

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

1ère partie : Une nouvelle méthode de calcul de la propagation du bruit de trafic en forêt.

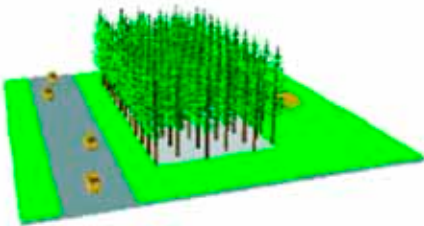
Nicolas Barrière,
SNECMA Moteurs (Département d'Acoustique, Direction Technique)
Centre de Villaroche,
77550 Moissy-Cramayel,
e-mail : nicolas.barriere@sneema.fr

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

A Yannick GABILLET

Cet article présente une nouvelle méthode de calcul de l'effet de la forêt sur l'atténuation du bruit de trafic routier ou ferroviaire. Cette méthode 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. Un nouveau modèle analytique de diffusion basé sur le développement modal de l'énergie diffusée par les troncs d'arbres a été développé. Celui-ci a permis de tester la validité de modèles statistiques simplifiés. Le modèle de calcul de l'effet de forêt est basé sur une version rapide de l'Equation Parabolique en 2D. Celui-ci, appliqué au calcul des niveaux de bruit à proximité d'une voie routière, a montré que par 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.

This article presents a new calculation method for the attenuation of road and railway 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. A new analytical scattering model based on a modal decomposition of the trunk scattered energy has been also developed. It has enabled to test the validity of the simplified statistical models. The calculation model of the forest effect is based on a fast implementation of the Parabolic Equation in 2D. 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.



La protection de l'environnement intervient aujourd'hui de manière prioritaire dans les projets d'aménagement du territoire. Dans le domaine routier et ferroviaire, la protection contre le bruit des infrastructures de transport est un des points cruciaux. Elle peut dans certains cas entraîner des modifications considérables des projets, voire même les ajourner.

Pour répondre à cette nécessité de protection de l'environnement, des limites de bruit admissibles aux abords des infrastructures de transport ont été spécifiées par le législateur. Ces limites de bruit sont basées sur la définition de niveaux de bruit équivalents de jour et de nuit. Les niveaux de bruit doivent être représentatifs d'une situation moyenne de long terme, c'est-à-dire pour des conditions de trafic journalier et nocturne représentatives d'une moyenne annuelle et pour des conditions météorologiques moyennes du site.

Avec l'accroissement du trafic, les limites de gêne se situent à quelques centaines de mètres des infrastructures

et pour de telles distances l'influence de la météorologie est prépondérante. Une étude statistique sur 10 ans des occurrences météorologiques effectuées sur une quarantaine de villes françaises montre que les conditions favorables à la propagation du bruit représentent 25 à 50 % du temps de jour, et 85 à 100 % de nuit [1]. Les conditions favorables à la propagation du bruit se caractérisent par des trajets sonores incurvés vers le bas qui ont ainsi tendance à s'éloigner du sol et contourner les obstacles. De jour, les conditions de propagation dépendent en général de la direction du vent alors que de nuit, c'est essentiellement le phénomène d'inversion thermique qui est prépondérant. Aussi, et quelle que soit la direction d'un projet, les moyens de protection mis en œuvre devront tenir compte des conditions météorologiques favorables à la propagation du bruit.

Les solutions utilisées pour protéger l'environnement contre le bruit dû aux moyens de transport peuvent être de deux ordres : d'une part intervenir sur le projet lui-même, par

exemple en l'éloignant le plus possible des zones bâties ou en traçant l'infrastructure en déblai par rapport au terrain naturel, d'autre part, construire des protections le long de l'infrastructure telles que les écrans ou les merlons de terre. Pour de grandes distances de propagation, ces solutions sont relativement peu efficaces quand les conditions de propagation sont favorables, ceci en raison de la courbure des trajets sonores.

Une alternative ou un complément à ces solutions topographiques 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.

Cet article présente une nouvelle méthode de prévision de la propagation du bruit de trafic à travers une forêt basée sur une méthode statistique du calcul de l'effet de diffusion par les troncs et les branches, et sur la résolution de l'équation parabolique rapide pour la propagation dans un milieu inhomogène.

Résultats bibliographiques

Des études expérimentales sur le sujet ont montré qu'une végétation conséquente au bord d'une infrastructure routière ou ferroviaire induit une atténuation non négligeable pour les riverains. Depuis quelques années, avec les progrès effectués dans la modélisation des sols naturels, un regain d'intérêt apparaît pour cet écran naturel.

Les principaux résultats de ces études sont détaillés dans Barrière [2]. Trois effets principaux de la forêt sur le bruit routier sont ainsi isolés :

- L'atténuation du bruit par le sol de forêt.
- La diffusion par les troncs et les branches, et le feuillage.
- L'effet de la modification des profils météorologiques.

Ces effets sont représentés sur la figure 1 et sont détaillés ci-après.

