

# bruit des infrastructures routières

méthode de calcul  
incluant  
les effets  
météorologiques  
version expérimentale

NMPB - Routes - 96



**Page laissée blanche intentionnellement**

# **bruit des infrastructures routières**

**méthode de calcul  
incluant  
les effets  
météorologiques**  
version expérimentale

NMPB - Routes - 96

janvier 1997

Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme  
et les constructions publiques  
Service d'études techniques des routes et autoroutes  
Laboratoire central des ponts et chaussées  
Centre scientifique et technique du bâtiment

Ce document a été réalisé dans le cadre d'une commande de la Direction des Routes, suite à la parution de l'arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières.

Le comité de pilotage, chargé d'orienter et d'avaliser les choix techniques, était constitué de :

Direction des Routes, Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques, Direction de l'Habitat et de la Construction, Direction des Transports Terrestres, CERTU, CSTB, LCPC, SETRA, SNCF.

Ont contribué à la réalisation de cet ouvrage :

- le CSTB (Yannick Gabillet, Jérôme Defrance)
- le SETRA (Francis Besnard)
- le LCPC (Michel Bérengier)
- le LRPC d'Angers (Vadim Zouboff)
- le LRPC de Clermont-Ferrand (Jean-Claude Laporte)
- le LRPC de Strasbourg (Benoît Dulau)

L'animation du groupe de travail, ainsi que la coordination de la rédaction de cet ouvrage ont été menées par le Certu, département «Environnement, nuisances» (Didier Soulage).

## Avertissement

*La méthode de calcul proposée dans ce document est une innovation par rapport aux pratiques antérieures dans le sens où elle décrit pour la première fois une approche permettant de prendre en compte certaines conditions météorologiques dans la propagation du son, de façon conforme aux réglementations nouvellement en vigueur en France, et notamment à l'arrêté du 5 mai 1995.*

*Il était nécessaire, afin de rendre cette nouvelle réglementation applicable, de proposer, dans un délai très bref, une autre méthode de calcul que celles antérieurement utilisées dans notre pays.*

*Il résulte que cette nouvelle méthode n'a pas encore véritablement subi «l'épreuve du feu» en étant utilisée dans des études opérationnelles, et que des ajustements s'avéreront nécessaires dans les premiers temps de sa mise en application.*

*Précisons toutefois que, même si la méthode est nouvelle, elle reste fondée sur des bases éprouvées (norme ISO 9613-2, formulations théoriques «classiques», ...) et que l'on retrouve couramment des principes assez voisins dans d'autres pays.*

*Il est malgré tout raisonnable de considérer la méthode proposée dans ce fascicule comme expérimentale pendant un délai d'au moins deux ans, et avant publication de la méthode définitive.*

*Les utilisateurs sont d'ailleurs invités pendant cette période à faire part au CERTU et au SETRA de leurs expériences dans l'utilisation de cette méthode de calcul. Un comité de suivi a été constitué à cet effet.*

## Préambule

Les méthodes de prévision du bruit ont subi une forte et rapide évolution du fait de la publication récente de la loi sur le bruit du 31 décembre 1992, et de ses textes d'application, notamment de l'arrêté du 5 mai 1995 relatif à la conception et l'aménagement des voiries routières.

Les spécifications relatives à la protection contre le bruit qui avaient été promulguées avant cette loi, en 1978 puis qui avaient été révisées en 1983, fixaient les seuils à respecter en façade des bâtiments riverains de voiries routières à moins de 65 dB(A), en  $L_{eq}$  (8h-20h). De tels niveaux sonores sont rencontrés «naturellement» à des distances d'environ 200 à 300 mètres des voies routières les plus circulées (autoroute A6, autoroute A13, autoroute A1, boulevard périphérique de Paris, etc.).

Les textes d'application de la loi relative à la protection contre le bruit de décembre 1992, en particulier l'arrêté interministériel du 5 mai 1995, ont ramené ces valeurs limites dans les cas courants (logements situés préalablement en zone calme) à 60 dB(A) en période diurne et 55 dB(A) en période nocturne. De tels niveaux peuvent exister à 800 m, voire 1 km, de distance des autoroutes les plus circulées.

Il était possible, et justifié techniquement, de baser les calculs sur une situation «moyenne» du site du point de vue météorologique dans la situation précédente, qui mettait en jeu des zones éloignées au plus de 200 ou 300 m des voies.

Par contre, il est devenu indispensable de prendre en compte la variation des effets de la météorologie (vent, température) pour prévoir les niveaux sonores aux distances induites par le choix des nouveaux seuils.

Par ailleurs, la demande sociale, constamment exprimée sur ce point lors des enquêtes publiques sur les projets de voiries tendait à exiger que soient prises en compte «les conditions particulières de propagation rencontrées sur tel ou tel site, notamment du fait de ses particularités météorologiques».

Les dispositions à retenir n'étaient pas simples à établir car une telle évolution représentait un saut technologique important pour les services et bureaux d'études qui avaient travaillé jusqu'à présent sur la base des méthodes de prévision des niveaux sonores issues du Guide du Bruit publié en 1980. Elles ont cependant été facilitées par la publication, en 1995, de la norme internationale ISO 9613 qui promulgue une méthode générale de prévision du bruit, tenant compte de l'incidence du vent et de la température, et par l'aboutissement de recherches engagées en France sur ce sujet depuis plusieurs années.

C'est pourquoi la direction des Routes a préconisé que l'article 6 de l'arrêté stipule notamment que «pour les évaluations et prévisions des niveaux sonores à longue distance, c'est à dire supérieure à deux cent cinquante mètres, l'influence des conditions météorologiques sur la propagation des sons, comme le vent et la température, est prise en compte.

Les calculs sont réalisés :

- soit dans des conditions météorologiques particulières qui correspondent aux conditions favorables à la propagation de sons, en faisant appel à une convention de calcul s'inspirant des principes décrits dans la norme ISO 9613 «Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre - Partie 2; Méthode générale de calcul» et en prenant en compte la fréquence de cette situation sur le site.

- soit dans les conditions météorologiques observables sur le site, en utilisant une méthode qui prend en compte ces conditions.

Cependant, l'expression de la méthode, dans la norme ISO 9613, n'était pas totalement opérationnelle, et elle appelait des précisions sur les conditions de son application à une source spécifiquement routière.

C'est la raison pour laquelle il a été demandé aux services techniques du ministère de l'Équipement (CERTU, SETRA, LCPC, CSTB) de préparer une nouvelle méthode, largement basée sur la norme ISO 9613 mais la complétant et la précisant sur les points qui se révéleraient insuffisamment pris en compte dans la norme ISO.

Ceux-ci, après un travail remarquable effectué dans un laps de temps très court (environ six mois) et dans un esprit convergent, ont pu apporter à la méthode ISO 9613 des amendements et compléments significatifs.

La méthode a été testée sur un certain nombre de cas simples et des cas réels, par comparaison avec d'autres méthodes et des mesures réalisées in situ.

Les modèles se sont révélés d'une bonne fiabilité.

Cependant, l'évaluation de la situation de long terme, basée sur le cumul, somme toute conventionnel, de la situation dite «favorable à la propagation des sons» et de la situation «en conditions homogènes» n'a pas encore été totalement validée, notamment par rapport à des valeurs mesurées de niveaux sonores sur de longues périodes (environ une année) et il convient encore de conserver une certaine prudence dans son application.

Des mesures expérimentales seront engagées par le CERTU, le CSTB, le LCPC, le SETRA, pour valider ce modèle. À l'issue de celles-ci, le modèle le plus représentatif de la situation réelle devra être confirmé de façon définitive.

Malgré cette légère incertitude, la technique de prévision du bruit en milieu extérieur a fait, avec la mise en application de la norme ISO 9613 et avec la formulation de la méthode de prévision du bruit routier qui en découle, un progrès décisif, pour lequel l'apport des services d'études et de recherches précités a été essentiel.

C'est pourquoi j'ai demandé que la méthode soit publiée sans plus attendre, et utilisée de façon opérationnelle par les services du ministère de l'Équipement, en attendant la levée des dernières incertitudes sur le point, de portée limitée, évoqué précédemment.

Le Directeur des Routes

A handwritten signature in black ink, consisting of a long horizontal stroke followed by a stylized, cursive flourish.

