

La forêt : “ Un écran anti-bruit météorologique ”.

2 ème partie : Campagne de mesures dans les Landes - Validation des méthodes de calcul

À Yannick Gabillet

Nicolas Barrière,

SNECMA Moteurs (Département d'Acoustique, Direction Technique)
Centre de Villaroche,
77550 Moissy-Cramayel,
e-mail : nicolas.barriere@sneema.fr

Jérôme Defrance,

CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)
24 rue Joseph Fourier,
38400 Saint-Martin-d'Hères,
e-mail : j.defrance@cstb.fr

Dans la première partie de cet article a été présentée une nouvelle méthode de calcul de l'effet de la forêt sur l'atténuation du bruit de trafic routier ou ferroviaire. Cette méthode [1] permet le calcul des différents effets qui agissent sur la propagation du bruit à la traversée de la forêt : l'effet de sol de type humus, l'effet de la diffusion par les troncs et l'effet de la stabilisation des conditions météorologiques à l'intérieur de la forêt. Cette méthode, appliquée au calcul des niveaux de bruit à proximité d'une voie routière, a montré que pour l'implantation d'une bande forestière type de 100 m de large en bord de voie, on obtient pour une situation météorologique caractéristique de la nuit, un gain de plusieurs dB (A) par rapport à la plaine. Une campagne de mesure in situ présentée dans cette partie a été réalisée afin de valider cette méthode de calcul et d'en déduire des règles sur le calcul de l'effet de la végétation sur le bruit de trafic.

In the first part of this article [1] has been presented a new calculation method for the attenuation of road traffic noise by forests. It allows the calculation of the different effects that influence sound along its propagation in forests : ground effect due to humus, trunk scattering effect and effect induced by the stabilisation of meteorological conditions within the forest. Being applied to the calculation of sound pressure level next to a road, it has shown that for a 100 m wide forest belt and night meteorological conditions, one can obtain an attenuation of several dB (A) referred to a plain field. Finally, in situ measurements have been carried out in the French Landes forest in order to validate the full model and to deduce calculation rules to predict the impact of tree-like vegetation on road traffic noise.



a protection contre le bruit des infrastructures de transport est un des points cruciaux dans les domaines routier et ferroviaire. Quelle que soit l'orientation des voies de circulation, les moyens de protection mis en œuvre doivent tenir compte des conditions météorologiques favorables à la propagation du bruit. Or les protections de type écrans ou merlons sont peu efficaces quand les conditions de propagation sont favorables, ceci en raison de la courbure des trajets sonores.

Une alternative ou un complément consiste à considérer les solutions naturelles permettant d'agir sur le milieu de propagation, d'une part en limitant les gradients de vitesse du son responsables de la courbure des trajets sonores, et d'autre part, en amenant une atténuation supplémentaire au cours de la propagation. La forêt est une solution répondant à ce double objectif.

Dans la première partie de cet article [1], une méthode de calcul a été présentée et appliquée au calcul des niveaux de bruit à proximité d'une voie routière pour une implantation d'une bande forestière le long de la voie. Les différentes

situations météorologiques étudiées ont permis de mettre en évidence un gain acoustique de l'ordre de 5 dB (A) apporté par une bande forestière de 100 m de largeur sur le bruit de trafic routier sur une situation caractéristique de nuit et de l'ordre de 3 dB (A) dans le cas d'un vent portant. Les ordres de grandeur de ces atténuations sont les mêmes que ceux obtenus par les solutions classiques telles que les écrans de 2 m.

La forêt agit donc sur la propagation de deux manières : d'une part, en augmentant l'atténuation avec l'effet de diffusion par les troncs et l'absorption par l'humus et, d'autre part, en réduisant les effets météorologiques.

Afin de confirmer les résultats de ces simulations, de valider sur site réel les modèles de calculs développés et de mettre en évidence l'effet de la météorologie sur la propagation acoustique en forêt, une importante campagne de mesures a été réalisée dans les Landes. Les résultats de cette campagne sont originaux car c'est la première fois que des mesures in situ de l'atténuation du bruit routier par la forêt ainsi que des mesures de conditions météorologiques locales sont réalisées simultanément.

Campagne de mesures in situ de l'effet de forêt dans les Landes. Validation des modèles de calculs

Présentation de la campagne de mesure

Description du site

Le site choisi se trouve en bordure de la RN10, à 30 km au sud de Bordeaux. Il se compose d'une zone boisée et d'une zone déboisée. La route est droite et orientée nord nord-est/sud sud-ouest. Les vents dominants sont orientés ouest-est, donc transversalement à la route.

La zone boisée est une forêt de pins plantés, alignés par rangées, parallèles à la route et espacés de 4 m. Le long d'une rangée, les pins sont espacés de 2,5 m environ. La première rangée de pins est située à 40 m de distance de l'axe central de la route. La hauteur moyenne de la forêt est de 11,8 m, la circonférence moyenne des troncs à 1,5 m de hauteur est de 53 cm et la densité des arbres est de 1 078 tronc/ha.