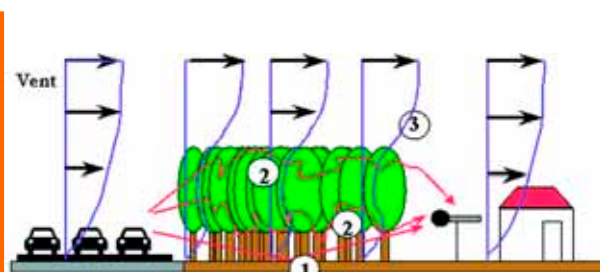


Fig. 1 : Schéma représentatif des différents effets d'une forêt sur la propagation du bruit routier

L'effet de sol de forêt

Comme le montre l'ensemble des publications, il existe une forte atténuation du bruit en basse fréquence due à l'effet de sol de forêt. Le sol de forêt a un caractère plus poreux qu'un sol de prairie ce qui le rend acoustiquement plus

absorbant. Ce phénomène est lié à l'interférence entre l'onde directe et l'onde réfléchi par le sol. Cet effet est prédominant jusqu'à environ 1 kHz et est d'autant plus important que la source et le récepteur sont proches du sol et que la distance de propagation est grande.

Cependant, compte tenu de la composition spectrale des bruits routier et ferroviaire et de la topologie du site, cet effet n'entraîne pas forcément une atténuation du niveau global au récepteur. Au-delà de 1 kHz, l'effet de diffusion par les troncs d'arbres devient important et l'effet de sol diminue.

Enfin, au-delà de 2 à 4 kHz suivant les espèces, l'effet de diffusion et d'absorption du feuillage ou des épines vient se rajouter à celui des troncs.

Le calcul de l'effet de sol est possible en première approximation à l'aide des modèles géométriques classiques si l'on fait abstraction des obstacles constitués par la forêt. Pour le calcul de l'atténuation en moyennes et hautes fréquences, la combinaison du modèle de calcul d'effet de sol avec les modèles de calcul de l'effet de diffusion par les troncs d'arbres est indispensable.

Diffusion par la végétation

La végétation a deux types d'effet sur la propagation du son en forêt : les effets directs comprenant la diffusion et l'absorption, et les effets indirects sur la météorologie qui agit à son tour sur le son. Les effets sur la météorologie sont traités ci-après.

De longues séries de mesures rapportées dans la littérature ont montré que les effets directs existent aussi bien dans le cas de plantes, de rangées d'arbres ou de forêts. La variation de l'effet de diffusion et d'absorption sur la propagation du son dépend évidemment du nombre d'obstacles diffusants, de leur taille et de leur composition organique.

Du fait de la variété et de la quantité de types de végétation, il est facilement compréhensible que la prévision précise de ces effets soit très ardue. Ceci est d'ailleurs en général impossible du fait de la méconnaissance quasi-complète des paramètres. Les mesures effectuées permettent seulement de donner un ordre d'idée de ces effets mais ne peuvent pas être utilisées à des fins de prévision.

Celles-ci indiquent qu'un effet n'est mesurable que lorsque l'on est en présence d'obstacles de taille suffisante comme une bande de forêt d'arbres ayant une largeur d'au moins une vingtaine de mètres [3].

L'absorption et la diffusion par les feuilles ou les épines sont deux phénomènes à prendre en compte pour le calcul de l'atténuation en hautes fréquences (supérieures à 4 kHz). Cependant, dans le cas de bruit routier ou ferroviaire, cet effet pourra être négligé du fait de son faible impact sur le niveau global [4]. De plus, dans le cas d'un feuillage caduque, l'effet n'existe plus en hiver. Il est d'autant plus justifié de le négliger.

Les effets météorologiques en forêt

Comme décrit précédemment, les effets météorologiques sont des effets indirects de la végétation sur le son. Les arbres agissent sur les paramètres météorologiques qui

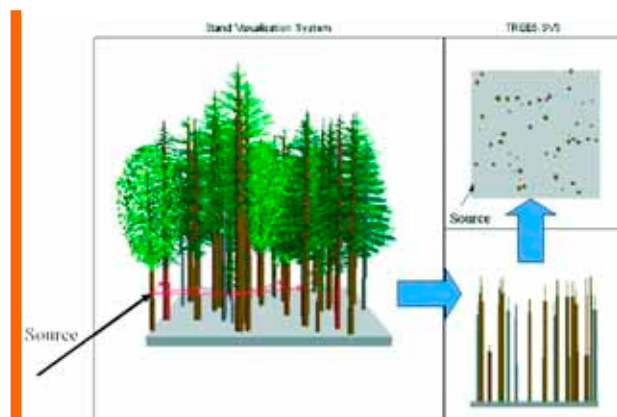


Fig. 2 : Modèle de multi-diffusion par une bande forestière

agissent ensuite sur la propagation du son. De nombreuses études [5] ont ainsi montré que le climat en forêt est caractérisé par une diminution des variations climatiques extrêmes.

Globalement, l'ensoleillement, l'hygrométrie, la végétation ou le relief induisent des inhomogénéités de température, d'humidité et de vent. Celles-ci induisent en acoustique des variations locales de la vitesse de propagation du son. Or, dans les études de propagation du son à travers la forêt, l'influence des gradients de célérité a en général été supposée négligeable sur la propagation acoustique. Or, du fait de la relative homogénéité de la température et de la vitesse du vent sous la canopée, la forêt pourrait être aussi utilisée comme "écran climatique" permettant de limiter les effets négatifs des gradients de vent et de température dans le cas de sol dégagé.

