

# Prise en compte des conditions météorologiques dans la propagation du bruit

## Approche pratique

**Vadim ZOUBOFF**  
Ingénieur ESEO  
Chef de l'unité Propagation des ondes  
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers

**Jean Claude LAPORTE**  
Ingénieur CNAM  
Responsable de l'activité Acoustique  
et du Centre de métrologie  
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées  
de Clermont-Ferrand

**Yves BRUNET**  
Directeur de recherche  
Directeur du Laboratoire de bioclimatologie  
Institut national  
de la recherche agronomique de Bordeaux

### RÉSUMÉ

Cet article fait un état des connaissances pratiques se rapportant à l'influence des conditions météorologiques sur la propagation du bruit, pour des sources ponctuelles ou linéaires.

Après une première partie qui rappelle le principe des phénomènes mis en jeu, on définit les échelles de temps qui permettent d'effectuer des observations représentatives.

On donne ensuite, pour une expérimentation particulière, les intervalles de variations et les propriétés des niveaux sonores en fonction des divers états de l'atmosphère.

On poursuit en décrivant les méthodes qui permettent de caractériser les effets météorologiques et d'optimiser, autant que possible, les mesures de bruit faites à grande distance des sources.

On insiste finalement sur le comportement aléatoire des phénomènes observés, en présentant une méthode de simulation permettant de prendre partiellement en compte cet aspect et en décrivant schématiquement les conséquences pratiques que cela entraîne.

**MOTS CLÉS** : 15 - *Météorologie - Bruit - Propagation - Méthode - Niveau sonore - Distance - Mesure - Simulation.*

### Introduction

La prise en compte de l'effet des conditions météorologiques sur le niveau sonore à grande distance est devenue une nécessité. Cet état de fait, induit par la sensibilité accrue des populations aux problèmes des nuisances sonores, a d'ailleurs été pris partiellement en compte dans la nouvelle réglementation acoustique, et en particulier dans celle du bruit routier [1].

Toutefois, si la découverte de cet effet n'est pas nouvelle, sa complexité conduit à une approche prudente et délicate de sa prise en compte. L'estimation, par le calcul ou la mesure, d'un niveau sonore à grande distance constitue pour plusieurs raisons une opération complexe et hasardeuse. Plusieurs phénomènes difficilement maîtrisables sont à l'origine des incertitudes obtenues dès que la distance devient supérieure à une centaine, voire dans certains cas, à une cinquantaine de mètres. Les effets météorologiques, associés aux caractéristiques acoustiques des sols, constituent l'essentiel de ces facteurs. De nombreuses recherches sont menées sur le sujet. Toutefois, elles sont surtout d'ordre théorique, et se rapportent essentiellement à la modélisation de ces phénomènes (par exemple, [2], [3], [4], [5] et [6]).

Dans cet article, nous nous intéressons plus particulièrement aux facteurs météorologiques et à leur prise en compte pratique. En effet, la nécessité d'intégrer ces conditions dans les études de bruit routier impose l'utilisation d'une méthodologie opérationnelle immédiate, même si cette dernière doit être considérée comme provisoire. Nous proposons donc ici d'aborder ce problème du point de vue du praticien, en rappelant l'ordre de grandeur de cet effet et en abordant les conditions de mesure ou d'estimation des conditions micrométéorologiques. Ces éléments doivent permettre, en particulier, de mieux replacer dans leur contexte physique les principes utilisés dans certaines méthodes pratiques de calcul de bruit routier (par exemple, la nouvelle méthode de prévision de bruit (NMPB), destinée à évaluer le bruit des infrastructures routières) et de permettre de mieux interpréter les résultats de calculs ou de mesures.

Toutefois, cet exposé ne traite pas exclusivement du bruit routier. Il présente des informations sur les sources ponctuelles comme sur les sources linéaires.

Plusieurs publications sur ce sujet ont déjà été réalisées dans ce bulletin. Ce document présentant un caractère synthétique, il nous a semblé utile, pour sa clarté, de reprendre certaines informations déjà décrites dans d'autres articles du *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*. Nous y ferons référence pour toutes précisions complémentaires. Par ailleurs, cet article constitue une synthèse du rapport [7], dans lequel on pourra trouver de plus amples informations sur certains sujets traités ici.

### **Aspect temporel des effets météorologiques sur le niveau sonore à grande distance**

On sait que les variations des niveaux sonores à grande distance sont la conséquence de la réfraction des ondes acoustiques, produite par les gradients de température de l'air et de vitesse du vent [7], [8]. Dans la réalité, ces phénomènes ne sont pas stables et les profils verticaux de vitesse de vent et de température varient largement dans le temps, en raison des fluctuations aléatoires des conditions météorologiques. Ces fluctuations peuvent se produire sur quelques fractions de seconde en raison des phénomènes de turbulence, ou sur des durées plus importantes correspondant à des rythmes diurne, saisonnier, annuel ou même de quelques dizaines d'années.

Il s'ensuit que le niveau sonore à grande distance doit être considéré comme une variable aléatoire.

Ainsi, comme toute variable de ce type, sa caractérisation est, toutes choses égales par ailleurs, essentiellement liée à sa durée d'observation.

Compte tenu des phénomènes mis en jeu et de la finalité des résultats acoustiques, il nous semble opportun de considérer que la prise en compte des effets météorologiques dans la propagation du bruit à grande distance puisse s'analyser sur trois échelles de temps différentes :

- > Échelle de « court terme » ;
- > Échelle de « moyen terme » ;
- > Échelle de « long terme ».

#### **Échelle de « court terme »**

Elle correspond à une période pendant laquelle les caractéristiques statistiques des conditions météorologiques peuvent être considérées comme stables. On obtient ainsi des informations météorologiques et acoustiques correspondant à des situations « pures » et supposées constantes.

On peut accéder expérimentalement à ce type d'information en effectuant des mesures météorologiques et acoustiques sur des durées de l'ordre de quelques minutes à quelques dizaines de minutes et en calculant la moyenne des variables météorologiques mesurées. En effet, dans cet intervalle, les conditions météorologiques peuvent être considérées comme localement stationnaires.

Les phénomènes acoustiques observés sur cette échelle de temps peuvent, en général, être correctement modélisés par les modèles de propagation actuels, à condition qu'on leur fournisse un profil de vitesse du son représentatif. Suivant la complexité du modèle, l'atmosphère peut être considérée comme stratifiée ou non, mais toujours stable dans le temps.

#### **Échelle de « moyen terme »**

Elle est fondamentale, puisqu'elle correspond aux durées des périodes de référence. Toutefois, pour être correctement utilisée, elle doit faire appel à des informations présentes dans les deux autres échelles de temps. Il s'agit typiquement d'effets correspondants à des durées pour lesquelles les conditions météorologiques ne sont plus constantes, mais qui peuvent, soit être mesurées, soit être définies par hypothèse. C'est le cas en bruit routier lors de l'évaluation du niveau équivalent sur les périodes de référence 6 h - 22 h et 22 h - 6 h : pendant ces périodes, les conditions météorologiques sont variables, mais peuvent être mesurées *a posteriori* lors de mesures, ou bien définies *a priori*, dans les calculs.

## Échelle de « long terme »

Cette approche est très différente des précédentes, car elle fait appel à une connaissance statistique du phénomène ; elle correspond à la répartition des données de « court terme » ou de « moyen terme » sur une durée suffisamment représentative pour que cette estimation statistique ait un sens et fournisse des résultats robustes.

En particulier, les météorologues considèrent que les durées d'observation doivent, pour être représentatives d'une situation présente, être de l'ordre de trente ans. Pour cette durée, les informations météorologiques peuvent également être considérées comme localement stationnaires. En effet, des moyennes effectuées sur des périodes plus courtes deviennent trop sensibles aux années exceptionnelles. Par contre, la prise en compte de durées plus longues risque d'intégrer des cycles de plus grande période. C'est sur cette durée que sont effectués, en particulier, les calculs correspondant aux « normales saisonnières » bien connues en météorologie.

