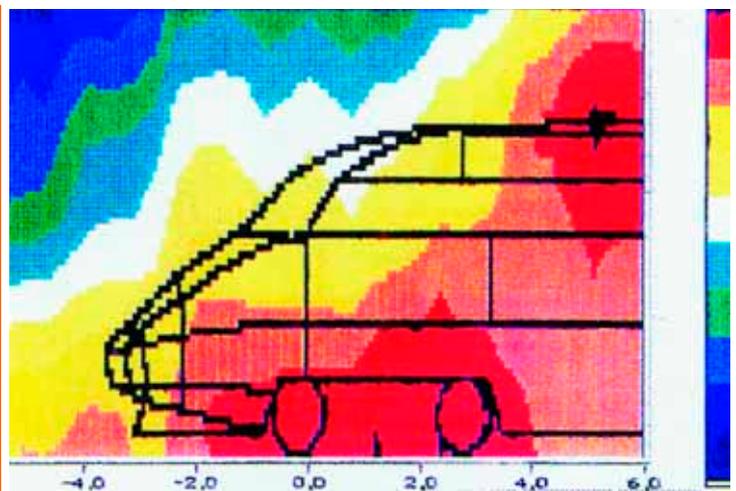


Fig. 2 : Localisation de sources aérodynamiques sur un TGV

## Caractérisation des sources à l'aide d'outils adaptés, solutions et limites

L'étape suivante a consisté à mieux caractériser les sources identifiées, et à comprendre les phénomènes physiques associés. Ceux-ci étant différents pour chaque type de source, des outils adaptés ont dû être utilisés. Ces études de caractérisation ont été réalisées notamment dans le cadre d'une coopération entre réseaux allemands et français DEUFRAKO (annexe "K2") et avec le concours de différents partenaires industriels ou universitaires. Des travaux en coopération avec ALSTOM (projet "ATREBAT" : Actions Technologiques pour la REduction du Bruit Aérodynamique des TGV), ont également permis d'améliorer notre compréhension des phénomènes physiques et d'envisager des pistes de solutions [2].

### Bruit généré par l'écoulement autour d'éléments structurels

#### *Lâcher tourbillonnaire à l'arrière du pantographe et de son équipement*

L'écoulement autour du pantographe est caractérisé par l'émission périodique de tourbillons à l'arrière des éléments structurels qui le composent (il peut être considéré comme

un assemblage de tubes). Ce phénomène peut être assimilé au cas, classique en mécanique des fluides, du lâcher tourbillonnaire à l'arrière de cylindres. Les fluctuations de force créées localement par cette émission tourbillonnaire à une fréquence déterminée vont générer un bruit dipolaire à la même fréquence. Le bruit aérodynamique dû au pantographe est donc caractérisé par des pics de fréquence très marqués et ce type de mécanisme peut être assez bien identifié en soufflerie où des concepts de solutions peuvent être testés. Une des solutions est d'agir directement sur le pantographe, soit en modifiant ses caractéristiques géométriques, ce qui n'est pas toujours aisé car il faut tenir compte des contraintes mécaniques et électriques, soit en ajoutant sur le pantographe des éléments pour décorréler le système tourbillonnaire (rugosités, éléments profilés...). Des gains significatifs (allant jusqu'à 5 dB (A)) ont ainsi pu être obtenus en soufflerie, mais on peut s'attendre à ce qu'ils soient moins importants dans la réalité du fait de l'interaction avec les autres sources. Une autre solution consiste à masquer le pantographe à l'aide de carénages, ce qui a le double effet de réduire l'écoulement en impact direct avec le pantographe, et d'avoir un effet écran. Des études pour ajouter ce type de carénages sur les TGV actuels n'ont cependant pas montré de potentiel intéressant.

#### Cavités

De nombreuses études théoriques et expérimentales ont été menées pour étudier les cavités placées dans un écoulement, historiquement pour des applications aéronautiques. Les phénomènes observés peuvent être classifiés en fonction des conditions de l'écoulement (nombres de Macs et de Reynolds) et pour différents rapports hauteur/longueur qui est le paramètre principal gouvernant le type de phénomène observé.