Un modèle de propagation acoustique de bruit routier en forêt devra donc tenir compte de l'ensemble des effets, excepté celui du feuillage qui n'intervient qu'en hautes fréquences. En premier abord, il est nécessaire d'étudier un modèle de diffusion par une bande forestière. Ce travail est détaillé ci-après

Modèle de multi-diffusion du son par une forêt

L'effet de diffusion par un tronc d'arbre peut être assimilé à celui d'un cylindre rigide infiniment long à condition de se placer dans un plan de coupe perpendiculaire au tronc et loin de ses extrémités (cf. : figure 2).

La théorie de la diffusion du son par un cylindre rigide infiniment long est expliquée en détail par Morse et Ingard [6]. L'effet de diffusion par une onde plane incidente est caractérisé par la taille du cylindre définie par son rayon a dans le plan de la diffusion et le nombre d'onde $k = 2\pi f / c_0$ de l'onde incidente, f étant la fréquence de l'onde plane incidente et c_0 la célérité du son dans l'air. La directivité et l'intensité de l'énergie diffusée sont directement dépendants du produit ka .

De manière générale, très peu d'énergie acoustique est diffusée par un cylindre rigide lorsque la longueur d'onde est grande vis-à-vis du rayon du cylindre ($ka \ll 1$). Inversement, lorsque que la longueur d'onde est petite comparativement à celui-ci ($ka \gg 1$), la diffusion est complète. La transition se fait donc autour de la fréquence $f_c = c_0 / 2\pi a$, soit par exemple $f_c \approx 550$ Hz pour un cylindre de rayon 10 cm.

Approche statistique

La méthode d'Embleton [7], qui reprend la théorie de diffraction de Twersky [8], consiste à évaluer analytiquement l'énergie moyenne diffusée par une bande infinie de largeur d de cylindres infiniment longs et parallèles entre eux. Le champ total est calculé comme étant la somme de l'onde plane incidente et du champ diffusé moyen sans tenir compte de la multi-diffusion entre les cylindres.

Embleton émet l'hypothèse que le champ diffusé est identique à celui d'un milieu homogène moyen composé de cylindres rigides isolés, de rayon égal au rayon moyen des arbres, et de densité égale à la moyenne de la densité réelle des arbres dans la bande.

L'atténuation en dB d'une onde plane incidente de nombre d'onde k par une bande de largeur infinie et d'épaisseur d de cylindres infiniment longs de rayon moyen a est donnée par la formule suivante :

$$Att_{heuristic} = 20d \operatorname{Im}(k_{heuristic}) / \ln(10) \quad \text{Eq. 1}$$

avec

$$k_{eff} = \sqrt{k^2 - 4iN''g + (g_1^2 - g^2)(2N''/k)^2} \quad \text{Eq. 2}$$

où N'' est le nombre des cylindres par m^2 et Im désigne la partie imaginaire

$$g = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \text{ et } g_1 = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n A_n \quad \text{Eq. 3}$$

avec

$$A_n = - \frac{[J_n(ka) + ZJ'_n(ka)]}{[H_n(ka) + ZH'_n(ka)]} \quad \text{Eq. 4}$$

Z étant l'impédance normalisée des cylindres, J_n et J'_n étant respectivement la fonction de Bessel à l'ordre n et sa dérivée, H_n et H'_n étant respectivement la fonction de Hankel à partie imaginaire positive à l'ordre n et sa dérivée.

Approche heuristique

Dans l'approche statistique précédente, la bande de cylindres infinis est représentée par un matériau de largeur fixe, contenant une densité d'obstacles. Cette théorie ne permet d'obtenir que l'énergie de la moyenne au carré du champ sonore transmis $\langle |p|^2 \rangle$ au lieu de la moyenne quadratique de l'énergie transmise $\langle |p|^2 \rangle$ qui est la seule grandeur intéressante. En effet, cette dernière est comparable aux mesures et caractérise l'atténuation globale. L'approche statistique néglige la diffusion incohérente entre les cylindres (c'est-à-dire tenant compte des multiples interactions entre ceux-ci) et introduit une erreur que Embleton estime faible en basses fréquences et importante en hautes fréquences.

Cette erreur a été estimée de manière empirique par Price [9] en comparant ce modèle avec une succession de mesures sur maquettes. Il apparaît que ce modèle donne

de bons résultats pour une densité artificiellement réduite en moyenne de 60 %, l'évolution fréquentielle restant la même.

L'atténuation en dB de l'équation 1 devient :

$$Att_{heuristic} = 20d \operatorname{Im}(k_{heuristic}) / \ln(10) \quad \text{Eq. 5}$$

avec

$$\operatorname{Im}(k_{heuristic}) = 0.4 \operatorname{Im}(k_{eq}) \quad \text{Eq. 6}$$

Validation numérique

Afin de valider cette valeur empirique, un modèle analytique original de diffusion multiple 2D par des cylindres parallèles a été utilisée [2] : le modèle modal de diffusion (MMD). Le traitement numérique du MMD est limité par le nombre de cylindres et les fréquences de calcul. Dans les calculs qui suivent, le nombre de cylindres choisi est de l'ordre de soixante. Compte tenu de cette faible valeur, la densité retenue est de 1 arbre/m² au lieu de 0.1 arbre/m² pour une forêt moyennement dense, de manière à obtenir un effet de diffusion comparable.