Les résultats de calcul de « long terme » doivent donc fournir une information qui, pour être représentative, doit intégrer des données météorologiques correspondant à l'ordre de grandeur de cette durée pour minimiser l'imprécision apportée par les fluctuations météorologiques.

Théoriquement, le niveau sonore de « long terme » devrait donc se présenter sous forme statistique, en fournissant, par exemple, la fonction de répartition du  $LA_{eq}(T)$  sur une période de l'ordre de trente ans.

Il est clair que cette caractéristique statistique ne peut pas être mesurée directement et reste donc à première vue inaccessible. Toutefois, la nécessité d'une telle représentation apparaît clairement dès que l'on se pose les questions élémentaires suivantes :

- Comment comparer un résultat de calcul avec une mesure ?
- Quelle précision donner à une mesure lorsque l'on doit la comparer à une valeur réglementaire ?
- Peut-on admettre qu'une mesure puisse dépasser « parfois » un niveau sonore calculé ? Si la réponse est oui, quel pourcentage de risque doit-on prendre ?

La difficulté de fournir des réponses est liée au fait que le niveau sonore à grande distance est considéré dans la réglementation comme une variable déterministe, alors que, dans la réalité, il s'agit d'une variable aléatoire. Comme toute variable de ce type, le niveau sonore doit donc être représenté par une fonction s'apparentant à une densité de probabilité, ou une fonction de répartition.

La figure 1 permet de mieux définir les caractéristiques des différentes variables en présence.

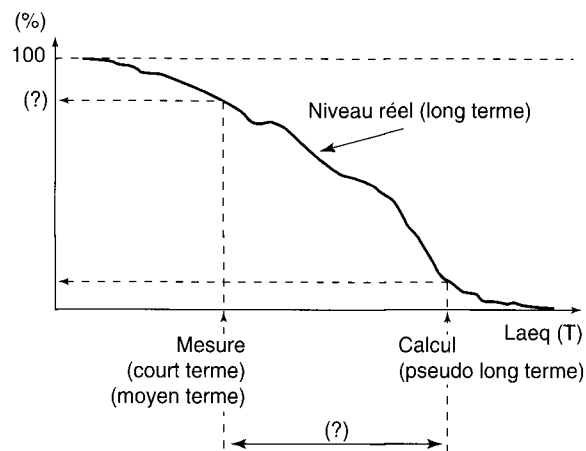


Fig. 1 - Caractéristiques des différentes variables acoustiques.

Prenons, à titre d'exemple, la mesure du niveau équivalent  $LA_{eq}(6\text{ h} - 22\text{ h})$  à grande distance. Supposons que l'on puisse réaliser des mesures de ce niveau équivalent, chaque jour, sur une période de l'ordre de trente ans ; il est évident que nous n'obtiendrons jamais la même valeur. Les résultats se répartiront sur un intervalle plus ou moins important. On peut représenter les variations de ce niveau équivalent par une fonction de répartition complémentaire semblable à celle de la figure 1. Elle représente la répartition du pourcentage de temps pendant lequel un niveau sonore donné est atteint ou dépassé. Le niveau sonore  $LA_{eq}(6\text{ h} - 22\text{ h})$  de « long terme » sera donc représenté par ce type de fonction, et non pas par une valeur unique comme le donne un calcul de « pseudo long terme ».

Par ailleurs, une mesure unique du  $LA_{eq}(6\text{ h} - 22\text{ h})$  peut être considérée comme un échantillonnage de la fonction de répartition. Cette valeur est aléatoire et dépend des conditions météorologiques particulières existant à l'époque de cet échantillonnage. On ne possède, en particulier, aucune information sur sa probabilité de dépassement. Si l'on ne prend aucune précaution particulière, le résultat de la mesure pourra se situer n'importe où dans l'intervalle de variations considéré. Il devient alors illusoire de vouloir comparer les résultats de calculs avec les mesures.

La seule possibilité de comparer mesures, calculs et seuils réglementaires est de tenter de leur associer un intervalle de confiance, déterminé à partir de la connaissance de leurs propriétés statistiques et de mieux comprendre la relation existant entre les fluctuations de niveau sonore à grande distance et les conditions météorologiques. Cette démarche est évidemment très complexe et fait partie d'un programme actuel de recherche des laboratoires des Ponts et Chaussées.

Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de déterminer, d'une façon générale, une caractéristique statistique d'un niveau

sonore à grande distance. On ne connaît donc pas la précision avec laquelle on estime ou on mesure ces niveaux.

La seule parade actuelle à cet état de fait est, comme nous le verrons ultérieurement, de se placer dans les situations météorologiques qui produisent le moins de fluctuations acoustiques. Ainsi, on saura que l'on se situe dans les conditions où l'erreur d'estimation est la plus faible, sans toutefois pouvoir la quantifier.

### Exemples de variations expérimentales des niveaux sonores

Afin de donner un ordre d'idée des effets météorologiques sur les niveaux sonores à grande distance, nous reprenons ici les résultats essentiels de quelques expérimentations réalisées soit sur des sources ponctuelles, soit sur des sources linéaires routières. Ces constatations permettront de montrer de façon pratique les influences des conditions de propagation sur les niveaux sonores ainsi que leurs caractéristiques intrinsèques.

### Exemples de résultats de « court terme » avec des sources ponctuelles

Nous donnons, ci-après, un certain nombre de résultats expérimentaux valables sur un sol parfaitement plat et homogène correspondant à un site qualifié d'« idéal ». Il s'agit de résultats d'une expérience menée dans la plaine de la Crau et qui a déjà fait l'objet d'une description et d'une analyse détaillée dans des articles précédents [9], [10].

### Résultats pour toutes conditions météorologiques confondues

Dans le tableau I, nous présentons les résultats de plusieurs centaines d'échantillons de niveaux sonores de « court terme » (pris sur des durées de 10 min) pour une source ponctuelle placée à 6 m de hauteur sur terrain plat, et pour toutes conditions météorologiques confondues. La source émettait un bruit large bande de niveau constant, avec un maximum de puissance dans les bandes d'octave de 500 et 1 000 Hertz. On peut faire deux types d'observations essentielles sur ce tableau :

- l'écart type des mesures augmente avec la distance ; de plus, il est en général plus important à 1,5 m de hauteur qu'à 6 mètres ;
- la distance minimale à laquelle les effets météorologiques commencent à se faire sentir dépend des conditions de propagation et, en particulier, de la hauteur de la source ou du récepteur. Dans le cas présent, on peut dire que les effets ne sont pas détectables à une hauteur de 6 m, pour les distances de 40 et 80 m de la source. Les variations obtenues sont essentiellement imputables à la précision de la mesure. Par contre, cet effet est sensible à 80 m de distance et 1,5 m de hauteur. Pour généraliser, on peut dire que les effets météorologiques sont détectables dès une cinquantaine de mètres, mais facilement mesurables à partir d'une centaine de mètres.

Dans le cas de mesures de « moyen terme », ces écarts sont évidemment inférieurs à ceux figurant sur ce tableau. Toutefois, pour des conditions opposées, nous avons pu mettre en évidence des écarts de l'ordre de 8 dB(A) à 320 m et de 19 dB(A) à 640 m pour des durées de mesure de neuf heures.

TABLEAU I  
Résultats statistiques d'échantillons de « court terme » obtenus à partir d'une source ponctuelle, placée à 6 m de hauteur, pour toutes conditions météorologiques confondues

Distance source/rec (m)	Hauteur du récepteur (m)	Nombre d'échantillons	Moyenne dB(A)	Écart type dB(A)	Valeur minimale dB(A)	Valeur maximale dB(A)	Étendue dB(A)
40	6	125	94,7	0,9	92,1	97,1	5
80	6	125	88,6	0,8	86,4	90,7	4,3
160	6	195	83,5	1,4	77,7	88,5	10,8
320	6	195	74,2	5,6	52,1	81,8	29,7
640	6	195	63,4	9,4	37	75,2	38,2
80	1,5	125	89,4	1,3	86,2	92,1	5,9
160	1,5	195	79,8	4,4	67,2	85,8	18,6
320	1,5	195	68,4	8,4	52,8	79,6	26,8
640	1,5	195	59,7	11,2	36,2	74	37,8

### Classement des résultats suivant le sens du gradient vertical de vitesse du son

La figure 2 regroupe ces mêmes échantillons en fonction du signe du gradient vertical de vitesse du son. Ces courbes fournissent, en particulier, la dispersion des atténuations du bruit produit pour un récepteur placé à 1,5 m du sol. L'atténuation est calculée entre 20 m et 640 m de la source. Les bandes centrales contiennent au moins 55,6 % des échantillons et les fuseaux extrêmes, au moins 88,9 %.