Christian LEYRIT

# Sommaire

9	<b>Introduction</b>
11	<b>1. Buts et utilisation</b>
13	<b>2. Définitions et notations</b>
13	2.1 Généralités
13	2.2 Définitions
14	2.3 Notations
17	<b>3. Analyse météorologique d'un site</b>
17	3.1 Considérations générales
17	3.1.1 Principe de l'influence des conditions météorologiques sur la propagation du son
18	3.1.2 Effets acoustiques des différents types de profils verticaux de vitesse du son
22	3.1.3 Représentativité des phénomènes dans la réalité et à long terme
22	3.2 Présentation du principe de la méthode de calcul du niveau sonore de long terme
24	3.3 Choix des valeurs d'occurrences météorologiques
24	3.3.1 Occurrences calculées pour la France métropolitaine
26	3.3.2 Cas des autres sites
29	<b>4. Aperçu général de la méthode</b>
33	<b>5. Description de la source</b>
33	5.1 Décomposition des sources
33	5.1.1 Notion de tronçon acoustiquement homogène
33	5.1.2 Position des lignes de sources
34	5.1.3 Décomposition des lignes de sources en sources ponctuelles élémentaires
34	5.2 Données d'émission sonore en entrée
37	<b>6. Analyse de la propagation</b>
37	6.1 Récepteur
37	6.2 Notion de "trajets de propagation élémentaires"

<b>39</b>	<b>7. Calculs sur un trajet élémentaire</b>
<b>39</b>	<b>7.1 Divergence géométrique</b>
<b>39</b>	<b>7.2 Absorption atmosphérique</b>
<b>39</b>	<b>7.3 Effet de sol</b>
<b>40</b>	<b>7.3.1</b> Caractérisation acoustique des sols
<b>40</b>	<b>7.3.2</b> Hauteurs significatives au-dessus du sol
<b>41</b>	<b>7.3.3</b> Calcul en conditions favorables
<b>43</b>	<b>7.3.4</b> Calcul en conditions homogènes
<b>44</b>	<b>7.4 Diffraction</b>
<b>45</b>	<b>7.4.1</b> Principes généraux
<b>46</b>	<b>7.4.2</b> Diffraction pure
<b>47</b>	<b>7.4.3</b> Calcul de la différence de marche
<b>49</b>	<b>7.4.4</b> Calcul de l'atténuation $A_{dif}$
<b>50</b>	<b>7.5 Réflexion sur obstacles verticaux</b>
<b>51</b>	<b>7.6 Éléments particuliers</b>
<b>53</b>	<b>Annexe 1 :</b> <b>Valeurs et cartes d'occurrences météorologiques de long terme des conditions favorables à la propagation sonore</b>
<b>77</b>	<b>Annexe 2 :</b> <b>Éléments de validation</b>
<b>81</b>	<b>Annexe 3 :</b> <b>Exemples d'application</b>

## Introduction

Le présent fascicule a pour objectif de fournir une méthode de calcul de la propagation du bruit routier en milieu extérieur permettant, conformément aux besoins induits par la nouvelle réglementation, de calculer à longue distance des voies et de prendre en compte les effets des conditions météorologiques.

Conformément à l'arrêté du 5 mai 1995 (et notamment son article 6), la méthode proposée ci-dessous est assez proche dans ses principes de la norme ISO 9613-2. Elle en reprend en grande partie les formulations, mais elle en diffère toutefois essentiellement quant au calcul de la correction météorologique permettant d'approcher les niveaux sonores de long terme sur un site.

En effet, la norme ISO décrit une méthode de calcul détaillée dans des conditions atmosphériques particulières favorables à la propagation des sons – qui ne sont qu'une partie de l'ensemble des conditions météorologiques observables sur un site – et propose in fine une correction forfaitaire permettant d'estimer la valeur des niveaux de bruit réels de long terme (le niveau de bruit réel de long terme est celui qui résulte de l'ensemble des conditions météorologiques observables sur un site, ainsi que de leurs occurrences). Il nous a paru que cette manière de procéder (calcul détaillé dans des conditions particulières et correction forfaitaire pour se ramener à une situation de long terme) n'était pas satisfaisante au regard des exigences de la réglementation française et des spécificités du territoire national où la topographie diversifiée rend inadaptée l'application d'une valeur forfaitaire unique.

C'est pourquoi la méthode de calcul décrite dans ce document propose une alternative à la norme ISO 9613-2 pour calculer les niveaux sonores de long terme : les calculs sont conduits de façon détaillée dans deux types de conditions météorologiques bien distinctes :

- 1 - conditions favorables à la propagation des sons,
- 2 - conditions atmosphériques homogènes (celles correspondant aux méthodes de calcul antérieurement utilisées en France).

Le résultat final est ensuite obtenu en cumulant énergétiquement les niveaux sonores observés dans ces deux types de conditions, pondérés par leurs occurrences effectives sur le site considéré. Cela revient à reconstruire un profil de variation des conditions atmosphériques au cours d'une longue période, en assimilant les conditions défavorables à la propagation (celles où le bruit reçu est moins fort) à des conditions homogènes, ce qui va dans le sens d'une meilleure protection des riverains.

Par conséquent, la méthode de calcul décrite ici n'a pas pour ambition de simuler l'ensemble des conditions météorologiques observables sur un site, mais de les approcher en les représentant par deux types de situations atmosphériques conventionnelles.

Contrairement à la norme ISO 9613-2 qui suppose que les niveaux de bruit en dehors des conditions atmosphériques favorables à la propagation des sons sont négligeables, nous les prenons en compte ici en les majorant par des niveaux de bruit en conditions homogènes. Ce choix va dans le sens d'une meilleure approximation des niveaux de bruit de long terme auxquels sont soumis les riverains.

Par ailleurs, la norme ISO 9613-2 possède certaines lacunes lorsqu'il s'agit de traiter des problèmes spécifiques aux infrastructures de transport (hauteurs de source, profil en travers des voies, ...). La présente méthode de calcul propose des solutions pour combler ces lacunes.

## 1. Buts et utilisation

La méthode de calcul exposée ici a été essentiellement mise au point dans le but d'offrir aux bureaux d'études et aux services du ministère de l'Équipement un outil de prévision des niveaux sonores à plus de 250 m des voies prenant en compte les effets des conditions météorologiques.

Elle permet de calculer des niveaux sonores  $L_{Aeq(22h-6h)}$  et  $L_{Aeq(6h-22h)}$  conformément aux réglementations en vigueur.

Pour des raisons de cohérence, cette méthode a été pensée pour pouvoir être utilisée également à moins de 250 m de distance des voies. Elle propose donc un outil complet de calcul de la propagation du bruit des infrastructures routières.

Le présent fascicule expose une méthode de calcul détaillée, travaillant par bandes d'octaves de 125 Hz à 4 kHz, et basée sur une décomposition des sources en sources ponctuelles. Son utilisation manuelle, sans l'aide de l'informatique, en sera donc très limitée. Il est prévu de le compléter par une méthode plus simplifiée, directement issue de celle-ci, mais réalisant des calculs en dB(A).

Dans cette première version, on ne traite que du bruit routier. La méthode pourra facilement être adaptée au bruit ferroviaire par la suite.

Précisons enfin que l'on ne traite pas des valeurs d'émission sonore, mais uniquement de la propagation du son. Il convient de se référer à d'autres documents en vigueur pour obtenir ces valeurs.

On trouvera en figure 1 ci-après l'organigramme général de la méthode de calcul présentée dans ce document.

La limite de validité des calculs en distance est de 800 m pour une distance normale à la voie et un récepteur situé à plus de 2 m au-dessus du sol. Le domaine de validité en distance s'accroît lorsque l'altitude du point récepteur par rapport au sol augmente.

Le lecteur trouvera en annexe 3 un exemple d'application de cette méthode de calcul permettant de le guider dans sa démarche et de lui fournir des valeurs guides.

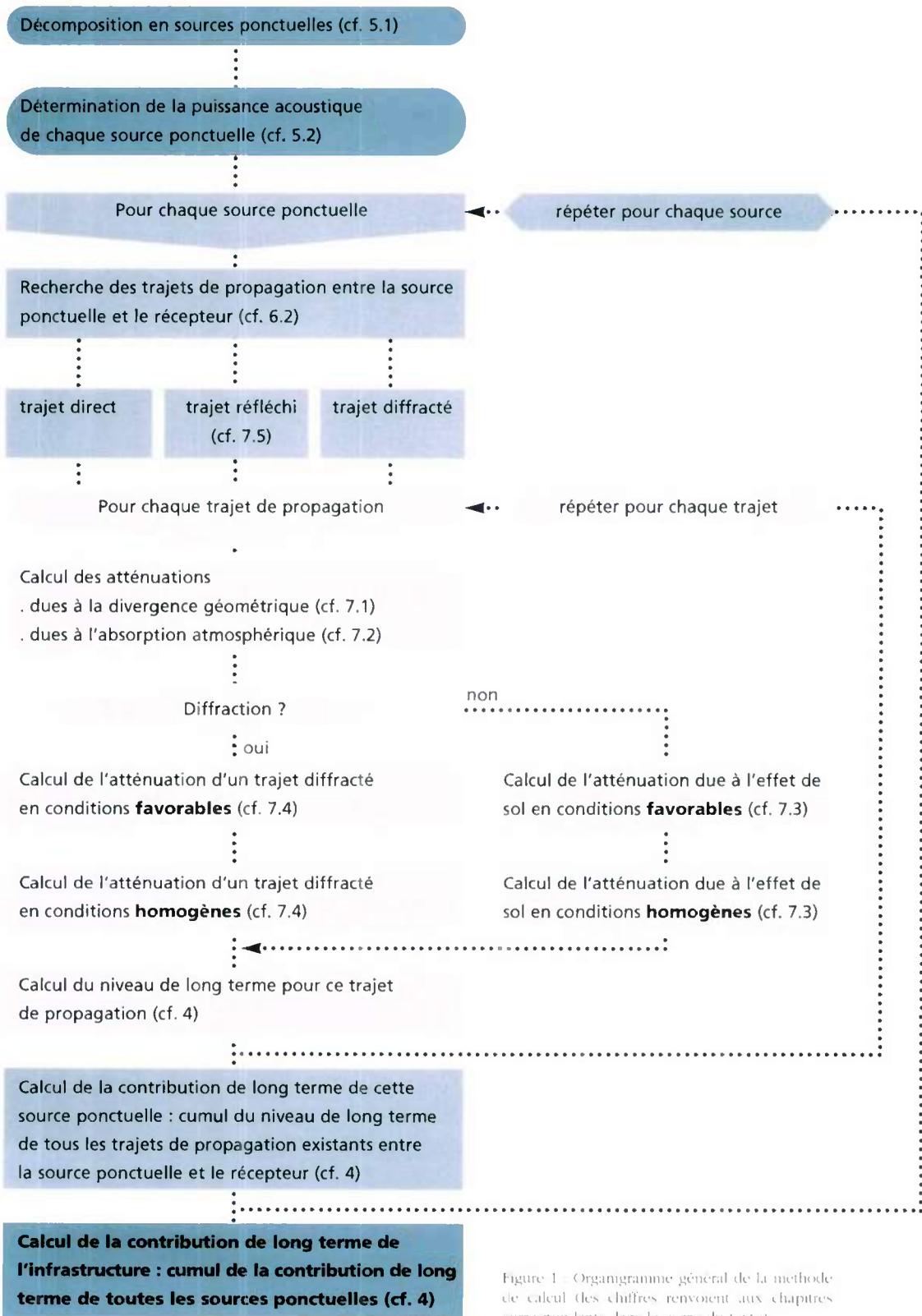


Figure 1 : Organigramme général de la méthode de calcul (les chiffres renvoient aux chapitres correspondants dans le corps du texte)

## 2. Définitions et notations

### 2.1 Généralités

Toutes les distances, hauteurs, cotes et altitudes utilisées dans ce document sont exprimées en mètres (m).