Afin de confronter les résultats des simulations pour un ensemble de récepteurs avec la solution empirique, on utilise la moyenne quadratique de la perte par insertion en dB :

$$H_{heuristic} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N_{récepteurs}} \sum \left| \frac{p_{in}(P) + p_{diff}(P)}{p_{in}(P)} \right|^2 \right) \quad \text{Eq.7}$$

Cette moyenne représente l'énergie diffusée sur un ensemble de récepteurs tel qu'on peut le mesurer correspondant ainsi à la loi heuristique.

Sur la figure 3 sont comparés les résultats correspondant à deux configurations très proches du calcul sur une ligne de récepteurs.

La configuration de la figure 3b est déterminée à partir de la configuration rangée en quinconce de la figure 3a en faisant varier les positions de ± 10 cm du pas entre les lignes (ici 1m). Elle montre, d'une part, qu'une faible variation de 10 % de la position permet une très bonne convergence des calculs numériques vers la méthode heuristique.

D'autres simulations (cf. [2]) montrent un comportement identique pour la variation de 1 pour 3 du diamètre des troncs. Enfin, la résolution du problème symétrique (source multiple et récepteur unique, somme incohérente au récepteur) qui se rapproche de manière théorique de l'effet d'atténuation d'un bruit routier par une forêt, montre un comportement identique c'est-à-dire une convergence vers l'atténuation heuristique.

Du fait que des variations existent dans les positionnements des arbres, même dans des parcelles plantées, la méthode de calcul heuristique de l'effet de diffusion est utilisable dans une très forte majorité des cas usuels.

Elle nécessite cependant que la disposition des cylindres

soit suffisamment aléatoire, que la source ne soit pas en vue directe avec la récepteur, et qu'enfin un nombre conséquent de cylindres soit situé entre la source et le récepteur.

La méthode heuristique permet d'évaluer de manière simple et rapide la diffusion et la multi-diffusion par une bande de forêt de largeur donnée, de densité et de diamètre moyen des troncs connus. Cette formulation montre que l'atténuation en dB est proportionnelle à la largeur d et à sa densité. L'augmentation du diamètre des troncs diminue quant à lui la fréquence d'apparition de l'effet. Enfin, cette formulation pourrait donc être utilisée dans une méthode de rayons en ajoutant une atténuation supplémentaire à l'atténuation atmosphérique pour tous les rayons traversant le volume couvert par la bande de forêt. Cependant, dans ces méthodes, il serait nécessaire de bien prendre en compte l'interaction entre l'effet de sol et l'effet de diffusion. L'utilisation ici d'une méthode de propagation pas à pas telle que celle de l'équation parabolique permet de résoudre cette difficulté.

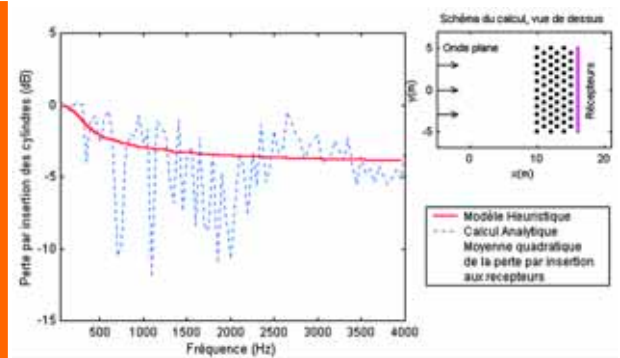


Fig. 3 : a) Calcul MMD avec une configuration de 63 cylindres en quinconce de 6 rangées de 10 et 11 cylindres. Espace entre rangées : 1 m, espace entre cylindres d'une rangée : 1 m. Diffusion d'une onde plane incidente parallèle à la bande de cylindres. Moyenne sur 101 points récepteurs situés à $x = 16\text{m}$, $-5\text{m} < y < 5\text{m}$. Comparaison à la méthode heuristique pour une densité de 0,9545 arbre/m² et de largeur de bande $d = 6$ m

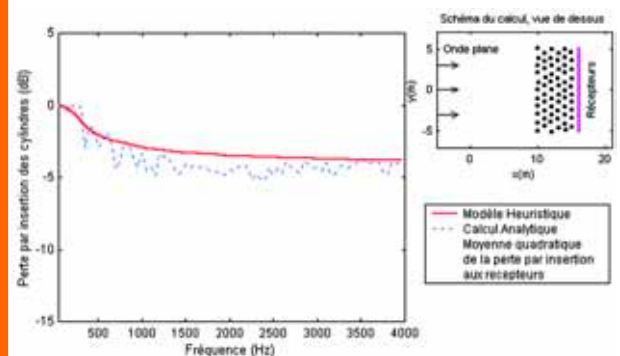


Fig. 3 : b) Calcul avec une configuration identique à la figure 3a mais avec une variation aléatoire de la position des cylindres de $N = 10\% \pm 10$ cm). Comparaison à la méthode heuristique pour une densité de 0,91 arbre/m² et de largeur de bande $d = 5,18$ m