Nous pouvons noter, en particulier, que :

- > les atténuations pour les gradients positifs sont plus faibles que pour les gradients négatifs. Ce point ne constitue d'ailleurs qu'une confirmation des résultats théoriques ;
- > les dispersions observées par gradient positif sont bien inférieures à celles observées par gradient négatif. Ce résultat est fondamental et montre, en particulier, qu'il est nettement préférable d'es-

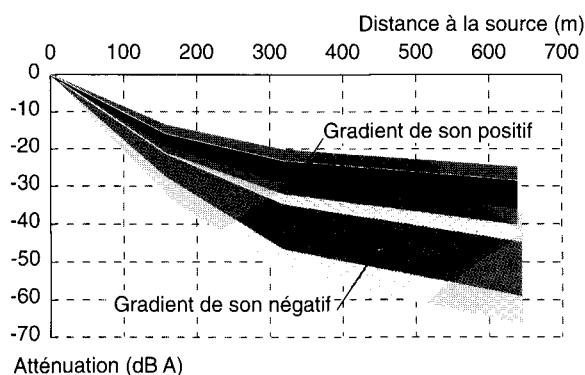


Fig. 2 - Dispersion des niveaux sonores, en fonction du signe du gradient vertical de vitesse du son.

timer un niveau sonore pour des conditions de gradient positif que pour des conditions de gradient négatif.

Cette constatation est valable aussi bien pour un calcul prévisionnel que pour une mesure.

Pour cette raison, il est donc souhaitable que les méthodes de calcul qui prennent en compte les effets météorologiques caractérisent le plus précisément possible la propagation par gradient positif, puisque c'est dans ces conditions que les niveaux sonores sont les plus importants et que leur dispersion est minimale.

### Analyse de l'influence quantitative du gradient vertical de vitesse du son

L'importance du gradient vertical de vitesse du son peut également être mise en évidence sur le graphique de la figure 3, dont les axes sont constitués par les valeurs des gradients verticaux de température et de vent projeté. Pour associer ces informations micrométéorologiques aux conditions météorologiques, nous avons également fait figurer ces dernières sur le graphique.

Nous avons également tracé les courbes correspondant aux gradients verticaux de vitesse du son : le graphique montre l'existence de quatre quadrants correspondant à des compositions variables de ces gradients. Le premier et le troisième quadrants correspondent à un cumul des effets du vent et de la température, alors que le deuxième et le quatrième représentent les zones de compensation de ces effets. Cette compensation peut être totale et le lieu de ce cas particulier est représenté par la

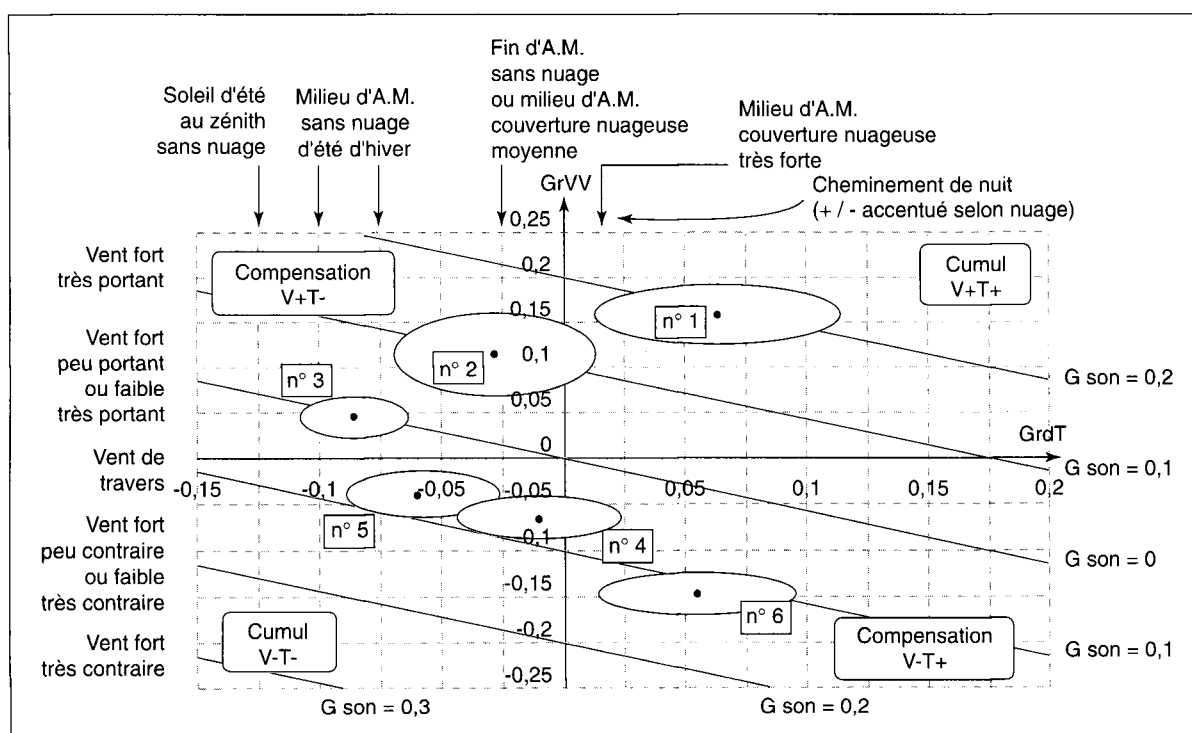


Fig. 3 - Projection d'échantillons acoustiques de « court terme » dans le plan gradient de température - gradient de vent projeté.

courbe  $G_{\text{son}} = 0$ . Elle correspond à la situation de conditions « homogènes ». Cette ligne sépare le plan en deux parties distinctes :

- la surface supérieure correspond au domaine des gradients de vitesse du son positifs, c'est-à-dire à des conditions de propagation « favorables » ;
- la partie inférieure représente la zone des gradients de vitesse du son négatifs produisant des conditions de propagation « défavorables ». Ce type de représentation est à la base de la grille qualitative  $U_i T_i$  décrite ultérieurement, ainsi que dans la référence [11].

Pour illustrer l'influence des conditions météorologiques sur les niveaux sonores, nous avons projeté sur ce plan six groupes d'échantillons expérimentaux homogènes. Chaque groupe est défini sur le graphique par une zone grisée, correspondant à leur caractérisation micrométéorologique moyenne.

La classe 3 peut être considérée comme un groupe ne subissant pas l'influence des conditions météorologiques puisqu'elle est placée sur la courbe  $G_{\text{son}} = 0^{s^{-1}}$ . Elle sert de référence pour les conditions « homogènes ». Les classes 1 et 2 correspondent à des gradients verticaux de vitesse du

son positifs, respectivement de 0,1 et de  $0,2^{s^{-1}}$ , fournissant dans les deux cas des conditions « favorables » à la propagation. Les classes 4, 5 et 6, obtenues en présence de gradients de vitesse de son négatifs, respectivement de  $-0,07$  ;  $-0,08$  et  $-1,2^{s^{-1}}$ , conduisent à une propagation en conditions « défavorables ».

Le tableau II donne les valeurs des atténuations expérimentales différentielles obtenues à plusieurs distances et hauteurs, par rapport à la classe 3 prise comme référence.

Dans le tableau III, on présente, pour l'ensemble des six classes, la valeur des écarts types obtenus.

Ces deux derniers tableaux permettent de faire les remarques suivantes :

- suivant le signe du gradient vertical de vitesse du son, les effets sur le niveau sonore ne sont pas symétriques : ces effets sont plus importants en présence d'un gradient négatif qu'en présence d'un gradient positif ;
- les écarts types de niveaux de bruit mesurés sont plus importants en présence d'un gradient de vitesse de son négatif qu'en présence d'un gradient positif.