La notation «MN» désigne la distance entre les points M et N, mesurée selon la ligne droite joignant ces points.

Par convention, les hauteurs vraies mesurées verticalement par rapport au terrain sont notées par la lettre h ; les hauteurs équivalentes mesurées orthogonalement par rapport au plan de sol moyen sont notées par la lettre z.

Les niveaux sonores, notés par l'initiale «L», sont exprimés en dB par bandes d'octaves lorsque l'indice «A» est omis. Les niveaux sonores en dB(A) sont affectés de l'indice «A». Lorsque cette méthode est utilisée à des fins réglementaires (application de l'arrêté du 5 mai 1995, par exemple), les hypothèses de calcul retenues doivent être représentatives d'une moyenne annuelle.

### 2.2 Définitions

La sommation des niveaux sonores dus à des sources incohérentes entre elles est notée par le signe  $\oplus$  conformément à la définition suivante :

$$L_1 \oplus L_2 = 10 \lg \left[ 10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} \right]$$

NB : «lg» est la notation normalisée pour la fonction logarithme décimal (parfois notée également «log»).

Conditions atmosphériques homogènes (ou «conditions homogènes») : Ensemble de conditions atmosphériques conduisant à une atmosphère homogène du point de vue de la propagation du son. Dans ces conditions, l'énergie acoustique se propage en ligne droite (voir explication physique au paragraphe 3.1.2).

Conditions atmosphériques favorables à la propagation des sons (ou «conditions favorables») : Ensemble de conditions atmosphériques produisant une redescente de l'énergie acoustique vers le sol et conduisant à des niveaux sonores au récepteur supérieurs à ceux observés en conditions homogènes (voir explication physique au paragraphe 3.1.2).

Conditions atmosphériques défavorables à la propagation des sons (ou «conditions défavorables») : Ensemble de conditions atmosphériques produisant une remontée de l'énergie acoustique vers le ciel et conduisant à des niveaux sonores au récepteur inférieurs à ceux observés en conditions homogènes (voir explication physique au paragraphe 3.1.2).

Trajet direct: ligne droite reliant la source S et le récepteur R (voir figure 10).

## 2.3 Notations

$\delta$	différence de marche, en m, intervenant dans les calculs de diffraction
$\lambda$	longueur d'onde, en m, à la fréquence centrale $f_C$ d'une bande octave donnée: $\lambda=c/f_C$
$\gamma$	rayon de courbure du trajet de propagation en conditions favorables
$\Delta_{dif}$	atténuation due à la diffraction pure (i.e. sans prise en compte des effets de sols)
$\Delta h$	terme correcteur de hauteur, en m, destiné à prendre en compte la courbure des rayons en conditions favorables (voir figure 17)
$\alpha_r$	coefficient d'absorption acoustique de la paroi d'un obstacle
A	point d'intersection d'un trajet direct avec la surface d'un obstacle diffractant
A'	point fictif introduit pour le calcul de la diffraction en conditions favorables
$A_{atm}$	atténuation due à l'absorption atmosphérique dans une bande d'octave donnée (en dB)
$A_{dif, F}$	atténuation due à la diffraction en conditions favorables dans une bande d'octave donnée (en dB)
$A_{dif, H}$	atténuation due à la diffraction en conditions homogènes dans une bande d'octave donnée (en dB)
$A_{div}$	atténuation due à la divergence géométrique dans une bande d'octave donnée (en dB)
$A_{i, F}$	atténuation due à la propagation entre $S_i$ et R en conditions favorables dans une bande d'octave donnée (en dB)
$A_{i, H}$	atténuation due à la propagation entre $S_i$ et R en conditions homogènes dans une bande d'octave donnée (en dB)
$A_{m, F}$	atténuation due à l'effet de sol en zone intermédiaire en conditions favorables (en dB)
$A_{r, F}$	atténuation due à l'effet de sol en zone récepteur en conditions favorables (en dB)
$A_{s, F}$	atténuation due à l'effet de sol en zone source en conditions favorables (en dB)
$A_{sol, F}$	atténuation due à l'effet de sol en conditions favorables dans une bande d'octave donnée (en dB)
$A_{sol, H}$	atténuation due à l'effet de sol en conditions homogènes dans une bande d'octave donnée (en dB)
c	célérité du son dans l'air, prise égale à 340 m/s
d	distance directe entre deux points, sans prendre en compte les éventuels obstacles existants entre les deux points, en m. En l'absence de réflexion, c'est la longueur du trajet direct (voir figure 11). Lorsqu'il y a réflexion sur un obstacle c'est la longueur totale du trajet en l'absence d'obstacles diffractants.
$d_p$	distance de propagation entre deux points (en m). C'est la distance directe projetée sur le plan de sol moyen perpendiculairement à celui-ci (voir figure 11)
e	distance entre les points de diffraction extrêmes dans le cas de diffractions multiples, en m
$E_{PL}$	émission sonore d'un poids-lourd, en dB(A) (mêmes conditions que $E_{VL}$ )
$E_{VL}$	émission sonore d'un véhicule léger, en dB(A) (correspond au niveau $L_{Aeq}(1h)$ à 30 m de distance du bord d'une plateforme routière de 28 m de large et à 10 m au-dessus du sol produit par le passage d'un véhicule léger, pour une propagation en l'absence d'obstacle sur un sol plan parfaitement réfléchissant et une route rectiligne infiniment longue posée sur le sol). Voir «Guide du Bruit des Transports Terrestres - Prévission des niveaux sonores»

$f_c$	fréquence centrale d'une bande d'octave donnée, en Hz (125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz)
$G$	coefficient de sol (sans dimension, compris entre 0 et 1). Caractérise l'absorption acoustique d'un sol (voir 7.3.1)
$G_m$	coefficient de sol en zone intermédiaire
$G_r$	coefficient de sol en zone récepteur
$G_s$	coefficient de sol en zone de source
$G_{\text{trajet}}$	coefficient de sol le long d'un trajet de propagation
$G'_{\text{trajet}}$	coefficient de sol équivalent le long d'un trajet de propagation
$h_r$	hauteur verticale de $R$ au-dessus du sol, en m (voir figure 11)
$h_s$	hauteur verticale de $S$ au-dessus du sol, en m (voir figure 11)
$k$	nombre d'onde pour une bande d'octave donnée, en $m^{-1}$ : $k = 2\pi f_c/c$
$L_{\text{Aeq,LT}}$	niveau sonore global de long terme $L_{\text{Aeq}}$ dû à l'ensemble des sources et sources images au point $R$ (en dB(A))
$L_{\text{eq,LT}}$	niveau sonore de long terme $L_{\text{eq}}$ dû à l'ensemble des sources et sources images au point $R$ dans une bande d'octave donnée
$L_{i,F}$	niveau sonore $L_{\text{eq}}$ dû à la source $S_i$ au point $R$ en conditions favorables dans une bande d'octave donnée (en dB)
$L_{i,H}$	niveau sonore $L_{\text{eq}}$ dû à la source $S_i$ au point $R$ en conditions homogènes dans une bande d'octave donnée (en dB)
$L_{\text{Awi}}$	Niveau de puissance acoustique d'une source $S_i$ dans une bande d'octave donnée (en dB(A))
$O$	point de diffraction
$p$	occurrence de conditions favorables sur une période de long terme dans une direction donnée
$p_i$	occurrence de conditions favorables sur une période de long terme dans la direction du trajet direct entre $S_i$ et $R$
$Q_{\text{PL}}$	débit horaire de poids-lourds (en véhicules/h)
$Q_{\text{VL}}$	débit horaire de véhicules légers (en véhicules/h)
$R$	point récepteur
$R'$	récepteur image
$S$	source ponctuelle (notée également $S_i$ pour désigner la source ponctuelle de numéro $i$ dans une ligne de sources)
$S'$	source image
$z_{0,r}$	hauteur équivalente de $O$ mesurée perpendiculairement au plan de sol moyen côté récepteur, en m (voir figure 13)
$z_{0,s}$	hauteur équivalente de $O$ mesurée perpendiculairement au plan de sol moyen côté source, en m (voir figure 13)
$z_r$	hauteur équivalente de $R$ mesurée perpendiculairement au plan de sol moyen, en m (voir figure 11)
$z_s$	hauteur équivalente de $S$ mesurée perpendiculairement au plan de sol moyen, en m (voir figure 11)

**Page laissée blanche intentionnellement**

### 3. Analyse météorologique d'un site

#### 3.1 Considérations générales

##### 3.1.1 Principe de l'influence des conditions météorologiques sur la propagation du son

La compréhension des phénomènes physiques à l'origine des fluctuations acoustiques à grande distance est importante pour analyser correctement les résultats de niveaux sonores mesurés ou calculés.