Méthode de calcul de l'effet de la forêt sur la propagation acoustique incluant l'effet de la météorologie

La difficulté de la simulation réside dans le caractère évolutif du milieu de propagation à la traversée de la forêt. D'une part, le sol de forêt possède des propriétés acoustiques différentes du sol de plaine, et d'autre part, la forêt modifie progressivement le profil du vent quand celui-ci la traverse et tend à annuler le profil de température sous la canopée. Il faut donc traiter le problème de discontinuité d'impédance à l'entrée et à la sortie de la zone boisée ainsi que le problème d'évolution du profil météorologique à l'intérieur et à l'extérieur de la zone boisée. De plus, dans le cas du bruit routier, la source est une ligne incohérente et le problème ne peut pas se limiter à une étude en deux dimensions.

A l'aide d'une méthode de calcul basé sur la résolution de l'équation parabolique, il s'agit de représenter l'effet d'une forêt sur la propagation acoustique pour des cas théoriques représentatifs.

Etant données les dimensions du domaine d'étude, une version rapide de l'équation parabolique a été implémentée (GFPE : Green's Fast Parabolic Equation, cf. Gilbert [10]). Le calcul est effectué en deux dimensions. Le champ acoustique est initialisé par une expression analytique sur un axe vertical contenant le point source et est propagé pas à pas jusqu'au récepteur.

En choisissant une fonction de Green adéquate, le pas de calcul peut être égal à plusieurs dizaines de fois la longueur d'onde acoustique. Par rapport à une méthode classique de résolution de l'équation parabolique, le temps de calcul est divisé environ par 100.

Cette méthode est de plus en plus utilisée en propagation extérieure pour les calculs d'écran en présence d'effets météorologiques (cf. Barrière [11]) et plus récemment pour le calcul de propagation de bruit d'avion (cf. Cremezi [12]).

Paramètres des simulations

Données physiques et météorologiques de la forêt

Les données utilisées dans les simulations présentées ci-après sont tirées des travaux expérimentaux de Raynor [13]. Il s'agit d'un site de forêt au niveau du terrain naturel composé de pins blancs et rouges à 91 % et d'arbres à feuilles caduques à 9 %. Bien que la parcelle ait été plantée en 1939, le temps a rendu aléatoire la disposition des arbres. On en compte 881 sur une parcelle de 60 m de long par 100 m de large, soit une densité de 0,14 arbre/m². Le diamètre des arbres à 1,5 m de hauteur est de 16 cm en moyenne. La hauteur moyenne des arbres de cette parcelle est de 10,5 m.

Nature des sols de plaine et de forêt

Les sols introduits dans l'équation parabolique suivent les lois des matériaux poreux. Le modèle utilisé pour le calcul de l'impédance normalisée est un modèle à deux paramètres d'Attenborough [14] relatif à un sol dont la porosité croît (ou décroît) de façon exponentielle avec sa profondeur selon un taux α_e . L'impédance s'écrit alors :

$$Z_e = \left[3,79(\sigma_e/f)^2(1+j) + j9,74(\alpha_e/f) \right]$$

Eq. 8

où σ_e est exprimé en kPa.s.m⁻².

Ce modèle est bien adapté à des sols de type gazon épais ou prairie en herbes hautes ainsi qu'aux sols de forêt. Il présente une meilleure concordance avec les mesures in situ que le modèle à un paramètre de Delany et Bazley [15].

Les valeurs utilisées relatives au sol de plaine et de forêt sont tirées de Huisman [16] et sont données dans le tableau 1.

	Plaine	Forêt de pins
σ_e (kPa.s.m ⁻²)	200	7.5
α_e (m ⁻¹)	0	25

Tabl. 1 : Paramètres relatifs à l'impédance du sol Diffusion

Effet de diffusion

Tenir compte de la multi-diffusion par les cylindres dans un programme d'équation parabolique est en théorie incompatible avec le principe du calcul. En effet, il n'est pas possible de prendre en compte la rétrodiffusion par les obstacles.

Pour résoudre ce problème, on suppose que la forêt peut être considérée comme un milieu homogène équivalent caractérisé par un nombre d'onde complexe moyen k_{eq} . Sa valeur est déduite de la représentation heuristique telle que présentée en détail précédemment et qui conduit à un vecteur d'onde équivalent en forêt :

$$k_{foret} = Re(k_{eq}) + 0.4Im(k_{eq})$$

Eq. 9

L'impédance des troncs est considérée comme infinie dans le calcul de k_{eq} (Eq.2).

Profils météorologiques

Les profils de température utilisés pour les simulations sont fournis dans l'article de Raynor [13]. La figure 4 représente les profils diurnes et nocturnes de température interpolés jusqu'à 50 m de hauteur en plaine et en forêt.

Evolution des profils de température et de vitesse de vent

La méthode de l'équation parabolique nécessite en entrée les profils de célérité du son entre le sol et une limite supérieure qui dépend de la fréquence de calcul. Il faut donc connaître l'ensemble de ces profils entre le point source et les récepteurs calculés.