Description des mesures

La campagne de mesures sur site a eu lieu du 16 au 29 juin 1999. Pour ces mesures, on dispose de 4 microphones dans chaque zone à différentes distances de la route : 50 m (récepteur utilisé comme référence), 100 m, 150 m et 300 m (Figure 1). Ces microphones sont placés à 2 m au-dessus du sol.

La zone boisée commençant à 40 m de la Nationale, la première distance de mesure de 50 m constitue la référence de la mesure. Les mesures en forêt à 100 m, 150 m et 300 m de distance de la route correspondent à une protection d'une bande de forêt de largeurs respectives de 60 m, 110 m et 260 m.

D'autre part, une boucle de comptage de trafic a été installée sur la route nationale au niveau du site de mesures. Lors de la campagne de mesure, le débit moyen dans chaque sens de circulation est de 2 206 véhicules par jour, dont 5 % de poids lourds, avec une vitesse moyenne de 85 km/h pour les véhicules légers.

Résultats et synthèse des mesures

Profil de célérité du son

Pour obtenir des profils verticaux de vitesse du vent et de température, deux mâts météorologiques de 20 m de hauteur ont été installés sur le site, l'un en zone déboisée, l'autre en forêt.

Chaque mât est équipé de trois anémomètres bidirectionnels positionnés à 3,7 m, 9,7 m et 20,7 m au-dessus du sol, et de quatre sondes de température à 1,5 m, 3 m, 9 m et 20 m au-dessus du sol. En forêt, un anémomètre supplémentaire est placé à 15,7 m d'altitude. Les informations suivantes sont mesurées toutes les secondes mais seule leur moyenne est enregistrée toutes les deux minutes : la vitesse du vent, sa direction en degrés par rapport au nord, l'écart type suivant l'axe de la direction du vent et l'axe perpendiculaire à cette direction et enfin la température à chacune des hauteurs.

Le profil de célérité du son $C(z)$ en fonction de l'altitude z est déduit des profils de température $T(z)$ et de vitesse de vent $U(z)$ selon la formule suivante :

$$C(z) = 20.05 \sqrt{T(z) + 273.15} + U(z) \cos(\eta)$$

où η est l'angle entre la direction moyenne de vent mesurée et la direction de propagation acoustique dans le plan horizontal.

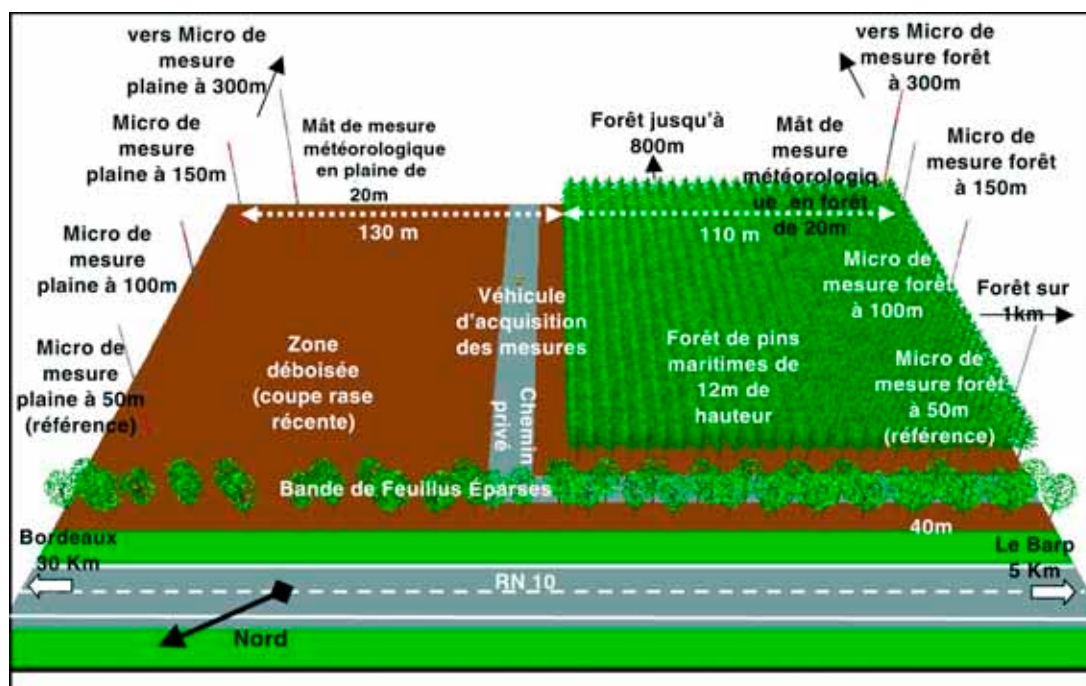


Fig. 1 : Schéma du site de mesure dans les Landes en perspective

Les profils de température sont extrapolés au-delà de 21 mètres d'altitude à l'aide d'un profil de type logarithmique conformément aux formules de Panofsky [2], soit :

$$T(z) - T(z_{mes}) = \frac{T_*}{0.4} \left(\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \ln\left(\frac{z_{mes}}{z_0}\right) \right)$$