Dans la configuration de la cavité de pantographe, cavité longue et peu profonde, la couche de cisaillement se rattache au fond de la cavité et l'étude acoustique peut se décomposer en l'étude des deux marches indépendamment. Les essais en soufflerie permettent à la fois d'obtenir une bonne indication de la topologie de l'écoulement dans la cavité du pantographe [3], mais aussi de réaliser des mesures acoustiques et de tester des solutions, pour peu que la soufflerie soit anéchoïque et que les défauts de similitude induits par l'échelle des maquettes ne soient pas trop importants. Enfin, si l'étude détaillée de la cavité de pantographe en tant que telle est possible, la contrainte principale se situe au niveau de la prise en compte des éléments structurels (isolateurs, pantographe) qui la remplissent et qui imposent encore une approche globale dans les études.

Compte tenu de la géométrie particulière des césures qui peuvent être assimilées à des cavités profondes, les phénomènes acoustiques qui apparaissent sont proches des phénomènes de résonance et sont donc beaucoup plus marqués que les phénomènes dans la cavité de pantographe. Pour une bonne caractérisation des sources de bruit associées aux césures, il faut allier une analyse modale expérimentale de la cavité, avec une analyse modale par simulation puis une caractérisation des sources lors d'essais en ligne au moyen de sondes embarquées. Dans ce dernier cas, l'identification des

phénomènes d'écoulement cohérents dans la cavité (par calcul de cohérences entre signaux enregistrés sur plusieurs microphones placés en césure) et l'évaluation de spectres associés aux phénomènes générateurs de bruit (par calcul de cohérences entre une sonde protégée de la turbulence judicieusement placée et les microphones placés en césure) permettent de repérer les modes de cavités effectivement excités par l'écoulement [4].

#### Bogies

Les phénomènes aéroacoustiques apparaissant dans la zone bogie sont assez complexes. L'écoulement dans cette partie du train est particulièrement dynamique avec de nombreux phénomènes d'impact, d'éjection de fluide et de recirculation. Du fait de cette complexité, il paraît nécessaire de conduire l'étude de cette zone à l'aide de différents outils qui vont chacun apporter des connaissances sur différents aspects.

Une voie intéressante pour comprendre la complexité des écoulements est de réaliser des simulations numériques à l'aide d'un code résolvant les équations de Navier Stokes moyennées où la turbulence est modélisée à l'aide de modèles de type  $k-\epsilon$ . Le code de calcul (StarCD) a fait l'objet de nombreuses validations à la SNCF et permet d'obtenir, comme le montre la figure 3, des cartographies d'énergie cinétique turbulente dans des zones qui sont parfois difficilement accessibles par l'expérience.

Cette énergie cinétique turbulente peut être reliée qualitativement aux sources aéroacoustiques, mais l'interprétation aéroacoustique des résultats de ce type de simulation doit être faite avec un certain nombre de précautions. En effet, il faut garder à l'esprit que ce type de modélisation ne permet que d'obtenir une solution stationnaire et des données statistiques de la turbulence. Les zones de production d'énergie cinétique turbulente peuvent donc être analysées comme des zones de sources aéroacoustiques stationnaires qui peuvent être classées suivant leur niveau et leur étendue. Cette approche permet essentiellement de présélectionner différentes configurations de solutions potentielles, avant de les tester en soufflerie.

L'objectif d'essais en soufflerie, illustrés sur la figure 4 représentant une maquette de TGV testée dans le cadre d'ATREBAT dans la soufflerie anéchoïque de Cepra19, est alors de localiser les principales sources dans la zone bogie en incluant cette fois les sources instationnaires. Des études paramétriques ont permis d'évaluer le poids des différents éléments sur le niveau de bruit global et de qualifier des principes de solutions.