Disposant de profils de vent à des points particuliers en plaine et à l'intérieur de la forêt, il reste à estimer

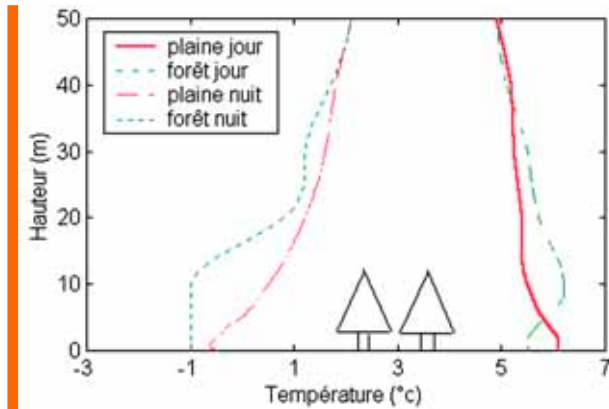


Fig. 4 : Profils de température en plaine et en forêt diurne et nocturne utilisés pour les simulations.

comment ceux-ci évoluent dans la forêt et en aval de celle-ci. Les travaux de Liu [17] permettent de préciser ces deux points. Il s'appuie sur des tests en soufflerie et sur des simulations.

Concernant le premier point, l'article montre que le profil à 100 mètres de distance de la lisière peut être considéré comme un profil établi. Il peut donc être reporté tel quel pour les largeurs de forêt plus grandes.

Pour le deuxième point, Liu [17] montre que le profil de type plaine est complètement rétabli à une distance de $20 h_{cime}$ après la forêt, h_{cime} représentant la hauteur moyenne de la forêt.

L'évolution de profils de vent utilisés pour les simulations est représentée sur la figure 5.

En ce qui concerne les profils de température, d'autres études montrent que la zone de transition entre parties boisée et non boisée est très courte. Nous considérerons ici que ces profils sont établis sans zone de transition.

Configurations géométriques de la simulation

Les calculs acoustiques ont été réalisés pour une ligne de sources située à 0,5 m au dessus d'un sol réfléchissant.

La ligne de source est placée à 20 m de la lisière de la forêt et le sol est parfaitement réfléchissant sur toute cette zone. Cette source représente la voie la plus éloignée d'une autoroute 2x2 voies avec terre-plein central. C'est la ligne de source la moins masquée par la forêt.

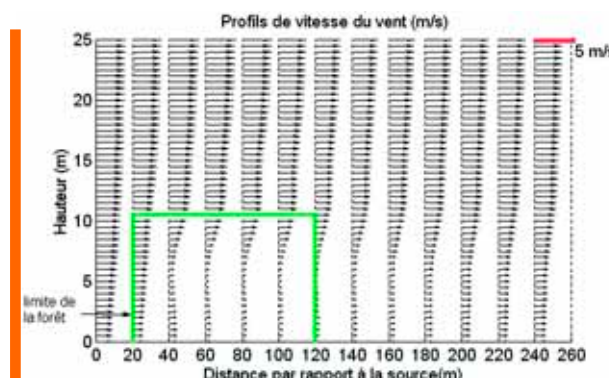


Fig. 5 : Evolution des profils de vitesse de vent utilisés pour les simulations

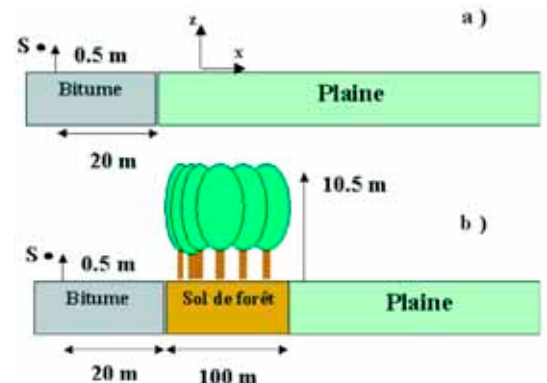


Fig. 6 : Géométrie des calculs ; largeur de la bande de forêt : 100 m

Méthode de sommation des résultats

La ligne de sources est représentée par N sources ponctuelles réparties avec un pas angulaire $d\theta$ constant donnant un angle total de vue θ depuis le récepteur considéré. La puissance acoustique linéique de la ligne de sources est de 100 dB(A)/m avec un spectre de bruit routier normalisé en dB(A) conforme à la norme européenne EN 1793-3 : 1995. Le calcul en dB(A) est effectué à partir du calcul par octave de 125 Hz à 4000 Hz. Pour chaque octave, dix fréquences pures ont été considérées. Chaque source ponctuelle possède une puissance proportionnelle à la longueur de la partie de la ligne source interceptée par le cône de pas angulaire $d\theta$. Cette puissance s'écrit :

$$L_w = L_w^* + 10 \log(dy) = L_w^* + 10 \log\left(\frac{r d\theta}{\cos \theta}\right) \quad \text{Eq.10}$$

avec $L_w^* = 100$ dB(A)/m et r la distance source-récepteur. Les résultats relatifs à des sources ayant chacune un niveau de puissance L_w sont sommés sur des lignes verticales de récepteurs et calculés sur une grille dans le plan (Oxz). L'effet de diffusion ainsi que l'effet de sol, sont recalculés pour chaque direction de calcul en fonction de la distance parcourue en forêt. Dans le cas d'un profil de vent favorable à la propagation, dans une direction perpendiculaire à la route vers les récepteurs, le vecteur de vent est projeté sur la direction de propagation. Dans le cas d'effet de température, celui-ci étant considéré comme isotrope, le gradient de température est indépendant de la direction. Les cartes de bruit sont ensuite sommées par octave en chaque point de la grille de calcul puis en dB(A). Enfin, les niveaux de pression intermédiaires obtenus pas par pas tout au long des calculs sont interpolés à partir de ceux de la grille permettant l'établissement d'une carte de bruit en dB(A) dans le plan (Oxz).