Z désignant l'altitude de calcul et Z_{mes} l'altitude de la température mesurée. Dans notre cas, compte tenu du type de sol et conformément au tableau de Panofsky [2], on prendra comme longueur de rugosité : $Z_0 = 8.10^{-2}$ m en plaine et $Z_0 = 1$ m en forêt. T_* , température d'échelle, est déterminé en résolvant l'équation pour les deux altitudes mesurées les plus élevées. En dessous de 21 m le profil de température est interpolé de manière linéaire à partir des valeurs mesurées.

De même que pour la température, le profil de vitesse de vent est extrapolé au-delà de 20,7 m à l'aide du profil logarithmique suivant :

$$U(z) = \frac{u_f^*}{0.4} \ln\left(\frac{z - d_0}{z_0}\right)$$

En plaine, et en forêt, soit une altitude égale à environ 80 % de la hauteur de la cime des arbres. En forêt, en dessous de la cime des arbres, le profil de vitesse de vent en forêt est interpolé linéairement avec les valeurs mesurées à 3,7 et 9,7 m et la valeur calculée à la hauteur moyenne de la cime.

Classement des mesures météorologiques en fonction des conditions acoustiques

Les conditions météo-acoustiques sont déterminées en comparant les niveaux sonores obtenus avec la méthode de l'Équation Parabolique Rapide [3] (GFPE 2D) en utilisant le profil mesuré et extrapolé (Equation 1) et un vent de vitesse moyenne égale à + 1 m/s à 10 m de hauteur et un gradient de température nul.

Les conditions sont définies en chaque récepteur comme :

- favorables (à la propagation acoustique) si le niveau calculé en ce point est supérieur à celui obtenu avec le critère pour un vent portant de 1 m/s à 10 m de hauteur,
- défavorables (à la propagation acoustique) si le niveau calculé en ce point est inférieur à celui obtenu avec le critère pour un vent contraire de 1 m/s à 10 m de hauteur,
- quasi homogènes, sinon.

Ainsi, sur la période de mesure diurne (de 6 heures à 22 heures), on compte 52,6 % de conditions défavorables, 8,7 % de conditions quasi-homogènes et 38,7 % de conditions favorables. Les conditions défavorables sont donc majoritaires de jour.

Sur la période de mesure nocturne (de 22 heures à 6 heures), il n'y a pas de conditions défavorables, on compte 6,7 % de conditions quasi-homogènes et 93,3 % de conditions favorables.

Ces valeurs sont voisines de celles données dans la Nouvelle Méthode de Prédiction du Bruit [4] pour la région de

Bordeaux et sur une période de 10 ans, pour un angle de 260° : 41 % favorables de jour, et 95 % de nuit. Cette campagne de mesures, même de durée réduite, est donc bien représentative des conditions météorologiques de long terme.

Remarquons que les conditions quasi-homogènes qui sont la plupart du temps utilisées dans les méthodes de prévisions acoustiques, ne dépassent pas les 10 % du temps mesuré.

Efficacité acoustique de la forêt

Afin d'évaluer l'impact acoustique d'une bande de forêt parallèle à la route à une distance d_{ref} de celle-ci, il est nécessaire de définir un critère représentatif et mesurable. On définit donc « l'efficacité » de la forêt en dB à une distance d de la route comme étant la différence des niveaux de bruit équivalents (Leq) mesurés sur la période considérée en forêt et en plaine, référencés par rapport aux Leq à d_{ref} .

$$\Delta_{d\ m} = (Leq_{forêt\ à\ d\ m} - Leq_{forêt\ à\ d_{ref}\ m}) - (Leq_{plaine\ à\ d\ m} - Leq_{plaine\ à\ d_{ref}\ m})$$

Dans notre cas, les niveaux sont référencés par rapport au niveau mesuré à 50 m de la route, soit à seulement 10 m à l'intérieur de la bande de forêt. À cette distance, l'influence de la météorologie est très peu sensible. Cette référence permet de compenser les dissymétries de bruit de fond dans le site entre la zone boisée et la zone dégagée.

Une valeur négative de l'efficacité représente donc vraiment le gain en dB qu'apporte une bande de forêt par rapport à une situation identique en plaine. Elle peut être mesurée ou calculée par bande d'octave ou en niveau global.

L'efficacité globale moyenne en dB (A) mesurée dans le site des Landes à une distance de 150 m de la route (soit une bande de forêt de 110 m de large) est récapitulée sur le tableau 1 en fonction du type de condition météorologique.