TABLEAU II  
Différences de niveau sonore obtenues entre les classes 1, 2, 4, 5 et 6 par rapport à la classe 3 prise comme référence

Distance à la source (m)	Hauteur du récepteur (m)	Classe					
		1 $G_{\text{son}} = 0,2$	2 $G_{\text{son}} = 0,1$	3 $G_{\text{son}} = 0$	4 $G_{\text{son}} = -0,07$	5 $G_{\text{son}} = -0,08$	6 $G_{\text{son}} = -0,12$
160	6	0,4	0	0	2,1	0,7	0,5
	1,5	2,5	2,5	0	-5,1	-6,6	-7
320	6	1,7	-0,3	0	-7,3	-8,8	-13,2
	1,5	7,3	4,6	0	-11,4	-11,5	-16,1
640	6	4,5	3,7	0	-13,3	-13,1	-20,2
	1,5	9,5	8,5	0	-13,4	-12,6	-18,7

TABLEAU III  
Valeurs des écarts types en dB(A) des échantillons de « court terme » pour les différents points de réception considérés

Distance à la source (m)	Hauteur du récepteur (m)	Classe					
		1	2	3	4	5	6
160	6	0,77	1,1	2,5	1,5	1,7	0,6
	1,5	1	1,5	2	3,2	4,3	2,8
320	6	1,5	1,4	1,9	4,2	6	2,9
	1,5	1,3	1,4	2,9	4,2	3,9	2,3
640	6	1,7	2,7	2,4	5,6	6	5,5
	1,5	1,6	2,8	3,3	5,9	4,4	5,5

En conclusion, on peut considérer que les conditions de propagation « favorables » constituent la situation optimale pour estimer les niveaux sonores : lors de mesure, c'est ce type d'état qui fournit la sensibilité minimale aux effets des conditions météorologiques : la répétition de plusieurs mesures indépendantes donnera un écart type minimal. C'est également dans cette situation, où les niveaux sonores sont les plus élevés, que l'on peut garantir une estimation représentative et sécurisante des résultats.

### Exemples de résultats de « court terme » et de « moyen terme » avec des sources linéaires (voies routières) [7]

Dans les exemples suivants, la source est constituée par une voie routière rectiligne. D'un point de vue acoustique, cette structure peut être considérée comme une source linéaire. La direction du vent est prise, par convention, par rapport à la droite obtenue par la projection orthogonale du point récepteur sur la voie routière. Un vent de 0° sera donc constitué par un vent perpendiculaire à la voie routière et soufflant dans la direction route-récepteur.

Précisons qu'une source linéaire et une source ponctuelle n'auront donc pas la même sensibilité par rapport à la direction du vent. En particulier, un récepteur sera théoriquement insensible à l'effet d'un vent soufflant à 90° dans le cas d'une source ponctuelle, alors que cela ne sera pas le cas pour une source linéaire.

#### Exemple de résultats à « court terme »

Ce premier exemple se rapporte à l'étude d'une voie routière rectiligne située sur terrain plat, au niveau du terrain naturel. Il s'agit d'une route nationale à trois voies portant un trafic moyen journalier annuel de 9 900 véh/j avec 15 % de

pois lourds. Des récepteurs étaient placés à 30, 60, 120 et 240 m de la voie. La hauteur des récepteurs était de 3 mètres.

Les relevés micrométéorologiques étaient effectués simultanément à partir d'un mât mesurant la température de l'air ainsi que la vitesse et la direction du vent. Ces données ont permis d'extraire deux périodes de mesure présentant des conditions de propagation « homogènes » et « favorables ».

Les différences observées entre les conditions « favorables » et les conditions « homogènes » étaient de l'ordre de 2 à 3 dB(A) à 60 m et de l'ordre de 5 à 6 dB(A) à 240 mètres.

#### Exemple de résultats à « moyen terme »

Dans cet exemple, la source était une route nationale à 2 x 2 voies ayant un trafic moyen journalier annuel de 38 000 véh/j dont 20 % de poids lourds. Elle était rectiligne et en remblai d'une hauteur de 1,8 m. Le terrain était sensiblement plat. Les récepteurs étaient disposés à 30, 300 et 550 m du bord de la voie routière et à des hauteurs respectivement de 6, 3 et 5 m au-dessus du sol. Les relevés micrométéorologiques ont été réalisés simultanément avec les mesures acoustiques. Le profil en travers est donné sur la figure 4.

Ces mesures, effectuées sur cinq jours et huit nuits, ont permis de sélectionner une période LAeq(22 h - 6 h) en conditions « favorables » et une période LAeq(6 h - 22 h) se rapprochant le plus possible de conditions « homogènes ».

Le tableau IV donne les résultats d'atténuation obtenus entre la référence à 30 m et les deux autres récepteurs.

On constate une différence de l'ordre de 6,5 à 7 dB(A) entre les deux types de propagation. Cette différence est sensiblement constante pour les deux distances de mesure, mais ne constitue pas un résultat généralisable.

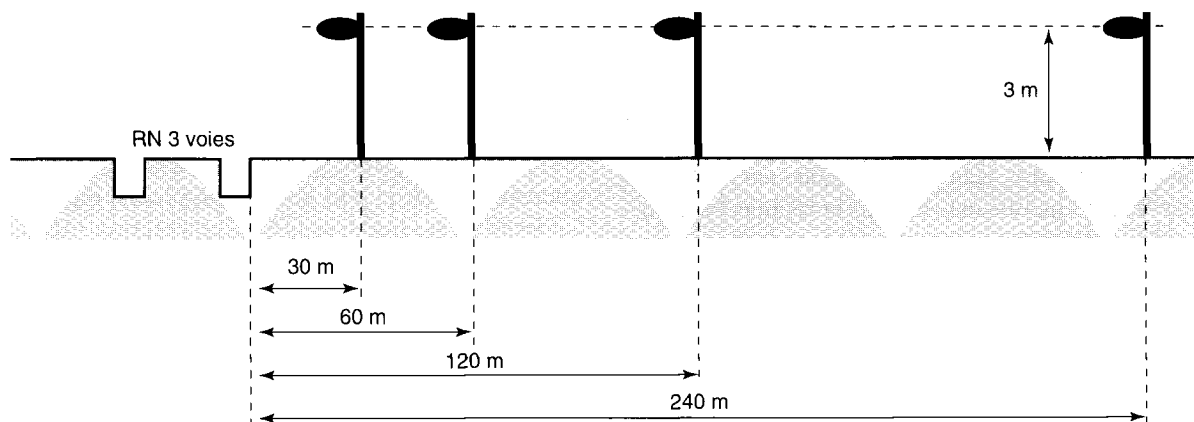


Fig. 4 - Profil en travers du site fournissant la répartition spatiale des microphones pour les mesures de « moyen terme » en conditions « homogènes » et « favorables ».

**TABLEAU IV**  
**Résultats des atténuations de « moyen terme »**  
**obtenues entre la référence à 30 m**  
**et les deux autres récepteurs pour des conditions**  
**de propagation « homogènes » et « favorables »**

Type de propagation	Atténuations* en dB(A) à une distance de	
	270 m	520 m
Homogène	18,2	22,5
Favorable	11,8	15,5

\* Atténuations entre le récepteur à 30 m et les différents autres récepteurs.

### La mesure des conditions météorologiques et du bruit à grande distance

Les exemples donnés dans les paragraphes précédents montrent que la mesure d'un niveau sonore à grande distance doit, pour garantir sa représentativité, être réalisée dans des conditions précises et obligatoirement accompagnée de la caractérisation des conditions météorologiques correspondantes. Nous donnons dans ce paragraphe quelques informations qui permettent de préciser les conditions de mesure du bruit et de la météorologie pour améliorer la représentativité et la précision des mesures obtenues.

#### La caractérisation des conditions météorologiques

Nous avons vu que les fluctuations acoustiques observées à grande distance étaient liées à la forme des gradients verticaux de vent projeté et de température. La caractérisation météorologique des niveaux sonores devra donc être soit directement obtenue par la mesure de ces profils, soit par des informations météorologiques synoptiques qui sont à l'origine de ces gradients.