Résultats

Les profils météorologiques simulés représentent les configurations suivantes :

- Profil de température de jour (6 h-22 h) sans vent,
- Profil de température de nuit (22 h-6 h) sans vent,
- Profil de vent portant, perpendiculaire à l'axe de la voie.

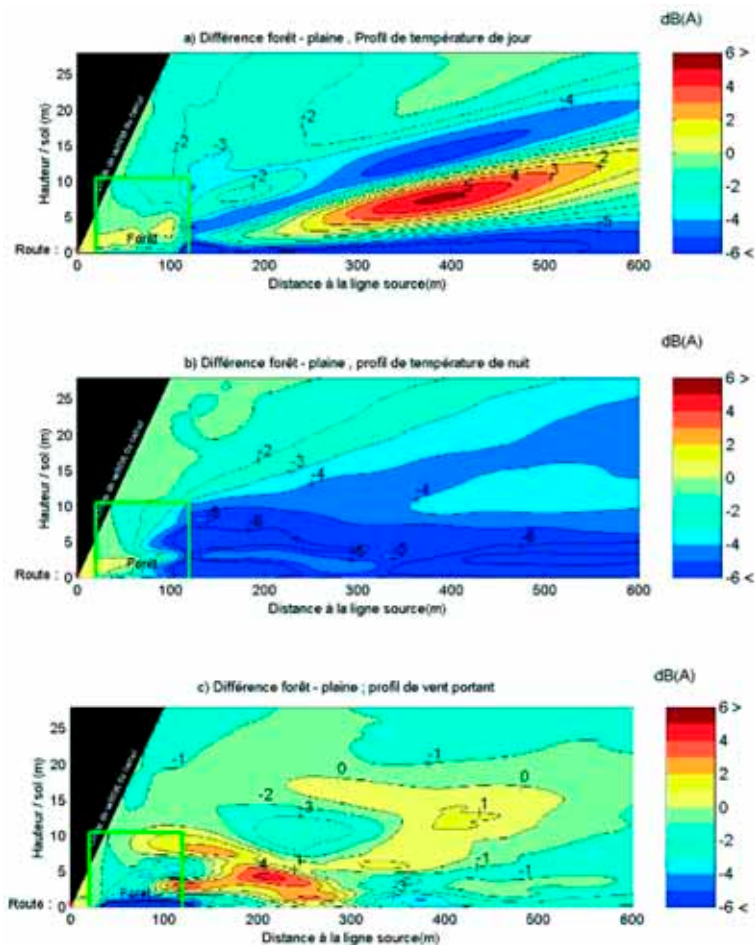


Figure 7 : Efficacité acoustique de la forêt par rapport à la plaine en dB(A) pour une configuration de forêt de 100 m de large en bord de voie et de plaine:
 a) profil de température de jour ,
 b) profil de température de nuit
 c) profil de vent portant perpendiculairement à la route.

La figure 7 représente les cartes d'efficacité de la forêt en dB(A) pour ces différentes configurations météorologiques. La valeur représentée est la différence de niveau entre plaine et forêt, une valeur négative indiquant une atténuation supplémentaire de la forêt par rapport à la plaine. Ces résultats sont détaillés dans Barrière [11] et Gabillet [18]. L'analyse des différents résultats montre que, dans le cas d'un profil de température de journée (Figure 7a), la forêt dégrade l'atténuation supplémentaire due à la météorologie. Néanmoins, en situation de propagation défavorable les niveaux de bruit résultants et les nuisances restent faibles.

Par contre, pour une forêt d'une largeur de 100 m en bord de voie avec un profil de température de nuit, la présence de la forêt tend à annuler les effets de la météorologie et permet d'obtenir un gain supplémentaire par rapport à la situation homogène (Fig. 7b). Le gain apporté par une telle forêt est de 5 dB(A) dans une situation où la gêne sonore est maximale et où les écrans perdent leur efficacité. La comparaison avec une situation en plaine avec un écran droit rigide de 2 m en bord de voie montre d'ailleurs que l'efficacité la forêt est équivalente sur une très large zone derrière la bande forestière à celle de l'écran acoustique. Dans le cas d'un vent portant, l'efficacité, de 2 à 3 dB(A), est donc moins importante mais reste intéressante vis-à-

vis de la gêne sonore (Fig. 7c). La zone d'atténuation est cependant moins stable dans ce cas.

Ces valeurs représentent une valeur moyenne sur une très large zone. On pourrait observer ponctuellement des gains plus forts mais très près du sol et dans une zone proche de la sortie de la bande forestière.