Différentes combinaisons de solutions ont ainsi été testées et des perspectives encourageantes ont pu être obtenues, comme le montre la figure 5 qui illustre une comparaison entre une configuration actuelle et une configuration avec des bogies optimisés permettant d'obtenir des gains en soufflerie d'environ 5 dB (A) [2]. Ce potentiel de réduction n'a pu être validé en ligne pour l'instant compte tenu des implications que telles solutions entraînent au niveau de la conception générale de la partie basse du train. De plus, la question de la mise en œuvre industrielle de ces concepts de solution reste à définir.

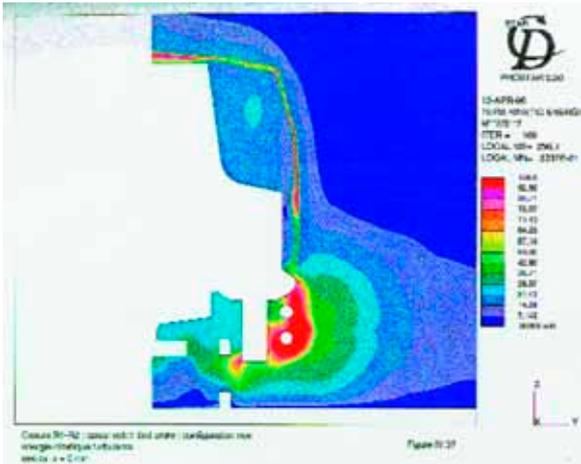


Fig. 3: Résultats de simulation numérique dans la zone bogie-césure intermédiaire



Fig. 4: Maquette de TGV au 1/7° dans la soufflerie anéchoïque Cepra19

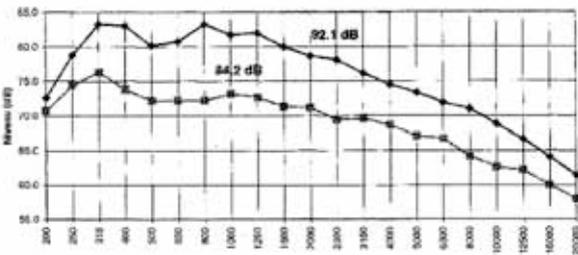


Fig. 5: Spectre de bruit des zones bogies, comparaison d'une configuration actuelle et d'une configuration optimisée en soufflerie



Fig. 6: Essais en ligne à l'aide de sondes embarquées

La connaissance du comportement aéroacoustique de la zone bogie obtenue au moyen de simulation numérique et d'essais en soufflerie a été complétée par une caractérisation en ligne.

La méthodologie développée dans le cadre du projet DEUFRAKO K2 et aussi mise en œuvre pour l'étude des césures, consiste à placer des capteurs phénoménologiques dans les zones sources qui ont pu être définies par les études en soufflerie par exemple, et de placer des sondes antiturbulence capable de filtrer la turbulence pour n'enregistrer que l'acoustique, comme le montre la figure 6 illustrant des mesures effectuées sur TGV [4].

Par le biais du calcul des corrélations entre les signaux mesurés par les capteurs phénoménologiques et les sondes antiturbulence, il est possible de déterminer le contenu spectral des sources de bruit se trouvant près des capteurs phénoménologiques. Cette méthode qui peut encore être améliorée (choix des capteurs et optimisation de leur position) est très prometteuse.

Ainsi, la caractérisation du bruit aérodynamique des zones bogies qui sont des sources majeures et sont associées à des phénomènes complexes ne peut être correctement effectuée à l'aide d'un seul type d'outil. Notre connaissance de cette source sur le TGV a pu être obtenue grâce à l'utilisation combinée d'outils numériques et expérimentaux, embarqués et en soufflerie.

#### Ventilateurs

Une autre source apparaissant au niveau des motrices est liée aux ventilateurs. Elle n'est pas prépondérante en ligne, mais peut causer des nuisances en gare, en zone de stationnement, ou à basse vitesse. Elle peut être caractérisée par des fréquences particulières et des solutions peuvent être trouvées en optimisant les ventilateurs eux-mêmes (vitesse de fonctionnement, géométrie des pales...).