Conditions météo-acoustiques	Durée totale mesurée	Δ_{150m}
favorables	98h	-2.9
quasi homogènes	1h40'	-2.5
défavorables	21h30'	-0.9

Tabl. 1 : Efficacité moyenne globale de la forêt en fonction des conditions météorologiques, mesurée en dB (A) intégrées par 1/3 d'octave entre 50 Hz et 10 kHz

On constate en conditions favorables que l'efficacité globale moyenne de la forêt est égale à environ -3 dB (A) pour une bande de 110 m de large. En effet, grâce à la diminution des gradients de température à l'intérieur de la forêt, les conditions météorologiques sont homogénéisées créant une situation moins favorable à la propagation en forêt qu'en plaine.

En conditions quasi-homogènes, l'efficacité de la forêt égale à -2,5 dB (A) est donc légèrement plus faible qu'en conditions favorables. L'effet de la météorologie n'intervenant pas dans ce cas, cette efficacité est donc essentiellement due à l'effet de diffusion des troncs d'arbre étudié dans [1].

En conditions défavorables, l'efficacité de la forêt mesurée est plus faible et égale à environ -1 dB (A) à 150 m de distance de la route. Contrairement aux résultats des calculs précédemment obtenus [1], on observe encore une efficacité de la forêt en conditions défavorables à la propagation.

Ainsi, le type de conditions météorologiques est déterminant pour l'estimation de l'atténuation du bruit par une bande forestière. Ce résultat original est ainsi validé de manière théorique et expérimentale.

D'autre part, les mesures à 100 m de la route ne sont pas présentées ici car à cette distance, l'impact des conditions météorologiques est faible. Les mesures à 300 m sont difficilement exploitables à cause d'une faible dynamique de mesure à cette distance en forêt.

Enfin, l'écart entre les différents types de condition météorologique serait plus important si l'on filtrait les mesures au-delà de 4 kHz dont le niveau en forêt est augmenté par un fort bruit de fond de vent dans les arbres et de chants d'oiseaux...

Efficacité de la forêt sur différentes périodes caractéristiques en fonction de la fréquence

Afin d'étudier plus précisément les mesures effectuées et de les comparer au code de calcul développé précédemment [1], on s'intéresse ici à l'efficacité de la forêt sur des périodes caractéristiques de chaque type de condition météorologique.

Pour établir un profil de célérité du son moyen, les paramètres météorologiques mesurés de vent et de température toutes les deux minutes sont moyennés sur l'ensemble des périodes considérées.

Les profils moyens de célérité établis jusqu'à 50 m d'altitude par l'utilisation des équations 1 à 4 sont comparés en Figure 2. Notons la forte différence de gradient de célérité entre les deux milieux et ceci quelles que soient les conditions de vent et de température.

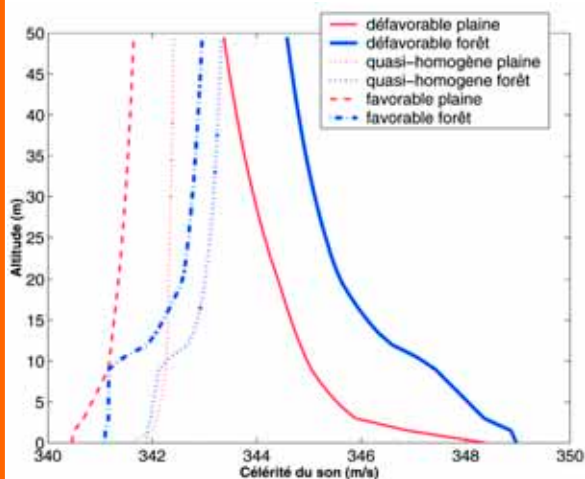


Fig. 2 : Profils de célérité du son correspondant aux conditions météorologiques moyennées sur une période pour différents types de conditions. En conditions favorables : le 27 juin de 02 h 00 à 04 h 00, en conditions homogènes : le 27 juin de 08 h 15 à 08 h 35 et en conditions défavorables : le 24 juin de 12 h 00 à 14 h 00

L'efficacité de la forêt mesurée à une distance de 150 m de la route pour les différents types de profils météorologiques est représentée sur la Figure 3.

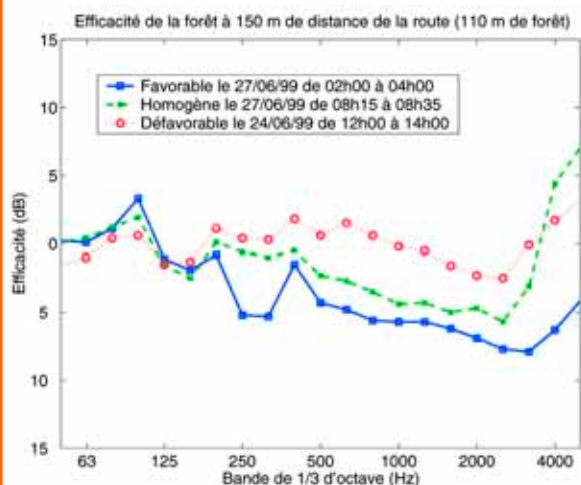


Fig. 3 : Efficacité de la forêt par bande de 1/3 d'octave mesurée à 150 m et référencée sur une période correspondant à différents types de conditions météorologiques. En conditions favorables, en conditions homogènes et en conditions défavorables.