Conclusion

Un nouveau modèle matriciel de diffusion acoustique par une forêt a été développé. Ce modèle a été utilisé pour tester les solutions de l'effet de diffusion par une bande de cylindres et pour en fixer leur domaine d'application. Il montre que cet effet peut être estimé de manière simple par la méthode heuristique à partir des paramètres de densité et de diamètre moyen de la parcelle. Celle-ci a également été utilisée dans les méthodes de calcul de propagation présentées dans la suite.

La difficulté de modéliser l'effet météorologique sur la propagation acoustique en forêt réside dans le caractère tridimensionnel du problème. Ainsi, si l'effet de gradient de vitesse du son peut être limité à des plans verticaux perpendiculaires au sol, l'effet de diffusion se situe quant à lui dans un plan proche de l'horizontale parallèle au sol.

Afin de simplifier le problème dans une première étape, on a supposé que les effets pouvaient être découplés. Pour résoudre le problème de diffusion par les troncs, on suppose que la forêt peut être considérée comme un milieu homogène équivalent caractérisé par un nombre d'onde complexe moyen. Sa valeur est déduite de la représentation heuristique. Le calcul de propagation est relativement complexe compte tenu du caractère évolutif du milieu de propagation à la traversée de la forêt. Le modèle de l'équation parabolique permet de résoudre cette difficulté.

Cette méthode a été 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 et a été comparée à la situation de plaine. 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 largeur 100m 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, d'autre part, en réduisant les effets météorologiques.

Notons par ailleurs qu'il existe une diminution de la perception de gêne sonore lorsque la route ou la voie ferrée est masquée visuellement par un écran végétal, même si cet écran n'apporte aucune atténuation acoustique supplémentaire.

Afin de réaliser une validation de cette méthode sur le terrain, une expérimentation à proximité d'un site routier bordé d'une zone boisée a été faite. La suite de cet article qui sera consacrée à l'ensemble des résultats de cette campagne ainsi qu'à l'utilisation de la méthode de calcul pour définir des normes de calcul de propagation à travers les forêts.

Références bibliographiques

- [1] CERTU, et al., *Bruit des infrastructures routières, Méthode incluant les effets météorologiques NMPB routes 96*, ed. CERTU. Vol. 1. 1997: CERTU. 98.
- [2] Barrière, N., *Etude Théorique et Expérimentale de la propagation du bruit de trafic en forêt*, dec 1999, Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, Dpt Acoustique. Lyon. 151 pages.
- [3] Martens, M.J.M., *Noise abatement in plant monocultures and plant communities*. Applied Acoustics, 1981. 14: p. 167-189.
- [4] Martens, M.J.M., *Foliage as a low pass filter: Experiments with model forest in an anechoic chamber*. J.Acoust.Soc.Am, 1980. 67(1): p. 66-71.
- [5] Gross, G., *Numerical Simulation of canopy flows*. Vol. 12. 1992, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong kong, Barcelona, Budapest: Springer Verlag. 157.
- [6] Morse, P. et K.U. Ingard, *Theoretical Acoustics*, ed. M.G. Hill. 1968. 927.
- [7] Embleton, T.F.W., *Scattering by an array of cylinders as a function of surface impedance*. J.Acoust.Soc.Am, 1966. 40: p. 667-670.
- [8] Twersky, V., *Multiple scattering of waves by a volume distribution of parallel cylinders*. J.Acoust.Soc.Am, 1964. 36: p. 1314-1329.
- [9] Price, M.A. et K. Attenborough, *Sound attenuation in Woodland*, . 1988, The Open University: Milton Keynes, England.
- [10] Gilbert, K.E. et X. Di, *A fast Green's function method for one-way sound propagation in the atmosphere*. J. Acoust. Soc. Am., 1993. 94(4): p. 2343-2352.
- [11] Barrière, N. et Y. Gabillet, *Sound Propagation over a barrier with realistic wind gradients, comparison of wind tunnel experiments with GFPE computations*. ACTA Acustica, 1999. 85: p. 325-334.
- [12] Cremezi, C., *Etude de la propagation du son dans l'atmosphère : Application au bruit des avions en phase d'approche et de décollage*, mai 2000, Thèse de l'Université du Maine: Dpt Acoustique. Le Mans. 133 pages.
- [13] Raynor, G.S., *Wind and temperature structure in a coniferous forest and a contiguous field*. Forest Science, 1971. 17(3): p. 351-363.
- [14] Attenborough, K., *Acoustical impedance models for outdoor sound propagation*. J. Sound Vib, 1985. 99(4): p. 521-544.
- [15] Delany, M.E. et E.N. Bazley, *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*. Applied Acoustics, 1970. 3: p. 309-322.
- [16] Huisman, W.H.T., *Reverberation and attenuation in a pine forest*. JASA, 1991. 90(5): p. 2664-2677.
- [17] Liu, J., et al., *E - e Modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge*. Boundary-layer meteorology, 1996. 77: p. 21-44.
- [18] Gabillet, Y., N. Barrière, et C. Vilain, *Etude des effets météorologiques sur la propagation du bruit à travers une bande forestière*, . 1997, CSTB.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le Service d'Etude Technique des Routes et Autoroutes (SETRA) pour son support financier.