Nous pouvons donc, en principe, caractériser les conditions météorologiques de deux façons :

- par des informations météorologiques synoptiques qui se rapportent à une échelle régionale. Ces informations sont fournies par les stations météorologiques officielles de Météo France, ou par des réseaux particuliers (par exemple, le réseau de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA). Elles ne fournissent pas des informations sur les profils verticaux de vent et de température, mais des données aérodynamiques et thermiques, en général sur des terrains plats et dégagés, et obéissant à un cahier des charges très précis ;
- par la mesure directe sur le site des profils verticaux de température et de vitesse de vent projeté : ces informations de type microclimatique

intéressent une zone très restreinte et sont mesurables directement sur place par un matériel approprié.

#### Définition des types de sites

##### Le site idéal

Dans beaucoup de cas, on suppose pour simplifier que l'atmosphère est horizontalement homogène, c'est-à-dire que les valeurs de vitesse de vent et de température ne dépendent que de la hauteur du point considéré par rapport au sol et sont indépendantes des coordonnées horizontales.

Ces conditions ne se retrouvent dans la pratique que dans le cas d'un site idéal, ayant les caractéristiques suivantes :

- site plat et horizontal,
- site démuné d'obstacles,
- sol et végétation homogènes,
- absence de grandes masses d'eau à proximité (lacs, rivières),
- site dégagé et homogène bien au-delà de la zone concernée par la propagation du son.

Dans ces conditions, les profils verticaux de vitesse vent et de température obéissent à une loi logarithmique en fonction de la hauteur, et sont indépendants des coordonnées horizontales.

Ces profils peuvent être, sous certaines conditions, modélisés à partir des informations météorologiques synoptiques ou reconstitués dans leur totalité à partir d'informations sur le vent et la température obtenues à deux hauteurs seulement.

##### Le site réel

Il est évident que les conditions idéales se rencontrent très rarement. Dans la réalité, les profils verticaux de température et de vitesse du vent dépendent, en dehors des conditions météorologiques synoptiques, de plusieurs facteurs locaux qui sont liés à la topographie, à la nature du sol, au couvert végétal, etc.

En raison de ces facteurs, les hypothèses de site idéal ne sont plus valables :

- on ne peut plus considérer qu'il existe une corrélation systématique entre les données météorologiques synoptiques et les caractéristiques micrométéorologiques sur un site précis, même si ce dernier est situé très près d'une station météorologique officielle ;
- les profils verticaux ne sont plus logarithmiques et leur allure dépend de leurs coordonnées horizontales.

La détermination des conditions micrométéorologiques d'un site peut donc se révéler très complexe, simplement en raison des hétérogénéités spatiales possibles. De plus, pour une voie rou-



tière et même pour un seul récepteur, il peut exister plusieurs situations micrométéorologiques différentes tout au long du trajet de la propagation acoustique entre l'émetteur et le récepteur.

### Description de méthodes de prise en compte des conditions météorologiques lors de mesures acoustiques

La caractérisation exacte de l'état de l'atmosphère est donc impossible, et seules des méthodes fournissant des informations approchées sont réalisables en pratique.

Ces méthodes doivent permettre la détermination des conditions climatiques à « court terme » et à « moyen terme », puisque ces durées correspondent aux périodes habituelles de mesure.

Suivant le type d'informations initiales utilisées, les caractéristiques des méthodes seront différentes :

■ Les méthodes basées sur des données météorologiques synoptiques utiliseront des informations fournies par les stations météorologiques officielles les plus proches.

En toute rigueur, ce type de méthode ne devrait être utilisé que sur terrain plat, homogène et dégagé pour garantir la bonne corrélation entre les informations synoptiques et leurs effets sur les gradients de vent et de température locaux. Dans la pratique, on utilise cette méthode même si le terrain n'est pas totalement conforme aux conditions du site idéal.

■ Les méthodes dans lesquelles on effectue des mesures directes de profils de vitesse et direction du vent et de température. Ces méthodes utilisent un matériel de mesure spécifique constitué d'un (ou plusieurs) mâts comportant des capteurs de vent et de température.

Plusieurs auteurs ont cherché à classer l'atmosphère en fonction de sa stabilité, soit pour résoudre des problèmes de pollution par des poussières [12], [13], soit pour classer les différentes conditions de propagation du bruit [14].

Nous décrivons ici deux méthodes développées par l'équipe du Laboratoire de bioclimatologie de l'INRA de Bordeaux et le laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers. Elles correspondent à chacune des deux familles définies ci-dessus.

#### Estimation par la grille qualitative

Cette méthode est connue sous le nom de grille  $U_i T_j$  [11]. Elle permet de caractériser directement les conditions de « court terme ». On peut accéder à une caractérisation de « moyen terme », en effectuant un classement des diverses situations de « court terme » observées durant la période de mesure.

Elle se présente sous la forme d'une grille à double entrée donnée sur la figure 5. Les colonnes  $U_1$  à  $U_5$  correspondent aux caractéristiques aérodynamiques de l'atmosphère. Les lignes  $T_1$  à  $T_5$  correspondent à son état thermique.

Les signes -, -, z, + et ++ permettent de distinguer cinq types de propagation du bruit :

- - Atténuation très forte correspondant à des gradients de son fortement négatifs (situation « défavorable »)
- Atténuation assez forte correspondant à des gradients de son négatifs (situation « défavorable »)
- z Effets météorologiques nuls correspondant à un gradient de son nul (situation « homogène »)
- + Augmentation modérée de niveau sonore correspondant à des gradients de son positifs (situation « favorable »)
- ++ Augmentation assez forte de niveau sonore correspondant à des gradients de son fortement positifs (situation « favorable »).

Les cases en gris correspondent à des cas météorologiques impossibles : on ne peut pas avoir simultanément des forts gradients de vent et de température.

Les critères d'entrée de la grille peuvent être définis, soit à partir d'informations météorologiques synoptiques obtenues à la station météorologique la plus proche (vitesse et direction du vent, rayonnement solaire, humidité du sol), soit à partir d'informations microclimatiques mesurées sur place à l'aide d'un mât fournissant des données micrométéorologiques (température, vitesse et de direction du vent) à partir desquelles on calcule les valeurs des gradients de ces facteurs. On peut alors, à partir des limites de classes dans les  $U_i$  et les  $T_j$ , définir les critères d'entrée de la grille qualitative.

	U1	U2	U3	U4	U5
T1		- -	-	-	
T2	- -	-	-	Z	+
T3	-	-	Z	+	+
T4	-	Z	+	+	++
T5		+	+	++	

Fig. 5 - Grille qualitative des effets météorologiques sur le bruit.

À titre d'exemple, nous donnons dans le tableau V des critères d'entrée synoptiques qui peuvent être facilement recueillis sans matériel particulier et qui conviennent bien pour caractériser un type de propagation sur des durées de mesure de « court terme ».

Cette grille a été validée pour des sources ponctuelles et des sources linéaires en donnant dans les deux cas des résultats satisfaisants [7], [11].

La grille qualitative peut donc constituer un moyen simple de caractérisation d'un état de propagation des ondes acoustiques. Toutefois, compte tenu du caractère aléatoire des variables observées, cette caractérisation n'est valable que pour une moyenne sur un nombre suffisant d'échantillons indépendants.

#### Estimation par la mesure directe des variables microclimatiques

Cette méthode consiste à placer, directement sur le site étudié, un ou plusieurs mâts équipés de capteurs permettant de mesurer directement les profils de vent et de température. Chaque mât comporte au moins deux étages de capteurs. Chaque étage est constitué d'un anémomètre et d'un thermomètre ; une girouette unique est suffisante au niveau de chaque mât. La figure 6 donne un exemple d'installation.