Ainsi, jusqu'à 250 Hz, il y a peu de différences d'efficacité de la forêt quelles que soient les conditions météorologiques. Entre 500 Hz et 2 kHz, on peut noter deux choses : D'une part, l'effet croissant de la diffusion avec la fréquence, d'autre part, l'impact des conditions météorologiques.

En effet, en conditions favorables, la présence de la forêt permet d'obtenir une atténuation supplémentaire de près de 2 à 3 dB par rapport aux conditions homogènes. Au contraire, en conditions défavorables, l'efficacité de la forêt est plus faible de 3 dB en moyenne qu'en conditions homogènes.

Calculs de l'effet de forêt en fonction de la fréquence - Comparaison aux mesures

Nature du sol de plaine et de forêt

Les valeurs d'impédance sur site sont déduites de mesures de réponse impulsionnelles dans la zone déboisée. Le modèle d'impédance à deux paramètres d'Attenborough [5] est utilisé avec pour valeurs $\sigma_e = 13,6 \text{ kPa.s.m}^{-2}$ et $\alpha_e = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ dans les calculs.

Par ailleurs, pour les données d'entrée des calculs, on fera l'hypothèse d'une même impédance pour caractériser les sols des parties boisées et récemment déboisées.

Les parties en bitume sont considérées comme acoustiquement réfléchissantes.

Comparaison des mesures en condition homogènes avec les méthodes simplifiées de calcul d'effet de forêt.

Les mesures d'efficacité en conditions homogènes précédentes peuvent être comparées à une méthode simplifiée sur sol plan impédant tenant compte de la diffusion par les

arbres développée au Danemark par Kragh sous le nom de « Nordic method » [6]. Cette méthode se base elle aussi sur la perte de cohérence progressive entre le rayon direct et réfléchi. Le facteur de calcul combiné de l'effet de sol et de la diffusion par les arbres se calcule selon la formule suivante :

$$Att_{forêt} = 10 \log_{10} \left[(1 - k_f) |1 + p_r|^2 + k_f (1 + |p_r|^2) \right] + k_f k_p Ae(r)$$

où $Att_{forêt}$ désigne l'atténuation par effet de sol et de diffusion par les troncs référencée au champ libre en dB, K_f est une fonction définie par Kragh représentant l'effet de perte de cohérence en fonction du produit ka du nombre d'onde acoustique et du rayon moyen des éléments diffusants, $Ae(r)$ est un calcul de l'effet de diffusion défini aussi dans le rapport [6], K_p est une constante de proportionnalité prise égale à 0,4 et P_r désigne le rapport entre le champ de pression acoustique réfléchi sur le sol et le champ direct, selon la formule de Chien et Soroka [7].

Notons que le niveau sonore en plaine nécessaire au calcul de l'efficacité de la forêt se calcule en posant $K_f = 0$ dans l'équation 6.

En se basant sur les résultats de Barrière [8], une version modifiée de l'équation a été comparée à ces résultats :

$$Att_{forêt} = 10 \log_{10} \left[(1 - k_f^5) |1 + p_r|^2 + k_f^5 (1 + |p_r|^2) \right] + Att_{heuristique}$$

Dans cette formule $Att_{heuristique}$ désigne la perte par insertion calculée selon la méthode heuristique présentée dans la première partie de l'article [1].

Cette formule, de même que la méthode de Kragh [6] est utilisée avec les paramètres suivants : densité de troncs de 0,108 arbre/m² et rayon moyen des troncs de 8,5 cm. Les récepteurs sont situés à 2 m de hauteur.

Afin de se rapprocher des conditions de mesure, la circulation sur la nationale est modélisée par une série de sources ponctuelles à 0,5 m de hauteur suivant la méthode décrite en [1]. La moyenne quadratique des niveaux équivalents est calculée à l'aide de chaque méthode aux distances cibles et aux distances de référence en plaine et en forêt. L'efficacité de la forêt mesurée à 100 m et à 150 m et calculée à l'aide des méthodes nordique et heuristique sont comparées sur la Figure 4.

Par contre, la méthode nordique ne permet pas d'obtenir une bonne évolution fréquentielle de l'efficacité de la forêt. Cette divergence provient de la différence entre une interférence marquée dans le cas du calcul en plaine et un calcul en forêt qui supprime l'interférence par perte de cohérence trop importante.

Dans la formule utilisée par Kragh la perte de cohérence intervient donc de manière trop rapide. Nous préférons l'utilisation du coefficient de cohérence K_{cf} et de l'équation 6 pour le calcul de l'effet de diffusion sur sol plan impédant. Cette formule a été validée par des mesures sur maquettes [8] et par une méthode de calcul 3D [8].