L'effet des conditions météorologiques est mesurable dès que la distance source-récepteur est supérieure à une centaine de mètres, et croît avec la distance. Il est d'autant plus important que le récepteur ou l'émetteur sont proches du sol.

À titre d'illustration de ce phénomène, le tableau suivant présente des résultats expérimentaux du niveau sonore équivalent sur 10 minutes obtenus sur terrain plat, avec une source ponctuelle, pour une grande variété de conditions météorologiques :

distance source/récepteur	Écarts entre niveaux mini et maxi dB(A)	Écart-type dB(A)
160 m	18,6	4,4
320 m	26,8	8,4
640 m	37,8	11,2

Tableau 1 : Exemple de variations mesurées du niveau sonore dues aux effets météorologiques (source ponctuelle à 6 m de hauteur - récepteur à 1,50 m de hauteur)

Il convient toutefois de souligner que ces valeurs sont obtenues pour des durées relativement courtes. Les variations obtenues sur des niveaux moyens correspondant à des durées plus longues sont évidemment plus faibles, mais restent encore considérables.

La variation du niveau sonore à grande distance est due à un phénomène de réfraction des ondes acoustiques dans la basse atmosphère. Cette réfraction est due à la variation de la vitesse du son dans la zone de propagation, produite par les variations spatiales de la température de l'air et de la vitesse du vent.

On peut dire que de façon générale, sur terrain plat et en valeur moyenne, ces caractéristiques micrométéorologiques ne dépendent que de la hauteur au-dessus du sol, c'est-à-dire qu'elles sont sensiblement identiques sur un plan horizontal, pour une hauteur donnée. Il s'en suit que les phénomènes de réfraction des ondes acoustiques seront surtout sensibles dans un plan vertical. En considérant une distance maximale source-récepteur de l'ordre de 800 mètres (et en considérant la source et le récepteur au sol), la hauteur d'atmosphère intéressée par le phénomène est de l'ordre de 30 mètres.

On caractérise le type de propagation du son par le profil vertical de vitesse du son ou par son gradient vertical. Suivant la forme de ce profil, la propagation se fera dans des conditions différentes.

### 3.1.2 Effets acoustiques des différents types de profils verticaux de vitesse du son

Les facteurs thermiques et aérodynamiques influent sur la vitesse du son :

**Facteurs thermiques:** les échanges thermiques entre le sol et la couche basse de l'atmosphère conduisent à une variation de la température de l'air en fonction de la hauteur au-dessus du sol, et donc à une variation de la vitesse du son.

**Facteurs aérodynamiques:** compte tenu de l'état de rugosité de surface du sol, la vitesse du vent est toujours plus élevée en hauteur qu'au niveau du sol. Dans une situation donnée, la vitesse du son en présence de vent correspond à la somme algébrique de la vitesse du son en l'absence de vent et de la projection du vecteur vent sur la direction de propagation considérée. Cette vitesse varie donc en fonction de la hauteur au-dessus du sol.

Schématiquement, on peut considérer qu'il existe 3 types principaux de propagation dépendant de la forme du profil vertical de vitesse du son :

#### a) Propagation du son par gradient vertical négatif

**Origine thermique:** dans ce cas, la température décroît avec la hauteur au-dessus du sol. Ce phénomène se produit pendant la journée: le soleil chauffe le sol, ce dernier communique sa chaleur aux basses couches de l'atmosphère, il s'en suit que la température de l'air au voisinage du sol est plus élevée qu'en hauteur. La vitesse du son décroît avec la hauteur par rapport au sol.

**Origine aérodynamique:** lorsque le vent souffle en direction opposée à la direction de propagation du son, la vitesse du vent vient se soustraire à celle de la vitesse du son en atmosphère immobile. La vitesse du son, dans la direction de propagation, diminue donc avec la hauteur au-dessus du sol.

L'effet acoustique de ces conditions thermiques ou aérodynamiques peut être représenté sur le schéma suivant :

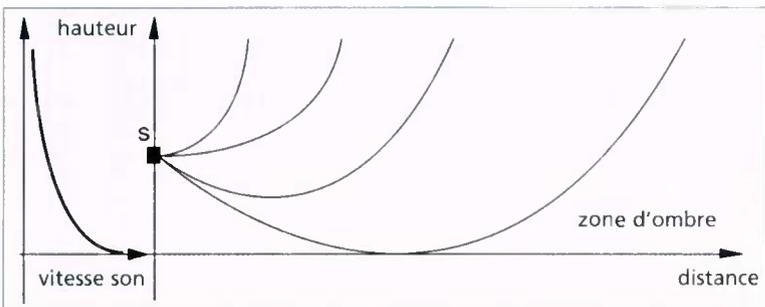


Figure 2 Propagation sous conditions défavorables

Les rayons acoustiques sont remontants. Dans ces conditions, le niveau sonore à grande distance est plus faible qu'en l'absence d'effets météorologiques. Il existe même une

«zone d'ombre» dans laquelle aucun rayon acoustique direct ne pénètre, et où le niveau sonore, très faible, n'est produit que par les phénomènes de diffraction et de turbulence. Ce type de conditions est donc défavorable à la propagation du son. Dans la suite de ce document il est qualifié, de façon raccourcie, de «conditions défavorables».

### b) Propagation du son par gradient vertical positif

**Origine thermique:** la nuit, lorsque le ciel est dégagé, le sol rayonne et se refroidit plus facilement que l'air. Les basses couches de l'atmosphère deviennent plus froides que les couches supérieures, et la température de l'air croît avec la hauteur au-dessus du sol. Cette situation est qualifiée «d'inversion de température», correspondant à une situation de gradient vertical de vitesse du son positif.

**Origine aérodynamique:** si la direction du vent correspond à la direction de propagation de l'onde acoustique, la somme algébrique de la vitesse du son en atmosphère homogène et de la vitesse du vent fournira un profil de vitesse du son qui augmente avec la hauteur.

L'effet acoustique de ces conditions correspond au schéma suivant :

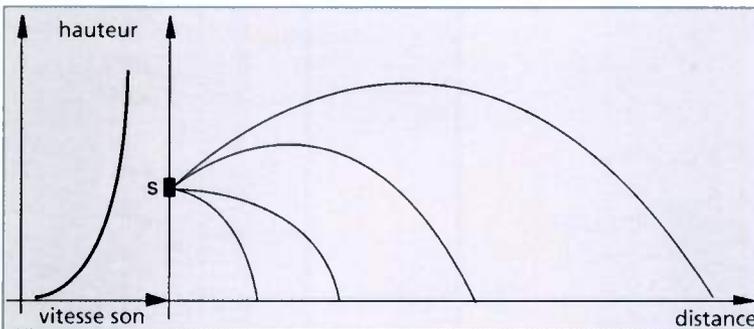


Figure 3 : Propagation sous conditions défavorables.

Les rayons acoustiques sont redescendants. Dans ces conditions, le niveau sonore à grande distance est plus élevé qu'en l'absence d'effets météorologiques. Cette situation météorologique est donc favorable à la propagation du son. Dans la suite de ce document elle est qualifiée, de façon raccourcie, de «conditions favorables».

Par exemple, de jour, les conditions favorables sont obtenues pour des vents portants depuis la source vers le récepteur de vitesse supérieure à 1,5 m/s par temps couvert et supérieure à 3 m/s par temps ensoleillé. De nuit, ces conditions sont obtenues en l'absence de vent ou par vent portant (on considère que l'inversion de température est systématique).

### c) Propagation par gradient vertical de vitesse de son nul

La probabilité de présence conjointe de situations thermiques et aérodynamiques données sur un site est très variable. En particulier, les situations micrométéorologiques qui induisent une absence de ces effets sont relativement rares. Ceci se traduit d'un point

de vue acoustique par l'absence de gradient vertical de vitesse du son. Ce phénomène peut se produire dans deux types de circonstances :

- Lorsque la vitesse du vent est totalement nulle ET que la température de l'air est constante en fonction de la hauteur au-dessus du sol. Ceci se produit en général de façon fugace à proximité du lever et du coucher du soleil, ou dans des conditions de couverture nuageuse épaisse et totale.
- Lorsque les effets thermiques et aérodynamiques ont tendance à se compenser. C'est le cas, par exemple, de la présence d'un vent contraire à la direction de propagation, de nuit, lorsque le ciel est dégagé, ou encore par une journée fortement ensoleillée avec présence d'un vent portant moyen ou faible. Toutefois, cette compensation ne peut se faire que pour des valeurs bien précises de ces phénomènes, et elle ne se fait pas nécessairement pour toutes les hauteurs.

Ces conditions conduisent à une propagation sonore en rayons rectilignes (figure 4).

Ces deux phénomènes sont donc relativement rares, et la propagation du son en l'absence de gradient vertical de vitesse du son doit plus être considérée comme une frontière entre les deux modes de propagation précédents que comme un mode de propagation à part entière. Dans la suite de ce document, nous définirons cette situation comme «homogène», en sous-entendant qu'il s'agit de conditions de propagation dans un milieu homogène.