#### Bruit généré par l'écoulement turbulent

##### Couche limite

Cette source aéroacoustique est la source minimale qu'il est impossible de supprimer car elle est due au développement de la couche limite sur les surfaces. Elle est entièrement masquée par les autres sources et reste donc difficile à caractériser d'autant que son domaine fréquentiel est étendu. Sa contribution apparaît aux très grandes vitesses, et des études menées sur le MAGLEV ont seulement jusqu'à présent permis d'obtenir une borne supérieure de sa contribution qui reste faible par rapport aux autres sources. Une solution serait de diminuer la rugosité des surfaces et de caréner les équipements en dessous de caisse notamment.

Par ailleurs, l'écoulement turbulent entraîne des fluctuations de pression qui peuvent exciter la structure des caisses et générer une source vibratoire pouvant être cause d'inconfort à l'intérieur des voitures. Les recherches sur la couche limite ont donc jusqu'ici plutôt porté sur la caractérisation et la modélisation des efforts qu'elle induit sur les caisses de TGV.

### Séparation de couche limite sur le nez de la motrice avant

Certaines études ont identifié qu'une source était localisée sur les motrices avant et pouvait être due à une séparation de la couche limite au niveau des variations de forme sur les nez. Cette source n'est pas prépondérante et peut être fortement diminuée ou supprimée en lissant les formes des nez des motrices ce qui est en général également une bonne solution pour améliorer les performances aérodynamiques et réduire les phénomènes d'ondes de pression en tunnel.

### Sillage turbulent de la motrice arrière

Les sillages turbulents des TGV peuvent également générer des sources aéroacoustiques supplémentaires, mais qui restent, comme pour les nez, beaucoup moins importantes que les autres sources citées précédemment. Ils peuvent être caractérisés à l'aide de mesures en soufflerie mais ce sont davantage les problèmes de traînée et de comportement dynamique, que les questions acoustiques, qui rendent leur maîtrise essentielle.

## Modélisation globale du bruit au passage des TGV à partir des sources connues

Un outil nommé MAT2S (Modélisation Acoustique des Trains par Superposition de Sources) a été récemment développé à la SNCF pour modéliser de façon globale le bruit au passage des TGV.

Les études de caractérisation précédemment évoquées ont permis d'établir des modèles pour chaque source précisant son spectre, sa directivité et son évolution avec la vitesse. MAT2S permet alors de constituer un train à l'aide

de ces modèles (intégrant également d'autres sources que les sources aérodynamiques) et de calculer l'émission sonore induite par son passage. Les calculs ont été comparés aux essais disponibles ; la figure 7 montre une comparaison de la signature d'un TGV obtenue à 7,5 m.

Ces travaux ont donc fait l'objet d'une première validation, mais les modèles de sources nécessitent encore d'être enrichis. L'utilisation de ce type d'outil associée à une bonne connaissance des sources et des phénomènes physiques en jeu permettront d'envisager des solutions et d'évaluer leur potentiel.

## Développement d'outils numériques prédictifs

Des modèles bidimensionnels du bruit aérodynamique généré dans des configurations génériques adaptées au ferroviaire ont été développés depuis 1993 à partir des données aérodynamiques issues de calculs  $k-\epsilon$  à l'aide de StarCD. Ces modèles sont basés sur l'application de l'analogie de Lighthill. Dans le cadre du projet SAMBA mené par la SNCF avec le concours de Framatome et de l'École centrale de Lyon, une configuration de train très simplifiée à l'aide de modèles de jet, de marches, de cavités et de sillage a été construite [5]. L'outil développé qui utilisait la seule méthode envisageable en 1993 a montré ses limites car il nécessite pour chaque cas le développement d'un modèle spécifique. L'extrapolation de ces modèles à des géométries plus complexes est délicate.