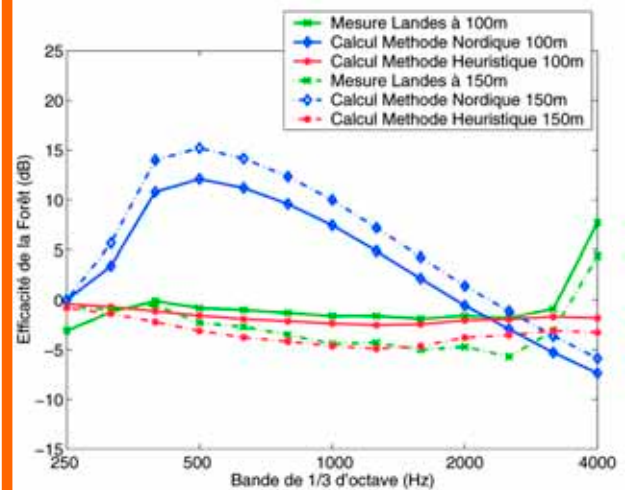


Fig. 4 : Efficacité de la forêt mesurée à 100 m et 150 m par bande de 1/3 d'octave en conditions homogènes : le 27 juin de 08 h 15 à 08 h 35. Comparaison à la méthode nordique [6] et modèle heuristique [1] avec largeurs de bande : 60 m (100 m – 40 m), 110 m (150m – 40 m), densité de troncs : 0.1 078 arbre/m² et rayon moyen des troncs : 8,45 cm

Dans le cas de la Figure 4, la méthode heuristique définie par l'équation 6 s'accorde bien aux mesures à 100 m et encore mieux à 150 m, puisqu'en conditions homogènes, les courbes sont quasiment superposables entre 500 Hz et 3 kHz. D'autre part, conformément au modèle heuristique, l'efficacité de la forêt est bien proportionnelle à la distance de propagation en forêt.

La méthode heuristique telle que présentée dans Barrière [1] permet donc une très bonne prise en compte de l'effet de diffusion par les troncs dans les calculs de propagation acoustique en forêt.

Afin de s'affranchir de la différence de deux calculs plaine et forêt contenus dans le calcul de l'efficacité, une comparaison des différentes méthodes est effectuée en Figure 5 à des mesures de Huisman [9] en forêt avec source ponctuelle.

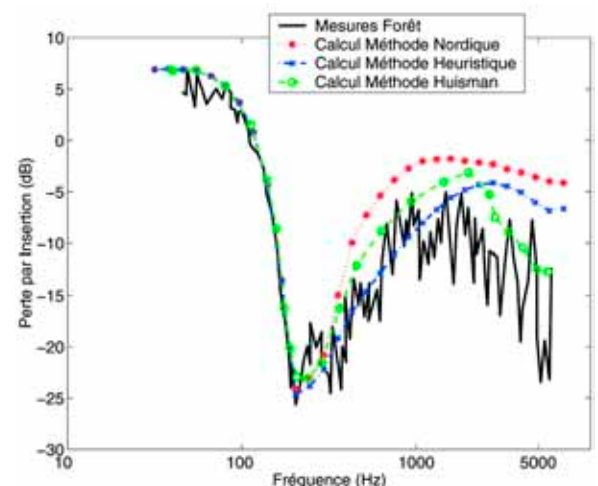


Fig. 5 : Perte par insertion mesurée à 100 m par Huisman [9] dans une forêt de pins. Comparaison à la méthode de Huisman [9], méthode Nordique [6] et modèle Heuristique [1]. Hauteur de source : 1 m ; hauteur du récepteur 2,5 m ; densité de troncs : 0,19 arbre/m² et rayon moyen des troncs : 8 cm

La concordance de la méthode heuristique avec les mesures est encore très bonne jusqu'à 2 kHz. Au-delà, l'effet de diffusion par les branches et les feuilles doit être pris en compte. La méthode nordique sous-estime l'effet de diffusion par rapport aux autres méthodes et aux mesures. La méthode de Huisman [9] concorde bien aux mesures mais elle reste inutilisable pour des prévisions car l'effet de diffusion obtenu doit être préalablement ajusté par des mesures sur site.

La formule heuristique sur sol plan avec absence d'effet météorologique permet une estimation rapide d'un effet complexe à partir de paramètres simples comme la densité des troncs d'arbre, leur rayon moyen, l'épaisseur de la bande de forêt et l'impédance du sol de la forêt. Elle pourrait aisément être incluse dans une méthode prévisionnelle de bruit routier telle que la Nouvelle Méthode de Prévision du Bruit [4].

Comparaison des calculs avec effet météorologique en forêt et des mesures in situ

Afin de prendre en compte les effets de la météorologie, la méthode de calcul utilisée ici est celle basée sur l'équation parabolique (GFPE 2D Forêt) décrite dans la première partie de l'article [1]. Seuls les paramètres spécifiques au site mesuré sont décrits ici.