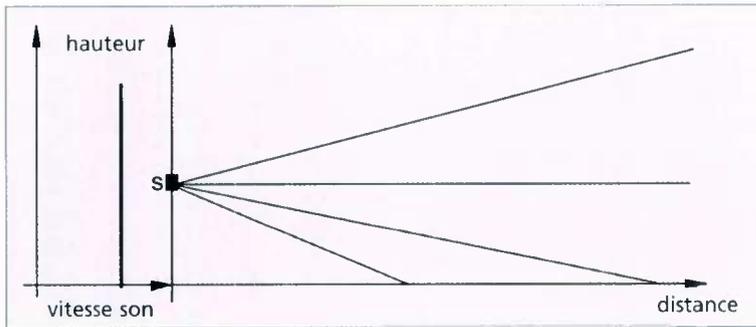


Figure 4 - Propagation sous conditions «homogènes»

#### d) Combinaison de ces phénomènes en situation réelle

Dans la réalité, les conditions thermiques et aérodynamiques sont relativement indépendantes, et on peut observer fréquemment des situations météorologiques incluant des effets de compensation partielle des phénomènes de réfraction.

Pour résumer toutes ces possibilités, nous donnons sur la figure 5 une grille à double entrée qui permet de connaître la variation qualitative du niveau sonore obtenu à grande distance, en fonction de facteurs météorologiques observables.

Les colonnes U1 à U5 caractérisent l'état du vent, alors que les lignes T1 à T5 correspondent aux données thermiques observées.

Les conditions d'entrée (  $U_i$ ;  $T_i$  ) de la grille répondent aux critères suivants:

**U1** : vent fort (3 à 5 m/s) contraire au sens émetteur-récepteur  
**U2** : vent moyen à faible (1 à 3 m/s) contraire **ou** vent fort , peu contraire  
**U3** : vent nul **ou** vent quelconque de travers  
**U4** : vent moyen à faible portant **ou** vent fort peu portant (  $\approx 45^\circ$  )  
**U5** : vent fort portant

**T1** : jour **et** fort rayonnement **et** surface sèche **et** peu de vent  
**T2** : mêmes conditions que T1 mais au moins une est non vérifiée  
**T3** : lever du soleil **ou** coucher du soleil **ou** (temps couvert **et** venteux **et** surface pas trop humide)  
**T4** : nuit **et** (nuageux **ou** vent)  
**T5** : nuit **et** ciel dégagé **et** vent faible

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

Figure 5 : Grille qualitative permettant d'estimer l'influence des facteurs météorologiques sur les niveaux de bruit

Dans la grille de la figure 5, on peut distinguer 5 types de propagation:

- Atténuation très forte correspondant à des rayons acoustiques fortement remontants (situation «défavorable»)
- Atténuation assez forte correspondant à des rayons acoustiques remontants (situation «défavorable»)
- Z Effets météorologiques nuls correspondant à des rayons acoustiques se propageant de façon rectiligne (situation «homogène»)
- + Augmentation modérée de niveau sonore correspondant à des rayons acoustiques redescendants (situation «favorable»)
- ++ Augmentation assez forte de niveau sonore correspondant à des rayons acoustiques fortement redescendants (situation «favorable»).

Les cases en vert clair correspondent à des cas météorologiques impossibles.

Il est important de préciser que les différences observées dans les zones «favorables» et «défavorables» ne sont pas égales en valeur absolue : les diminutions du niveau sonore sont beaucoup plus importantes que les augmentations. De plus, les écarts types des niveaux sonores sont beaucoup plus faibles dans le cas d'une propagation en situation «favorable».

qu'en situation «défavorable»; en d'autres termes, ces niveaux sont moins dispersés. La figure suivante illustre ce phénomène en fournissant, suivant le signe du gradient de vitesse du son, la valeur des atténuations observées sur un terrain plat en fonction de la distance source ponctuelle-récepteur, pour une source placée à 6 m de hauteur et un récepteur placé à 1,5 m de hauteur. On a également tracé sur ce graphe l'atténuation calculée en conditions homogènes: celle-ci se situe bien à la frontière entre les deux types de conditions.

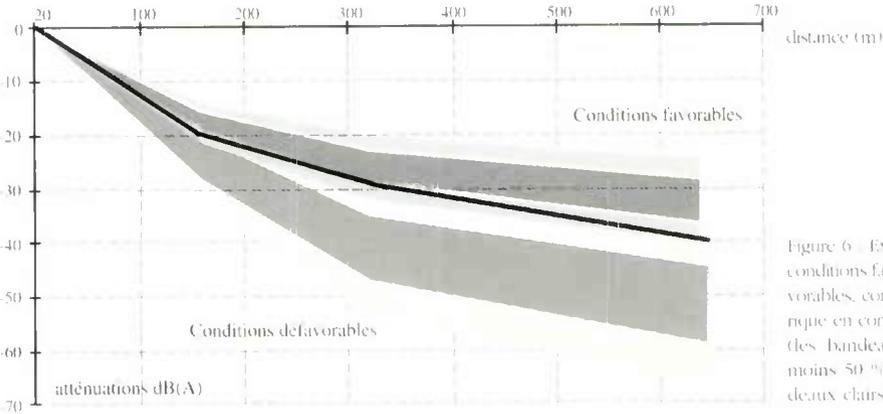


Figure 6 Exemple de niveaux sonores en conditions favorables et en conditions défavorables, comparés au niveau sonore théorique en conditions homogènes (trait noir) (les bandeaux sombres contiennent au moins 50 % des échantillons et les bandeaux clairs, au moins 90 %)

### 3.1.3 Représentativité des phénomènes dans la réalité et à long terme

Dans la réalité, on a affaire à une multitude de combinaisons possibles entre les effets thermiques et aérodynamiques. De plus, ces phénomènes sont variables dans le temps et dans l'espace. Il convient donc de considérer le niveau de bruit à grande distance comme une variable aléatoire.

Par ailleurs, les caractéristiques liées à l'effet de sol ne peuvent pas être dissociées des conditions de propagation de l'onde acoustique : en effet, suivant la forme des rayons, la proportion de l'énergie acoustique qui interagira avec le sol sera plus ou moins importante. La topographie locale d'un site vient, en supplément, compliquer la situation : la nature et la géométrie des sites modifient en général substantiellement les caractéristiques micrométéorologiques.

Tous ces phénomènes montrent qu'une caractérisation exacte, dans le temps et dans l'espace, de l'influence des conditions météorologiques sur la propagation du son est impossible. Seule une démarche approchée est possible.

## 3.2 Présentation du principe de la méthode de calcul du niveau sonore de long terme

La présente méthode permet de calculer les niveaux sonores dans deux conditions de propagation conventionnelles:

1) Dans des conditions déterminées de propagation «favorables» (niveaux notés  $L_F$ ). Les niveaux calculés ne sont pas des niveaux «extrêmes» correspondant par exemple aux conditions ++ de la grille, mais sont représentatifs de la situation moyenne observée par propagation avec gradient vertical de son positif. Ils correspondent en quelque sorte à une «moyenne des niveaux observés en conditions favorables à la propagation».

2) Dans des conditions de propagation «homogènes» (niveaux notés  $L_H$ ). Bien qu'elles n'existent pratiquement pas dans la nature, ces conditions sont les plus faciles à modéliser puisque les rayons sonores sont rectilignes. Avant la publication de l'arrêté du 5 mai 1995, les calculs de bruit routier étaient usuellement conduits avec l'hypothèse d'une atmosphère homogène.

Pour les récepteurs situés à plus de 250 m de la route, l'arrêté du 5 mai 1995 a posé l'obligation de tenir compte, dans les études prévisionnelles de bruit routier, des conditions météorologiques réelles observables sur le site. Les niveaux prévisionnels ainsi calculés ne doivent pas être inférieurs à ceux observés en conditions d'atmosphère homogène.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode opérationnelle simple permettant de calculer les niveaux sonores par conditions de propagation «défavorables». Pour évaluer les niveaux sonores de long terme, prenant en compte l'ensemble des conditions météorologiques rencontrées sur le site, la présente méthode utilise un artifice consistant à majorer les niveaux sonores en conditions «défavorables» par les niveaux correspondant aux conditions «homogènes». Cette décision surestime les niveaux sonores réels obtenus dans ces conditions de propagation, mais va dans le sens de la sécurité. Le niveau de long terme est donc calculé en faisant la somme énergétique des niveaux  $L_F$  et  $L_H$ , pondérés par les occurrences respectives des conditions «favorables» et «défavorables» sur le site (voir également chapitre 4).

$$L_{LT} = 10 \lg [p \cdot 10^{L_F/10} + (1-p) \cdot 10^{L_H/10}]$$

$p$  étant l'occurrence de long terme des conditions météorologiques favorables à la propagation du son ( $p$  est compris entre 0 et 1). Cette formule est illustrée par la figure 7. Autrement dit, on considère que le niveau  $L_F$  règne pendant une fraction  $p$  du temps, et le niveau  $L_H$  pendant la fraction  $(1-p)$  du temps.

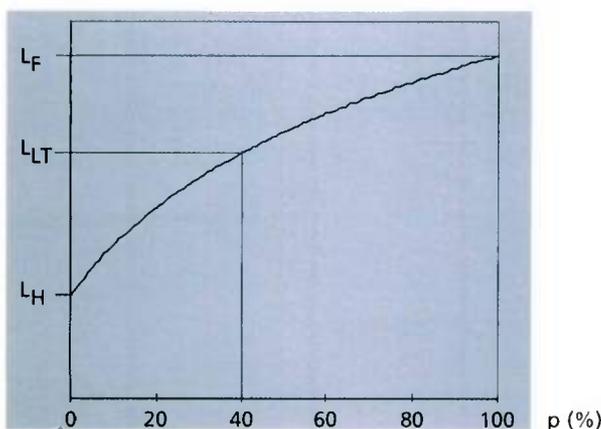


Figure 7 : Principe de calcul du niveau sonore de long terme en fonction de l'occurrence  $p$  (%) (on montre par exemple ici le niveau  $L_{LT}$  obtenu pour une occurrence de conditions favorables égale à 40 %)

Il est bien évident, comme nous l'avons signalé précédemment, que sur un site donné, cette occurrence de conditions favorables dépend de la direction source-récepteur, puisque ces conditions dépendent notamment de la direction du vent. La formule ci-dessus doit donc être appliquée pour chaque couple «source élémentaire-récepteur», le niveau global de long terme au récepteur étant la somme énergétique des contributions de long terme de chaque source élémentaire.