Suivant le type de site, et la précision de la caractérisation des conditions microclimatiques, on peut envisager trois types d'équipements de mesure :

■ Cas d'un site plan et homogène. Si le site est suffisamment plat, homogène et dégagé, on peut considérer que les profils verticaux de vent et de température sont assimilables à des exponentielles. Dans ces conditions, un mât équipé de deux étages de capteurs est suffisant. La hauteur des capteurs pourra se situer, par exemple, à 1 et 4 m au-dessus du sol. La connaissance des informations microclimatiques associées à un modèle micrométéoro-

logique permet ultérieurement, par le calcul, d'obtenir une reconstitution satisfaisante des profils verticaux de vitesse du vent et de température. Les sites permettant l'utilisation d'une telle méthodologie restent toutefois relativement rares.

■ Si le site est plus complexe, et présente par exemple des hétérogénéités de nature de végétation, de sol non plan, etc., les profils verticaux de vitesse de vent et de température ne peuvent plus être déduits des résultats obtenus sur deux hauteurs de mesure. Il est nécessaire d'utiliser un mât présentant plusieurs hauteurs de capteurs. La reconstitution des profils est alors plus difficile et peut, soit être approchée par calage avec un modèle micrométéorologique si les caractéristiques du site le permettent, soit par une régression

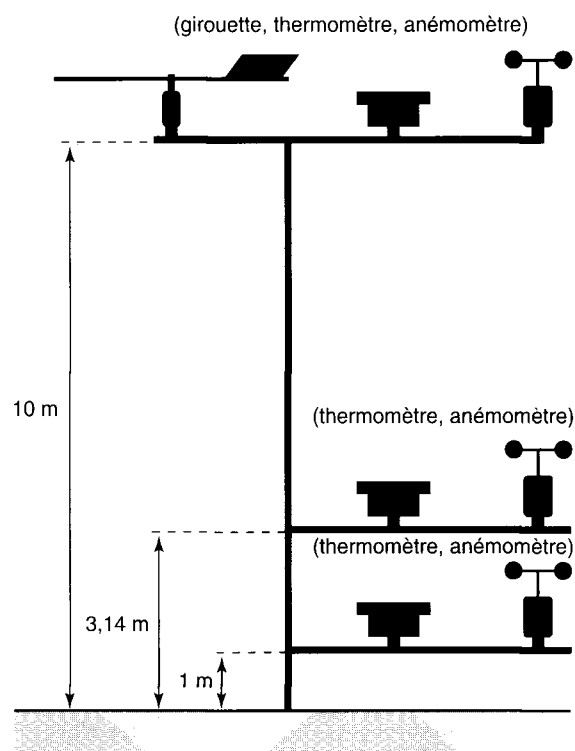


Fig. 6 - Exemple de constitution d'un mât de mesures micrométéorologiques.

TABLEAU V  
Informations météorologiques synoptiques servant de critères d'entrée dans la grille qualitative pour une caractérisation de la propagation pour des mesures de « court terme »

Données synoptiques sur le vent	Données synoptiques sur la température
U <sub>1</sub> : vent fort (de 3 à 5 m.s <sup>-1</sup> à 6 m de hauteur), contraire à la propagation.	T <sub>1</sub> : jour et fort rayonnement et surface sèche et vent faible ou nul.
U <sub>2</sub> : vent faible (de 1 à 3 m.s <sup>-1</sup> à 6 m de hauteur), contraire ou vent fort, peu contraire.	T <sub>2</sub> : jour et [rayonnement moyen ou surface humide ou vent fort] (si toutes les conditions remplies par des « ou » sont remplies on passe en T <sub>3</sub> ).
U <sub>3</sub> : vent nul (< 1 m.s <sup>-1</sup> ) ou vent de vitesse quelconque, de travers.	T <sub>3</sub> : durée horaire contenant le lever du soleil ou le coucher du soleil ou [temps couvert et vent faible et surface non sèche].
U <sub>4</sub> : vent faible portant ou vent fort, peu portant.	T <sub>4</sub> : nuit et [nuageux ou vent faible].
U <sub>5</sub> : vent fort portant.	T <sub>5</sub> : nuit et ciel dégagé et vent faible ou nul.

polynômiale dans les autres cas et si les profils ne peuvent plus être assimilés à des exponentielles. Dans ce cas, la hauteur des points de mesure devra s'étendre de 1 à 10 ou 20 m de hauteur, sur trois à six niveaux de mesure. Pour donner un poids relativement identique à chaque étage de mesure, ces capteurs doivent être répartis en progression géométrique en fonction de la hauteur. Ce type d'équipement correspond au cas le plus fréquemment rencontré.

■ Enfin, dans le cas de sites complexes, présentant des hétérogénéités évidentes constituées, par exemple, par une topographie très tourmentée, il pourra être nécessaire d'implanter plusieurs mâts présentant chacun plusieurs étages de mesure. Cette solution ultime doit évidemment être réservée aux applications de recherche ou d'expertise.

Pour être représentative, cette méthode nécessite de prendre des précautions sur l'emplacement du, ou des mâts : les informations recueillies doivent, en effet, être représentatives des conditions de propagation moyennes existant entre l'émetteur et le récepteur et non d'une portion très localisée du site. Par ailleurs, il est nécessaire d'utiliser des thermomètres à ventilation forcée qui sont les seuls qui permettent une mesure correcte des températures de l'air ambiant.

Les enregistrements des différents capteurs peuvent être utilisés de plusieurs façons :

- on utilise les critères d'entrées microclimatiques de la grille qualitative en se fixant des classes de gradient de vitesse du vent et de température. C'est la méthodologie précédente ;
- on calcule l'évolution du gradient vertical de vitesse du son, à partir duquel on peut faire tous types de traitements : évolution temporelle, histogramme, classement en portions de périodes « favorables », « homogènes », etc.

### **Précautions de mesurage de niveaux sonores à grande distance des sources**

Les descriptions et les résultats des mesures donnés dans les paragraphes précédents permettent de dégager un certain nombre de principes que nous rappelons ici pour permettre une estimation optimale des niveaux sonores.

La mesure d'un niveau sonore à grande distance doit être identifiée à la mesure d'une variable aléatoire en raison des fluctuations produites par les conditions météorologiques. Cette variable aléatoire possède donc une certaine fonction de répartition qui, dans l'état actuel des connaissances, nous est inconnue. On ne peut donc pas connaître l'intervalle de confiance d'un tel type de mesure. Toutefois, la connaissance de l'état des conditions météorologiques lors des mesures

nous permet, *a posteriori*, de déterminer qualitativement la précision des évaluations réalisées. En particulier, elle permet de repérer les cas dans lesquels l'intervalle de confiance de la mesure est minimal, sans pouvoir cependant le quantifier.

En conséquence, la première contrainte permettant de réaliser des mesures représentatives et les plus reproductibles possibles consiste à réaliser des mesures dans des conditions météorologiques conduisant à une propagation favorable des bruits. Ces conditions correspondent à un gradient vertical de vitesse du son positif et sont matérialisées, dans la grille qualitative  $U_i T_i$ , par les classes + + et +.

Il est également possible, mais beaucoup plus délicat, de réaliser des mesures correctes dans des conditions de propagation « homogènes », bien que ces conditions soient peu fréquentes. Il faudra veiller à la stabilité de ces conditions dans le temps, sachant que l'on peut osciller, au cours d'une mesure, de part et d'autre de la propagation « homogène » et aboutir ainsi à un mélange de conditions « favorables » et « défavorables » conduisant à des fluctuations très importantes. La meilleure façon d'estimer la présence dans ce type de conditions est d'utiliser la méthode de mesure des variables microclimatiques, de calculer la valeur du gradient vertical de vitesse du son et d'effectuer les sélections temporelles correspondantes.

Rappelons également que dans les cas de propagation « favorables » les niveaux sonores seront un peu plus élevés que dans les conditions « homogènes » et constituent donc une estimation allant dans le sens de la sécurité.

Pour synthétiser cet aspect, nous donnons, dans le tableau VI, les relations existant entre les informations de la grille qualitative, les caractéristiques de la propagation et les conséquences sur la qualité des mesures.

Une deuxième contrainte de ces mesures est liée à leur durée : comme pour toute variable aléatoire, l'estimation du bruit sera d'autant meilleure que la durée d'observation sera plus longue.