De même que pour le calcul en conditions homogènes ci-dessus, la circulation sur la nationale est modélisée par une série de sources ponctuelles à 0,5 m de hauteur. Le calcul GFPE 2D forêt est réalisé pour chaque source équivalente en projetant le profil de célérité du son mesuré sur la direction source-récepteur.

L'effet de la diffusion est calculé pour chacune de ces directions avec le modèle heuristique [1] pour une bande de forêt d'une longueur égale à l'intersection entre le volume couvert par la forêt et la droite entre la source et le récepteur. La densité et le diamètre des arbres utilisés sont les paramètres moyens mesurés décrits plus haut.

Résultats en 1/3 d'octave

Les résultats des calculs avec modèle GFPE 2D « forêt » et des mesures dans les Landes à 150 m de distance de la source en condition favorable, homogène et défavorable sont comparés respectivement en Figure 6, Figure 7 et Figure 8.

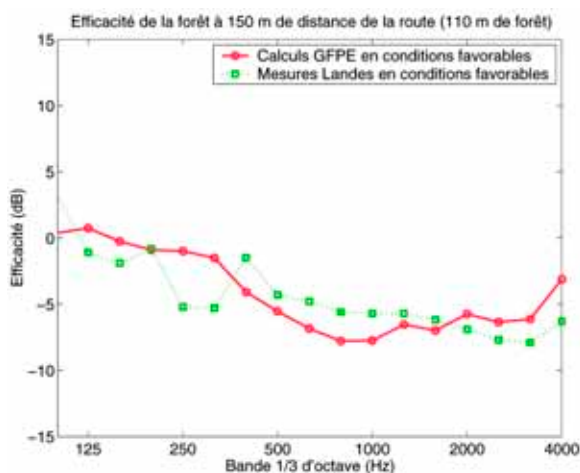


Fig. 6 : Efficacité de la forêt à 150 m par bande de 1/3 d'octave référencée à 50 m. Comparaison des mesures et du calcul avec GFPE 2D « forêt » en conditions favorables

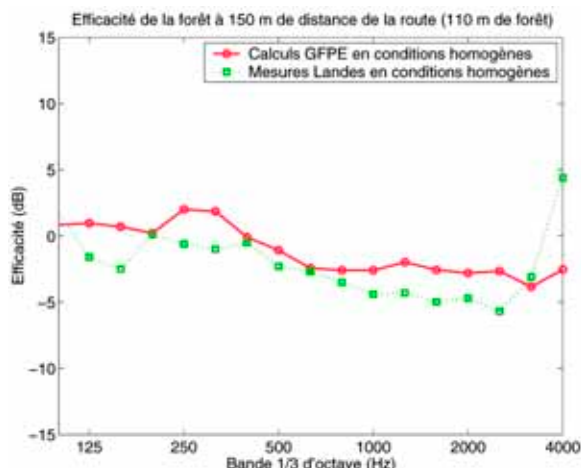


Fig. 7 : Efficacité de la forêt à 150 m par bande de 1/3 d'octave référencée à 50 m. Comparaison entre les mesures et le calcul avec GFPE 2D « forêt » en conditions homogènes

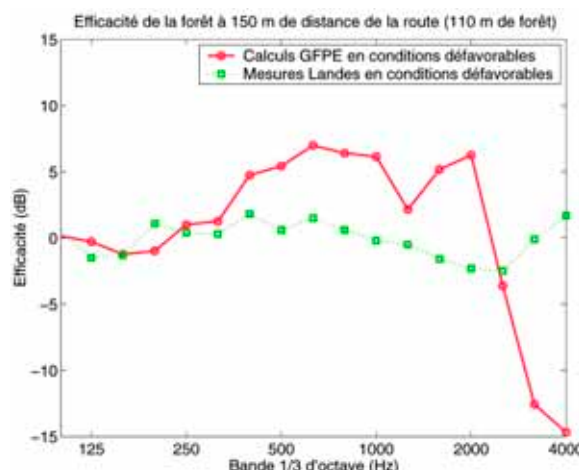


Fig. 8 : Efficacité de la forêt à 150 m par bande de 1/3 d'octave référencée à 50 m. Comparaison des mesures et du calcul avec GFPE 2D « forêt » en conditions défavorables

Du fait de l'ensemble des erreurs possibles relatives au calcul de l'impédance du sol de forêt, de l'interpolation des profils météorologiques et bien sûr des imprécisions de la mesure, la concordance entre la méthode de calcul et les mesures est excellente avec des conditions météorologiques de type favorables (moins de 0,5 dB de différence en efficacité globale) et bonne avec des conditions de type homogènes (moins de 1,5 dB de différence en efficacité globale). La méthode de calcul permet donc la prévision de l'effet de forêt dans des conditions météorologiques connues avec une bonne précision.