Pour effectuer ce calcul, il est donc nécessaire de disposer, sur le site étudié, de l'occurrence des conditions «favorables» pour l'ensemble des directions de propagation source-récepteur.

### **3.3 Choix des valeurs d'occurrences météorologiques**

Avant d'entreprendre certaines actions particulièrement lourdes en vue de déterminer les valeurs d'occurrences météorologiques, il peut s'avérer judicieux d'évaluer l'enjeu de la précision avec laquelle ces valeurs doivent être connues. Par exemple :

- s'il s'avère que la route en projet respecte, en conditions de propagation «favorables», les seuils visés, on est assuré que ces seuils seront également respectés par conditions «de long terme»;
- si les niveaux sonores en conditions «favorables» et en conditions «homogènes» sont peu différents, les imprécisions sur la connaissance des valeurs d'occurrences météorologiques sont de peu d'influence sur le niveau sonore «de long terme».

Dans ces deux situations, il n'y a pas nécessité d'affiner l'analyse météorologique du site étudié.

De telles simplifications ne sont cependant opportunes que si les caractéristiques géométriques de la route en projet (tracé, profil en long, profil en travers) sont suffisamment figées. Au besoin, plusieurs options peuvent être simulées.

#### **3.3.1 Occurrences calculées pour la France métropolitaine**

Les relevés de 40 stations météorologiques réparties sur le territoire métropolitain ont été analysés selon les critères de la grille (U<sub>i</sub>; T<sub>i</sub>) décrite précédemment, et les valeurs d'occurrence des conditions météorologiques «favorables» pour une période de long terme ont été calculées. Les résultats sont présentés en annexe 1 sous deux formes :

- deux tableaux définissant, pour chaque station météorologique, les pourcentages d'occurrence des conditions «favorables» à la propagation par pas de 20 degrés de direction source-récepteur, et pour chaque période considérée (6h-22h et 22h-6h);
- un ensemble de 18 cartes fournissant, par pas de 40 degrés de direction source-récepteur, les lignes «d'iso-occurrence» de conditions «favorables», de jour (6h-22h) et de nuit

(22h-6h). Ces cartes ont été obtenues par simple interpolation entre les stations les plus proches.

On peut constater, à la lecture des tableaux, que dans le cas général, pour une station donnée la valeur d'occurrence ne varie pas fortement entre deux directions séparées de 20 degrés (à l'exception des sites où un vent dominant est extrêmement marqué). Les variations en fonction de la direction sont lissées. Les raisons en sont :

- que l'effet des facteurs thermiques est isotrope,
- que la classification relative à la direction du vent utilisée dans la grille (  $U_i$ ;  $T_i$  ) («vent portant», «vent de travers» et «vent contraire») lisse elle-même les variations observables sur une rose des vents établie par secteurs de 20 degrés.

Remarques :

- Du fait de problèmes de disponibilité des données, les valeurs pour la période 22 h-6 h ne sont fournies que pour 35 stations.
- Le choix du pas de 40 degrés pour la représentation cartographique résulte d'une volonté de ne pas alourdir cette annexe, l'enjeu d'une représentation plus détaillée étant faible.
- En pratique, pour un trajet quelconque source élémentaire-récepteur, on utilisera la valeur d'occurrence de la direction angulaire la plus proche, qu'elle soit choisie dans les cartes ou dans les tableaux.

En toute rigueur, ces valeurs ne sont utilisables que pour des sites répondant aux critères d'implantation des stations météorologiques arrêtés par Météo-France afin de garantir la représentativité des valeurs mesurées, notamment en ce qui concerne le vent :

- site plat, horizontal et démuné d'arbres et d'arbustes,
- sol recouvert d'herbe (hauteur optimale de la végétation : 10 cm),
- absence de grandes masses d'eau (lacs, rivières),
- site dégagé (ne sont admis, dans un rayon  $r$  autour du mât météorologique, que les obstacles de hauteur inférieure à  $r/10$ ),
- altitude du site inférieure à 500 mètres.

Pour l'application pratique de la présente méthode, on considèrera que ces valeurs sont utilisables pour les sites répondant aux critères suivants :

- site relativement plat et horizontal, avec peu de végétation haute (les arbres isolés sont admis),
- zone de propagation dégagée : pas d'objets de dimensions importantes (surface et hauteur) en regard des dimensions de la zone de propagation, pas de nombreux petits objets (quelques objets clairsemés sont admis),
- absence de grandes masses d'eau (lacs, rivières),
- altitude du site inférieure à 500 mètres.

Le critère de zone de propagation bien dégagée ne peut être fourni de façon précise. Son principe directeur est que les obstacles situés dans la zone de propagation ne doivent pas modifier notablement la vitesse et la direction du vent.

Les masses d'eau importantes sont exclues du fait de leur inertie thermique très élevée. Les sites à plus de 500 mètres d'altitude sont exclus parce que l'influence du relief sur

les caractéristiques météorologiques y sont déterminantes, et que l'on ne peut donc se permettre d'extrapoler des valeurs mesurées sur une station à des sites distants.

### 3.3.2 Cas des autres sites

Lorsque qu'un site ne répond pas aux critères définis plus haut, le projeteur peut recourir aux différentes possibilités d'analyse météorologique exposées ci-dessous:

- a) exploiter des données météorologiques locales existantes,
- b) exploiter des données météorologiques locales recueillies spécialement pour les besoins du projet,
- c) adopter les valeurs données en annexe 1,
- d) adopter des valeurs forfaitaires «par excès».

#### a) Exploitation de données météorologiques locales existantes

Il existe plusieurs réseaux de stations météorologiques dont les données peuvent être exploitées. La démarche décrite ici suppose qu'il existe une station météorologique représentative du site étudié. La mesure locale des conditions micrométéorologiques peut permettre d'accéder à un ordre de grandeur des occurrences "favorables" en procédant comme suit:

1) Les caractéristiques thermiques (ensoleillement, couverture nuageuse) et aérodynamiques (vitesse et direction du vent) sont recueillies de façon **simultanée** pour une période de long terme au sens météorologique (soit au moins 10 ans, l'optimum étant 30 ans).

2) Ces données sont croisées avec la grille ( $U_i$ ;  $T_i$ ) afin de calculer les occurrences «favorables» de long terme sur le site étudié.

Cette démarche complexe nécessite le concours conjoint de spécialistes de la micrométéorologie et de l'acoustique.

#### b) Exploitation de données météorologiques locales recueillies pour les besoins du projet

S'il n'existe pas de station météorologique représentative du site étudié, il peut être envisagé de recueillir des données météorologiques pendant une période nettement plus courte que celle correspondant au «long terme météorologique», sous réserve de les recalculer avec des données d'une station existante. La démarche est alors la suivante:

1) Mesure locale simultanée des caractéristiques thermiques (ensoleillement, couverture nuageuse) et aérodynamiques (vitesse et direction du vent) du site. Dans l'absolu, cette mesure devrait être réalisée sur une période minimale de l'ordre de 2 à 3 ans. Dans la pratique, on pourra se contenter ici de mesures sur une année.

2) Recueil à la station météorologique officielle la plus proche, ou la plus représentative du site étudié, des informations analogues:

- correspondant à la même période, d'une part,
- et correspondant à une période de long terme au sens météorologique, d'autre part (soit au moins 10 ans, l'optimum étant 30 ans).

3) Recalage des données mesurées sur le site en fonction des données de long terme recueillies à la station permanente, afin d'estimer les caractéristiques météorologiques de long terme du site étudié.

4) Analyse de ces caractéristiques au moyen de la grille ( $U_i$ ;  $T_i$ ) afin d'estimer les occurrences «favorables» de long terme sur le site étudié.

Cette démarche est longue, et plus complexe encore que celle proposée au a). Elle ne pourra être effectuée que dans des cas très particuliers. Elle nécessite bien entendu également le concours conjoint de spécialistes de la micrométéorologie et de l'acoustique, et doit être envisagée très en amont des études du projet routier.

#### c) Utilisation des valeurs de l'annexe 1

Même lorsqu'un site n'est pas conforme aux critères donnés au paragraphe 3.3.1, il est possible d'utiliser les valeurs fournies en annexe. Dans ce cas, la qualité de l'estimation des valeurs d'occurrences «favorables» sera fonction du degré de respect de ces critères par le site étudié. Une description exacte du site en précisant les points sur lesquels il diffère de ces critères est alors nécessaire. Dans ces conditions, on prend volontairement le parti d'utiliser des valeurs forfaitaires qui ne correspondent pas réellement aux conditions «favorables» locales.

#### d) Utilisation de valeurs forfaitaires «par excès»

Ce principe consiste à maximiser par précaution l'occurrence des conditions «favorables», ce qui conduira à surestimer les niveaux de long terme et donc à mieux protéger les riverains.