Les mesures de « court terme » précises ne sont donc envisageables que si elles sont répétées, afin d'obtenir des informations moyennées sur des conditions météorologiques semblables. Dans la pratique, il est difficile d'obtenir facilement des conditions météorologiques reproductibles et ces mesures de « court terme » peuvent donc paradoxalement conduire à des durées d'acquisition très longues.

Si les mesures doivent être réalisées sur une durée de « moyen terme », correspondant à une période de référence, il est souhaitable d'envisager la répétition de cette mesure et de moyenniser le résultat

TABLEAU VI  
Caractérisation de la qualité des mesures de bruit suivant les conditions de propagation du son

Classe de la grille $U_i T_i$	Forme des rais	Type de propagation	Niveau sonore au récepteur	Probabilité de présence (par vent faible)	Dispersion des mesures
++	redescendants	« favorable »	élevé	plus courant de nuit que de jour	faible
+	redescendants	« favorable »	assez élevé	plus courant de nuit que de jour	faible
z	rectilignes	« homogène »	(référence)	peu fréquent	moyenne à forte
-	remontants	« défavorable »	faible	plus courant de jour que de nuit	forte
- -	remontants	« défavorable »	très faible	plus courant de jour que de nuit	forte

sous réserve que les caractéristiques statistiques des conditions météorologiques soient semblables. Cette dernière condition est également difficile à satisfaire.

L'obtention de mesures précises nécessite donc des durées d'acquisition très supérieures à la durée d'intégration du niveau sonore équivalent en raison du nombre de répétitions et du tri des conditions météorologiques nécessaires. Dans la pratique, ce sont en général les contraintes économiques qui sont à l'origine des limitations temporelles. La précision se paie, ce qui n'est pas nouveau !

### Éléments pour une estimation des effets de « long terme »

Rappelons que l'échelle de « long terme » est destinée à déterminer les propriétés statistiques des valeurs de « court terme » ou de « moyen terme ». Exprimée en termes de densité de probabilité ou de fonction de répartition, cette caractérisation des niveaux sonores à grande distance ou des conditions microclimatiques devrait permettre, à terme, de déterminer un intervalle de confiance d'une mesure ou de déterminer le pourcentage de temps pendant lequel un niveau seuil est atteint ou dépassé. Ce niveau peut, par exemple, représenter un seuil réglementaire ou une valeur calculée.

Il est bien évident qu'il n'est pas question d'effectuer des mesures micrométéorologiques ou acoustiques sur des périodes de « long terme » et que cette échelle de temps ne peut être qu'approchée par des méthodes de calcul ou de simulation.

Dans l'état actuel, il n'existe pas de méthodes opérationnelles permettant de calculer ces caractéristiques statistiques. Seules quelques méthodes particulières ont été utilisées pour des applications précises. C'est le cas, par exemple, des pourcentages de conditions « favorables » de « long

terme » donnés dans la NMPB : ces valeurs ont été fournies par la grille qualitative  $U_i T_i$ , à partir d'informations synoptiques de longue durée, en calculant le pourcentage d'apparition des conditions ++ et + pour tous les sites décrits et toutes les directions du couple émetteur/récepteur [15].

Une recherche est actuellement menée par le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) d'Angers en collaboration avec le Laboratoire de bioclimatologie de l'INRA de Bordeaux pour tenter de mettre au point une méthodologie fournissant les diverses fonctions de répartition microclimatiques ou acoustiques.

Cette méthode repose sur un modèle micrométéorologique mis au point par l'INRA [16], qui permet de fournir des informations microclimatiques à partir d'informations météorologiques synoptiques journalières recueillies, sur une longue période, sur la station météorologique la plus proche. Le modèle doit également disposer de paramètres spécifiques du site tels que : nature de la couverture végétale, nature du sol, etc.

On obtient ainsi, sur l'ensemble de la période considérée, des échantillons horaires des profils de vitesse du vent et de température qui permettent, à partir de modèles acoustiques prenant en compte les gradients de vitesse du son, d'obtenir des échantillons horaires correspondants de niveau sonore. Dans l'état actuel de la recherche, cette méthodologie est limitée à des sites plans, très proches des stations fournissant les données synoptiques.

Pour donner un aperçu de l'utilisation de ce type de résultats, nous donnons ci-après un exemple qui nous permet de comparer les informations statistiques aux résultats du LAeq(6 h - 22 h), fournis par la NMPB. La source est ponctuelle, placée à 6 m de hauteur et à 320 m d'un récepteur positionné à 1,5 m au-dessus du sol. La source est située exactement au nord du récepteur sur le site d'Angers-Avrillé. Cette géométrie est illustrée sur la figure 7.

Fig. 7 - Disposition géométrique de la source et du récepteur pour une simulation de niveau sonore de « long terme ».

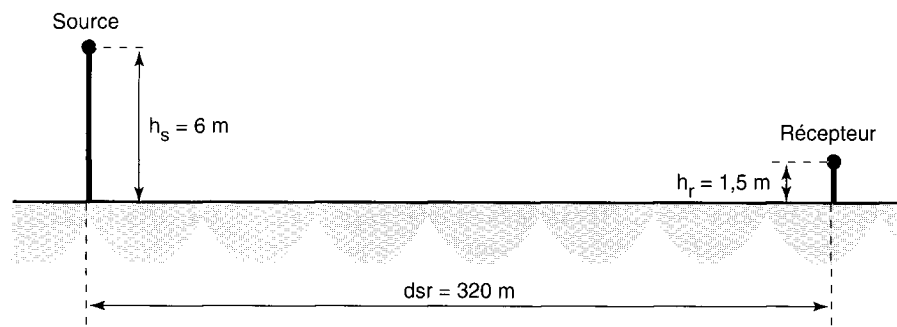
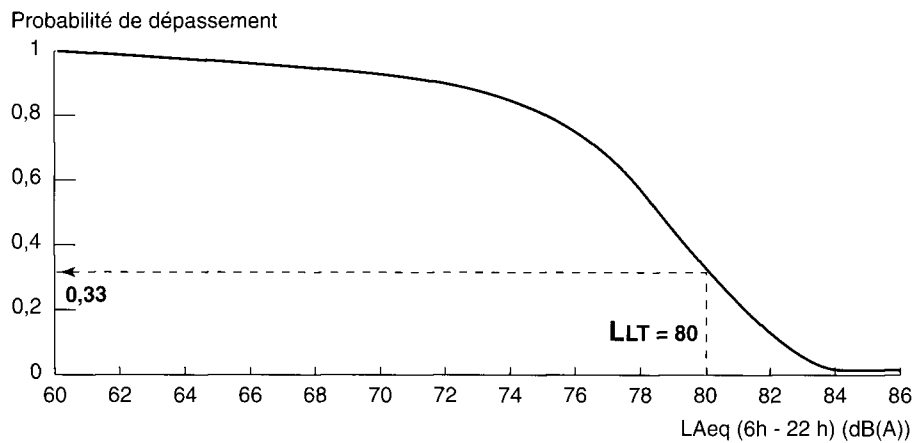


Fig. 8 - Fonction de répartition de « long terme » du LAeq(6 h - 22 h) et comparaison avec le résultat de la NMPB.



Les informations météorologiques synoptiques nous ont été fournies par la station de l'aérodrome d'Angers-Avrillé sur une période de trente ans.

Nous avons déterminé dans, un premier temps, la fonction de répartition du LAeq(6 h - 22 h) à partir de la méthode décrite précédemment. Cette fonction est donnée sur la figure 8.

Dans un second temps, nous avons calculé la valeur du LAeq(6 h - 22 h) à partir de la NMPB, pour les mêmes conditions géométriques et météorologiques. Nous avons obtenu un niveau équivalent de long terme : LLT = 80 dB(A).

En reportant cette valeur sur la fonction de répartition, nous pouvons conclure que, dans les conditions de cette simulation, la NMPB fournit un résultat qui est atteint ou dépassé pendant 33 % du temps sur une période de trente ans.