Pour les conditions défavorables, le calcul diverge des mesures. Ceci s'explique car la période de mesure correspond à un important vent contraire. Or, la modélisation de l'évolution des profils de célérité entre la route et l'orée de la forêt est complexe dans ce cas.

Quoi qu'il en soit, les périodes de conditions défavorables vont correspondre à des niveaux de bruit faibles. Les divergences de la méthode de calcul dans ces périodes auront donc relativement peu d'impact sur le calcul de niveaux équivalents long terme de jour et de nuit, déterminés par les niveaux correspondant aux conditions favorables.

Comparaison des résultats globaux

L'efficacité globale de la forêt en dB (A) calculée avec GFPE 2D « forêt » est comparée aux mesures pour les différentes périodes caractéristiques en Tableau 2.

Condition météorologique	Calcul GFPE 2D "forêt"	Mesures
Favorable	-5.5	-5.8
Homogène	-2.2	-3.6
Défavorable	4.7	-0.2

Tab. 2 : Efficacités globales en dB (A) intégrées entre 100 Hz et 4 kHz pour différents types de conditions météorologiques. Comparaison calculs/mesures

En conditions défavorables, la différence entre mesures et calculs est sensible. Mais en conditions favorables et homogènes, cette différence est faible et la concordance est bonne.

Conclusion

La campagne de mesures dans les Landes a permis d'estimer le gain apporté par la présence d'une bande forestière en bordure de route, par rapport à un site déboisé. Suivant les conditions météorologiques, ce gain est plus ou moins important. En conditions favorables, on obtient un gain supplémentaire entre 3 dB (A) et 5 dB (A) par rapport à la même situation en zone dégagée. Au contraire, en conditions défavorables, le niveau mesuré en forêt peut être plus important que celui mesuré en plaine. En conditions homogènes, la météorologie influence peu la propagation acoustique. Les différences de niveaux mesurés entre plaine et forêt sont uniquement dues à la diffusion par les troncs et le feuillage.

Globalement, on retrouve donc les mêmes résultats que lors des simulations [1] quant à l'effet de la forêt sur les conditions météorologiques et son impact sur la propagation acoustique.

La méthode heuristique permet une estimation rapide d'un effet complexe (effet de diffusion par les troncs d'arbre) à partir de quelques paramètres représentatifs de la végétation (densité, diamètre moyen et épaisseur de bande). Elle peut être incluse dans des formules de calcul de propagation sur sol plan impédant [7] et dans les calculs de type équation parabolique. Elle pourrait de plus être aisément utilisée dans une méthode prévisionnelle de bruit routier.

Le code de calcul basé sur l'équation parabolique a pu être validé en conditions favorables et homogènes. Les conditions défavorables étant particulièrement instables, il est difficile d'obtenir d'aussi bons résultats dans ces conditions.

Les outils numériques développés [1] ont donc été validés par l'expérience dans le cas d'une infrastructure routière. Ils pourront être utilisés soit directement dans les études opérationnelles pour optimiser les différentes solutions de traitement, soit servir de références pour la mise au point de modèles simplifiés.

De tels outils devraient permettre une meilleure prise en compte de l'environnement dans l'aménagement du territoire.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), le ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement et l'institut national de recherche agronomique de bordeaux (INRA) pour leur support financier et technique. Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une thèse financée par le centre scientifique et technique du bâtiment de Grenoble (CSTB).

Références bibliographiques

- [1] N. Barrière et J. Defrance, La Forêt : "Un écran anti-bruit météorologique" 1ère partie : Une nouvelle méthode de calcul de la propagation du bruit de trafic en forêt. Acoustique et Techniques n°23 - oct. 2000 : pages 41-48.
- [2] H.A. Panofsky et J.A. Dutton, Atmospheric Turbulence; Models and methods for engineering applications, ed. W.-I. publication. 1984.
- [3] N. Barrière Y. Gabillet, Sound Propagation over a barrier with realistic wind gradients, comparison of wind tunnel experiments with GFPE computations. ACTA Acustica, 1999. n° 85 - p. 325-334.
- [4] CERTU, et al., Bruit des infrastructures routières, Méthode incluant les effets météorologiques NMPB routes 96, ed. CERTU 1997 - 98 p.
- [5] Attenborough, K., Acoustical impedance models for outdoor sound propagation. J. Sound Vib, 1985. 99(4): p. 521-544.
- [6] Kragh, J., Nordic outdoor noise propagation models for homogeneous atmosphere, . 1997, DELTA: Lyngby, Denmark. 80 pages.
- [7] Chien, C.F. et W.W. Soroka, A note on calculation of sound propagation along an impedance surface. J. Sound and Vib., 1980. n° 69 - p. 240-243.
- [8] Barrière, N., Etude Théorique et Expérimentale de la propagation du bruit de trafic en forêt, in Dpt Acoustique. 1999, Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon. 151 pages.
- [9] Huisman, W.H.T., Reverberation and attenuation in a pine forest. JASA, 90(5): 1991. p. 2664-2677.