On pourra ainsi par exemple considérer, quelle que soit la direction:

- 100 % d'occurrences «favorables» pour la période de nuit (22h-6h),
- 50 % d'occurrences «favorables» pour la période de jour (6h-22h).

**Page laissée blanche intentionnellement**

## 4. Aperçu général de la méthode

Les calculs sont réalisés selon les étapes suivantes:

- 1 - décomposition des sources de bruit en sources sonores ponctuelles;
- 2 - détermination du niveau de puissance acoustique de chaque source;
- 3 - recherche des trajets de propagation entre chaque source et le récepteur (trajets directs, réfléchis, et/ou diffractés);
- 4 - sur chaque trajet de propagation:
  - calcul de l'atténuation en conditions favorables;
  - calcul de l'atténuation en conditions homogènes;
  - calcul du niveau de long terme à partir du niveau favorable, du niveau homogène, et de l'occurrence de conditions favorables;
- 5 - cumul des niveaux sonores de long terme de chaque trajet, permettant ainsi de calculer le niveau sonore total au point récepteur.

Pour une source sonore ponctuelle  $S_j$  de puissance  $L_{Awi}$ , et pour une bande d'octave donnée, le niveau sonore continu équivalent en un point récepteur R dans des conditions atmosphériques données sera obtenu selon les formules suivantes:

### Dans une bande d'octave donnée:

Note : l'indice j de la bande d'octave considérée est omis ici pour plus de lisibilité.

Niveau sonore en conditions favorables pour le trajet ( $S_j$ , R):

$$L_{j, F} = L_{Awi} - A_{j, F} \quad [1]$$

Le terme  $A_{j, F}$  représente l'ensemble des atténuations le long du chemin de propagation en conditions favorables, et se décompose de la manière suivante:

$$A_{j, F} = A_{div} + A_{atm} + A_{sol, F} + A_{dif, F} \quad [2]$$

où  $A_{div}$  est l'atténuation due à la divergence géométrique,  
 $A_{atm}$  est l'atténuation due à l'absorption atmosphérique,  
 $A_{sol, F}$  est l'atténuation due à l'effet de sol, en conditions favorables,  
 $A_{dif, F}$  est l'atténuation due à la diffraction, en conditions favorables.

Niveau sonore en conditions homogènes pour le trajet ( $S_i, R$ ):

$$L_{i,H} = L_{Awi} - A_{i,H} \quad [3]$$

Le terme  $A_{i,H}$  représente l'ensemble des atténuations le long du chemin de propagation en conditions homogènes, et se décompose de la manière suivante:

$$A_{i,H} = A_{div} + A_{atm} + A_{sol,H} + A_{dif,H} \quad [4]$$

où  $A_{sol,H}$  est l'atténuation due à l'effet de sol, en conditions homogènes,  
 $A_{dif,H}$  est l'atténuation due à la diffraction, en conditions homogènes.

Note : On admettra que seules les atténuations dues à l'effet de sol ( $A_{sol}$ ) et à la diffraction ( $A_{dif}$ ) sont affectées par les conditions météorologiques.

Niveau sonore de long terme pour le trajet ( $S_i, R$ ):

Le niveau sonore dit «de long terme» dû à la source ponctuelle  $i$  est obtenu par sommation énergétique des niveaux sonores en conditions homogènes et favorables, pondérés par l'occurrence moyenne  $p_i$  des conditions favorables dans la direction du trajet ( $S_i, R$ ) (voir paragraphe 3.2):

$$L_{i,LT} = 10 \lg(p_i 10^{L_{i,F}/10} + (1 - p_i) 10^{L_{i,H}/10}) \quad [5]$$

La détermination des occurrences moyennes  $p_i$  des conditions favorables est décrite au paragraphe 3.3.

Niveau sonore de long terme au point R pour tous les trajets:

Le niveau sonore total au récepteur pour une bande d'octave donnée est obtenu par sommation des contributions sonores de l'ensemble des sources ponctuelles et de leurs sources images éventuelles:

$$L_{eq,LT} = 10 \lg \left[ \sum_i 10^{0.1L_{i,LT}} + \sum_{i'} 10^{0.1L_{i',LT}} \right] \quad [6]$$

où  $i$  représente l'ensemble des sources ponctuelles,  
 et  $i'$  l'ensemble des sources images correspondant à des réflexions sur des obstacles verticaux.

La prise en compte des réflexions par le biais de sources images est décrite en 7.5. Le pourcentage d'occurrence de conditions favorables dans le cas d'un trajet réfléchi sur un obstacle vertical sera pris identique à celui du trajet direct: si  $S'_i$  est la source image de  $S_i$ , alors l'occurrence  $p_{i'}$  du trajet ( $S'_i, R$ ) est prise égale à l'occurrence  $p_i$  du trajet ( $S_i, R$ ).

Niveau sonore total de long terme au point R en dB(A):

Le niveau sonore total en dB(A) est obtenu par sommation des niveaux dans chaque bande d'octave<sup>1</sup>:

$$L_{Aeq, LT} = 10 \lg \left[ \sum_{j=1}^6 10^{0.1 L_{Aeq, LT(j)}} \right] \quad [7]$$

où  $j$  est l'indice des six bandes d'octaves de 125 à 4000 Hz.

C'est ce niveau  $L_{Aeq, LT}$  qui constitue le résultat final, c'est-à-dire le niveau sonore de long terme au point récepteur.

---

<sup>1</sup> La pondération A est directement prise en compte dans le niveau de puissance  $L_{Awi}$

**Page laissée blanche intentionnellement**

## 5. Description de la source

Une infrastructure de transport terrestre considérée en tant que source de bruit présente des spécificités bien particulières de par :

- sa géométrie : caractère linéaire et répartition de la puissance acoustique sur la largeur de la plateforme circulée (on parle de «ruban source»);
- la variabilité de son émission sonore tout au long de l'itinéraire.

Pour traiter par calcul ce type de situation complexe, il est nécessaire de procéder à une modélisation de la source. Le modèle retenu ici est basé sur une décomposition de l'infrastructure en sources sonores ponctuelles élémentaires.

### 5.1 Décomposition des sources

#### 5.1.1 Notion de tronçon acoustiquement homogène

Il est en premier lieu nécessaire de déterminer les tronçons (ou «arcs», en termes de géométrie) sur lesquels on peut considérer :

- d'une part, que l'émission sonore du trafic ne varie pas (ou varie peu),
- d'autre part, que le profil en travers (nombre de voies, largeur de la plateforme, etc.) tout au long de la section permet d'appliquer le même modèle de décomposition de la source en sources élémentaires.

L'infrastructure étudiée est ainsi découpée en autant de tronçons acoustiquement homogènes que nécessaire.

#### 5.1.2 Position des lignes de sources

L'infrastructure est modélisée par un certain nombre de lignes de sources. Le nombre et la position de ces lignes de sources dépendent de la précision recherchée. Lorsqu'on ne cherche pas à limiter le nombre de calculs à réaliser (utilisation d'un programme informatique, par exemple), on choisira de positionner une ligne de source au centre de chaque voie de circulation (figure 8).

Il est également possible, en fonction de la distance à la voie et des conditions de propagation, de choisir de représenter chaque sens de circulation par une ligne de sources (placée au centre de la chaussée de chaque sens), voire même de représenter la totalité de l'infrastructure par une seule ligne de sources (placée sur l'axe de la route). Ce dernier choix n'est valide que si la plateforme n'est pas trop large et si le point récepteur est suffisamment éloigné de la route.

Dans tous les cas, il est recommandé de placer une ligne de sources au centre de chaque voie de circulation, et ce choix devrait être systématique lorsqu'il y a diffraction ou lorsque le trafic est fortement dissymétrique entre les deux sens de circulation.

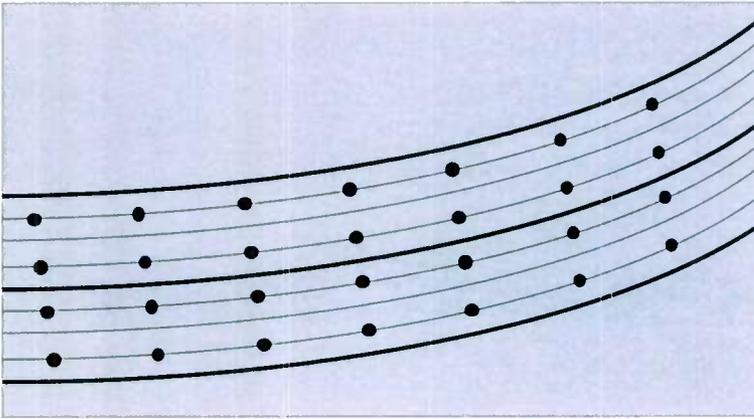


Figure 8 : Position optimale des lignes de sources dans le cas d'une route à 2x2 voies

### 5.1.3 Décomposition des lignes de sources en sources ponctuelles élémentaires

Chaque ligne de sources préalablement définie est décomposée en un ensemble de sources ponctuelles élémentaires; il existe plusieurs façons de procéder à cette décomposition :

- Décomposition équiangulaire: on balaye le site depuis le point récepteur considéré par un ensemble de rayons espacés d'un angle constant (en règle générale, cet angle sera pris inférieur ou égal à  $10^\circ$  pour des angles de vue inférieurs ou égaux à  $150^\circ$ , et doit être réduit dans le cas d'angles de vue supérieurs). À chaque intersection d'un de ces rayons avec une ligne de sources, on place un point source. Avec cette méthode, la décomposition d'une ligne de sources n'est pas unique mais dépend du point récepteur considéré.
- Décomposition par pas uniforme: chaque ligne de sources est décomposée en points sources régulièrement espacés. Afin de conserver une bonne précision, le pas entre deux sources ponctuelles consécutives ne doit pas être supérieur à la moitié de la distance orthogonale entre la voie et le point récepteur le plus proche. En règle générale, la valeur du pas excède rarement 20 m. Ici, la décomposition est unique et ne dépend pas du point récepteur considéré.
- Décomposition variable: dans certaines situations, et notamment lorsque des points récepteurs sont proches de la voie et en vue partiellement masquée, il peut être nécessaire de modifier localement la décomposition en sources ponctuelles en resserrant le pas entre deux sources consécutives.