Nous pouvons également dire que, si nous effectuons au hasard et sans précautions particulières une mesure du LAeq(6 h - 22 h) au niveau du récepteur, nous avons une chance sur trois environ de tomber sur un niveau supérieur à 80 dB(A). Nous constatons aussi que nous n'avons qu'environ 45 chances sur 100 de trouver un niveau sonore situé dans l'intervalle  $80 \pm 2$  dB(A).

Il est clair que cette démarche, encore au stade expérimental, est particulièrement délicate et longue, et reste pour l'instant du domaine de la recherche.

Ce résultat n'a qu'une valeur d'exemple de principe. Il serait dangereux de le généraliser, car il ne concerne qu'un cas très particulier.

Il pose toutefois le problème général du risque de dépassement à prendre en compte : la valeur calculée, dite de « long terme », doit-elle être dépassée au moins une fois lorsque l'on cherchera à la mesurer sur une seule période de référence ? Si la réponse est affirmative, quel doit être ce pourcentage ?

Toutefois, si l'on admet un pourcentage de dépassement, il semble actuellement très difficile d'imaginer des méthodes permettant de vérifier ce seuil.

## Conclusions et perspectives

La prise en compte des effets météorologiques dans la propagation du bruit à grande distance, bien que difficile, est une nécessité. Compte tenu des effets sur la propagation, le niveau sonore doit être considéré comme une variable aléatoire. Cet état de fait rend son estimation ou sa mesure délicates. Nous avons vu, en effet, que les effets produits peuvent se chiffrer, dans certains cas, à plusieurs dizaines de décibels. Actuellement, dans un bon nombre de cas, le niveau sonore obtenu à grande distance continue à être considéré comme une variable déterministe, conduisant à des conclusions souvent non représentatives de la réalité.

Pour être représentative et utilisable, toute mesure de bruit à grande distance doit donc être accompagnée d'une caractérisation pertinente des conditions de propagation. Cette caractérisation peut être réalisée soit à partir d'informations météorologiques synoptiques, soit à partir de mesures sur place des informations microclimatiques. Ces deux méthodes présentent des avantages et des inconvénients qui sont liés, entre autres, à la topographie du site ou à la distance le séparant de stations météorologiques officielles.

Qu'il s'agisse de mesures, de calculs ou de limites réglementaires, on se trouve dans tous les cas confronté aux propriétés statistiques du niveau sonore : en particulier, le problème de la représentativité des mesures est primordial. On ne connaît pas à l'heure actuelle leur intervalle de confiance. Cet état de fait rend, en général, impossible la comparaison d'une mesure avec un résultat de calcul ou un seuil réglementaire.

Dans l'état actuel des connaissances, il est seulement possible de savoir, *a posteriori*, si un ensemble de mesures a été réalisé dans les conditions atmosphériques qui minimisent l'écart type plausible.

D'importantes améliorations doivent donc encore être apportées pour permettre une prise en compte correcte et représentative de l'influence des conditions météorologiques dans la propagation du bruit à grande distance.

Ces recherches doivent surtout se situer au niveau des besoins opérationnels. Il y a actuellement de nombreuses recherches qui sont effectuées dans le monde sur les modèles de propagation dits « exacts ». Il y a certes encore beaucoup de progrès à faire dans ce domaine, mais pour les applications pratiques, ce n'est pas semble-t-il sur ce point qu'il convienne de porter le maximum de nos efforts de recherche : un modèle de calcul, aussi sophistiqué soit-il, ne fournira qu'une qualité de résultats fonction des hypothèses données. Actuellement, la principale difficulté réside dans le choix et la caractérisation des hypothèses liées aux conditions microclimatiques. Le progrès dans ce domaine est donc lié d'abord à une meilleure connaissance des situations micrométéorologiques d'un site et de leurs évolutions dans le temps et dans l'espace. Une modélisation représentative de ces phénomènes, abordée en termes statistiques, permettrait ultérieurement d'aboutir à une représentation réaliste des niveaux sonores observés.

Plus que jamais, une collaboration entre météorologues et acousticiens est indispensable pour traiter ce genre de problèmes, aussi bien dans le domaine de la recherche que dans la pratique opérationnelle.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] *Arrêté du 5 mai relatif au bruit des infrastructures routières.*
- [2] CHEVRET P., BLANC-BENON Ph., JUVE D. (1996), A numerical model for sound propagation through a turbulent atmosphere near ground, *J. Acoust. Soc. Am.*, **100(6)**, décembre, pp. 3587-3599.
- [3] GABILLET Y., SCHROEDER H., DAIGLE G., LESPERANCE A. (1992), Application de la méthode de sommation de faisceaux gaussiens au calcul du champ sonore diffracté par un écran en atmosphère inhomogène, *Journal de Physique IV*, Colloque C1, supplément au *Journal de Physique III*, vol. 2, avril, pp. 553-556.
- [4] BERENGIER M., DAIGLE G.A. (1988), Diffraction of sound above a curved surface having an impedance discontinuity, *J. Acoust. Soc. Am.*, **84(3)**.
- [5] RASMUSSEN K.B. (1986), Outdoor sound propagation under the influence of wind and temperature gradients, *Jour. Sound Vibr.*, **104(2)**, pp. 321-335.
- [6] DAIGLE G.A., EMBLETON T., PIERCY J.E. (1978), Effects of atmospheric turbulence on the interference of sound waves near a hard boundary, *J. Acoust. Soc. Am.*, **64(2)**.
- [7] ZOUBOFF V., LAPORTE J.-C., BRUNET Y. (1997), *Prise en compte pratique de la météorologie dans la propagation du bruit*, rapport LRPC Angers.
- [8] LAPORTE J.-C. (1994), Approche probabiliste de la propagation du bruit en milieu extérieur - Étude bibliographique, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **190**, mars-avril, pp. 75-95.
- [9] ZOUBOFF V., CURRAN F. (1990), Approche expérimentale de l'influence des conditions météorologiques sur la propagation du bruit à grande distance, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **168**, juillet-août, pp. 127-141.
- [10] SÉCHET E., ZOUBOFF V. (1995), Application des méthodes factorielles à la caractérisation des effets météorologiques sur la propagation du bruit à grande distance, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **198**, juillet-août, pp. 67-85.
- [11] ZOUBOFF V., BRUNET Y., SÉCHET E., BERTRAND J. (1994), Validation d'une méthode qualitative d'estimation de l'influence de la météorologie sur le bruit, 3e Congrès français d'Acoustique, *Journal de Physique IV*, Colloque C5, vol. 4, mai, pp. 813-816.
- [12] PASQUILL F. (1974), *Atmospheric diffusion*, ed. Ellis Horwood Limited.
- [13] BRUCE TURNER D. (1961), Relationship between 24-hour mean air quality measurements and meteorological factors in Nashville, Tennessee, *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 11, **10**, pp. 483-489.

- [14] MARSH K.J. (1976), *Specification and prediction of noise levels in oil refineries and petrochemical plants*, Applied Acoustics, (9), pp. 1-15.
- [15] DELAUNAY D., ZOUBOFF V. (1995), *Nouvelle méthode de prévision du bruit routier. Caractérisations météorologiques d'un site*. Document interne du CSTB et du LRPC Angers.
- [16] BRUNET Y., LAGOUARDE J.-P., ZOUBOFF V. (1996), *Estimating long-term microclimatic conditions for long-range sound propagation studies*, 7th Long Range Sound Propagation Symposium. École centrale de Lyon, juillet, pp. 24-26.

#### ABSTRACT

##### **Considering the effects of meteorological conditions on noise propagation A practical approach**

V. ZOUBOFF, J.-Cl. LAPORTE, Y. BRUNET

This paper describes the state of practical knowledge about the influence of meteorological conditions on noise propagation, for both point and linear sources.

The first section provides a basic description of the main phenomena involved and specifies the time scales which provide representative observations.

The intervals of variation and the sound level properties are then given for a variety of atmospheric states for a specific experiment.

The paper continues with a description of the methods which can be used to characterize meteorological effects and to optimize, as far as possible, noise measurements, noise measurements which are made large distances away from the sources.

Finally, the random nature of the phenomena observed is stressed by presenting a simulation method which takes this aspect partially into account and by providing a schematic description of the resulting practical consequences.