Actuellement, il est utilisé pour offrir une base de données qui permet de comparer les calculs effectués avec des méthodes nouvelles utilisant la Simulation des Grandes Echelles, plus connues sous le sigle anglais LES (Large Eddy Simulation), et qui peuvent aujourd'hui être envisagés

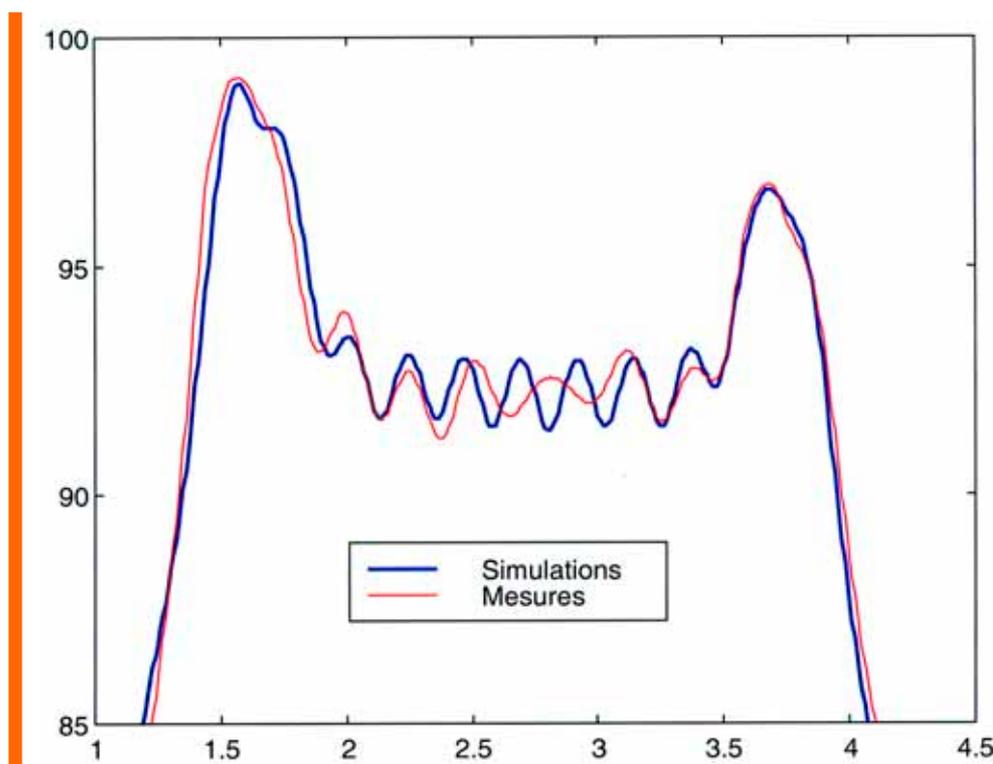


Fig. 7 : Signature d'un TGV-R à 7,5 m, comparaison d'une simulation MAT2S et d'une mesure au passage

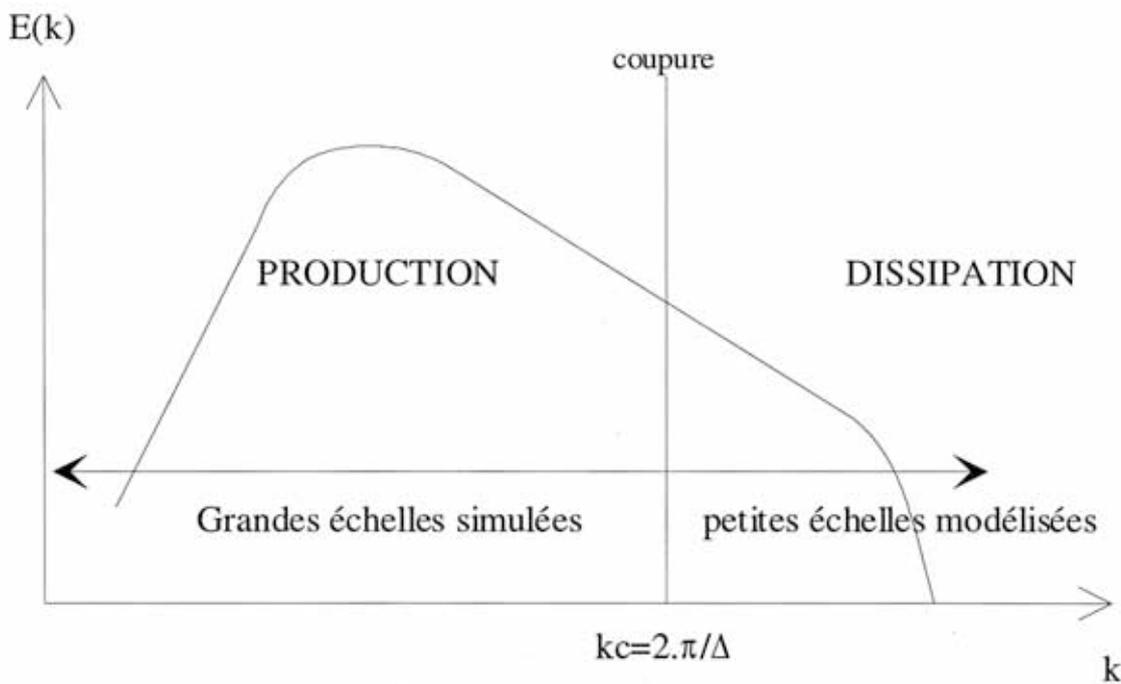


Fig. 8: Spectre d'énergie cinétique turbulente

compte tenu de l'augmentation des puissances des ordinateurs. En effet, pour une meilleure connaissance des phénomènes aéroacoustiques, il faut connaître les champs de vitesse et de pression fluctuantes ce qui peut être obtenu par la LES qui, de plus, s'affranchit de la détermination de modèles spécifiques à une géométrie donnée.

Le principe, comme illustré à la figure 8, est de décomposer les échelles de la turbulence entre celles qui vont être explicitement calculées, les "grandes" échelles qui sont les plus énergétiques, et donc principalement responsables de la génération de bruit, et celles qui vont être modélisées, les "petites" échelles dissipatives. La coupure entre les grandes échelles et les petites échelles est directement liée à la taille de la maille utilisée dans le calcul. Les termes sources aérodynamiques instationnaires issus de ce calcul LES sont alors implémentés dans les équations d'Euler qui permettent le calcul de la propagation acoustique. Ces méthodes sont limitées aujourd'hui à des cas simples, mais sont très prometteuses car leur limitation n'est due qu'aux capacités informatiques qui sont en perpétuelle évolution.

## Conclusion

Les premières études menées sur le bruit aérodynamique à la SNCF ont permis d'identifier et classer les différentes sources. Des études ont ensuite été menées pour caractériser les phénomènes spécifiques à chaque type de sources qui ont nécessité la mise en œuvre d'outils adaptés. L'état de l'art nous permet aujourd'hui d'avoir des ordres de grandeur du potentiel de réduction. Un outil de modélisation du bruit au passage d'un train, intégrant les

connaissances acquises sur les sources, a été développé et permettra, après complète validation, d'apporter une aide à la décision pour la mise en œuvre de solutions. Compte tenu de l'augmentation rapide des moyens de calcul, la simulation numérique à l'aide d'une approche couplée LES + Euler nous est apparue comme très prometteuse et de premiers résultats concrets devraient être obtenus dans le cours de l'année 2000.

## Références bibliographiques

- [1] Poisson F., Localisation et caractérisation de sources acoustiques en mouvement rapide, Thèse de doctorat, 1996
- [2] Grosjean O., Fages A., Tessier J.M., Bertrand C., Guccia L., Guerrand S., Réduction du bruit aérodynamique émis par un TGV roulant à plus de 300 km/h, World Congress on railway research, Florence, 1997
- [3] Noger C., Patrat J.C., Peube J., Peube J.L., Aeroacoustical study of the TGV pantograph recess. En cours de publication dans le JSV, déposé automne 1999
- [4] Fremion N., Vincent N., Robert G., Louisot S., Jacob M., Guerrand S., Aerodynamical noise radiated by the intercoach spacing on a high speed train. 6 th international workshop on railway noise, Les Embiez, novembre 1998
- [5] Jacob M., Gravois V., Louisot A., Juvé D., Guerrand S., Sound produced by a backward facing step under a wall jet, 4 th AIAA, Toulouse, juin 1998