Note : en cas de décomposition équiangulaire ou par pas variable, la puissance acoustique de chaque source élémentaire  $L_{AWi}$  varie.

## 5.2 Données d'émission sonore en entrée

Le niveau de puissance acoustique  $L_{AWi}$  en dB(A) d'une source ponctuelle élémentaire  $i$  pour une bande d'octave donnée est obtenu à partir des valeurs fournies par le Guide du Bruit des Transports Terrestres - Fascicule «Prévision des niveaux sonores»<sup>2</sup> (abaques 4.1 et 4.2), en appliquant la formule suivante:

$$L_{Awi} = [(E_{VL} + 10\lg Q_{VL}) \oplus (E_{PL} + 10\lg Q_{PL})] + 20 + 10\lg(l_i) + R(j)$$

où  $E_{VL}$  et  $E_{PL}$  sont les niveaux d'émission sonore, tels que définis dans les abaques du Guide du Bruit, respectivement pour les véhicules légers et les poids-lourds,

$Q_{VL}$  et  $Q_{PL}$  sont respectivement les débits horaires de véhicules légers et de poids-lourds, représentatifs de la période considérée,

$l_i$  est la longueur en m de la portion de ligne source représentée par le point source  $i$  (figure 9),

$R(j)$  est la valeur du spectre de bruit routier normalisé pondéré A, calculée à partir du projet de norme européenne prEN 1793-3:1995, et donnée dans le tableau 2.

j	bande d'octave	valeurs R(j) en dB(A)
1	125 Hz	- 14
2	250 Hz	- 10
3	500 Hz	- 7
4	1 kHz	- 4
5	2 kHz	- 7
6	4 kHz	- 12

Tableau 2 : spectre de bruit routier normalisé pondéré A

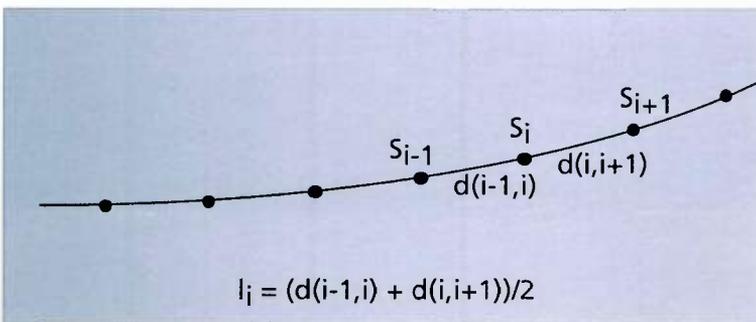


Figure 9 : calcul de la longueur de source représentée par une source ponctuelle  $i$

**Page laissée blanche intentionnellement**

## 6. Analyse de la propagation

### 6.1 Récepteur

Les points récepteurs ne doivent pas être placés à une hauteur par rapport au sol inférieure à 2 m, et cette hauteur doit être connue à moins de 0,50 m près afin de limiter les incertitudes de résultats.

Par défaut, la méthode calcule des niveaux sonores en champ libre.

Pour répondre aux besoins d'application de la réglementation en vigueur en matière de seuils de bruit, les récepteurs doivent être placés à 2 m en avant des façades des bâtiments. Le calcul de l'effet de façade peut alors être réalisé :

- soit en ajoutant une correction forfaitaire de + 3 dB(A) au niveau sonore final calculé ( $L_{Aeq,LT}$ ) ;
- soit en réalisant un calcul de réflexion, selon la méthode décrite en 7.5.

### 6.2 Notion de «trajets de propagation élémentaires»

Les méthodes de calcul du type de celle exposée ici (comme la norme ISO 9613-2 et la plupart des méthodes officielles en Europe) sont des méthodes géométriques. Elles consistent dans la recherche des trajets de propagation entre la source et le récepteur. Ces trajets représentant les chemins de propagation de l'énergie sonore.

La méthode décrite ici peut être appliquée en 3-dimensions (3D), mais la recherche des trajets de propagation peut alors devenir très complexe, et notamment lorsque des réflexions se produisent sur des surfaces quelconques. C'est pourquoi on préférera la plupart du temps l'appliquer en mode «2 dimensions et demi» (2D1/2).

Le terme «2D1/2» signifie que la recherche des trajets de propagation existant entre un point source et un point récepteur se fait dans une projection bidimensionnelle du site sur un plan horizontal. Une fois chaque trajet de propagation identifié, celui-ci est traité en 2 dimensions dans un plan vertical (dans le cas de trajets comportant des réflexions, le plan vertical est mis à plat, à la façon d'un paravent chinois).

On distingue deux types de trajets (figure 10) :

- les trajets «directs» de la source vers le récepteur : ce sont des trajets rectilignes en vue en plan, dans lesquels sont intégrées d'éventuelles diffractions et/ou réflexions sur le sol ;
- les trajets réfléchis sur des obstacles verticaux (ou faiblement inclinés) : ce type de trajets est traité par la méthode des sources images.

Le fait de rechercher les trajets de propagation en vue en plan ne permet pas de traiter des réflexions sur des obstacles fortement inclinés ; en effet, dans ce cas, on ne peut plus faire l'hypothèse que la réflexion vue en plan reste spéculaire. Cette dernière hypothèse peut être considérée comme valide seulement jusqu'à un angle d'inclinaison de 15° par rapport à la verticale. Par contre, les réflexions sur le sol sont traitées quelle que soit la pente du terrain, directement dans les formules de calcul de l'effet de sol.

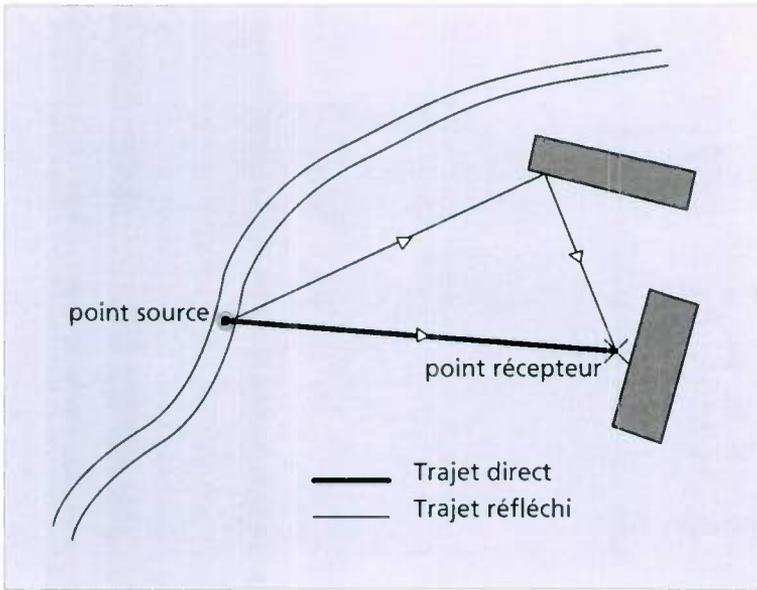


Figure 10 | trajet direct et trajet réfléchi

**Note importante:** Nous avons vu en détail et notamment au chapitre 3 que la différence essentielle entre les conditions de propagation homogènes et favorables réside dans la courbure des rayons: rectilignes en conditions homogènes et incurvés vers le sol en conditions favorables. Lors de la recherche des trajets de propagation dans cette méthode, et notamment de la détermination des «points d'impact» sur le sol ou sur des obstacles, on considère, dans tous les cas, que les rayons sont géométriquement rectilignes. La courbure des rayons est alors prise en compte dans les formules de calcul de l'effet de sol et de la diffraction. Cette façon de faire est conforme à celle retenue dans la norme ISO 9613-2.

## 7. Calculs sur un trajet élémentaire

### 7.1 Divergence géométrique

L'atténuation due à la divergence géométrique prend en compte l'effet d'affaiblissement du niveau sonore dû à la distance de propagation. Pour une source sonore ponctuelle en champ libre, l'atténuation en dB est donnée par :

$$A_{div} = 20 \lg(d) + 11 \quad [9]$$

**d** est la distance directe entre la source et le récepteur (distance en l'absence d'obstacle diffractant), en mètres.

### 7.2 Absorption atmosphérique

L'atténuation due à l'absorption atmosphérique,  $A_{atm}$  (en dB), lors de la propagation sur une distance **d** est donnée par la formule :

$$A_{atm} = \alpha d/1000 \quad [10]$$

où : **d** est la distance directe entre la source et le récepteur, en mètres ;  
 $\alpha$  est le coefficient d'atténuation atmosphérique en dB/km à la fréquence centrale exacte pour chaque bande d'octave, conformément au tableau 3 ci-dessous :

fréquence centrale nominale (en Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha$ (en dB/km)	0,38	1,13	2,36	4,08	8,75	26,4

Tableau 3 : Coefficient d'absorption atmosphérique  $\alpha$  en dB/km par bande d'octave

Les valeurs du coefficient  $\alpha$  sont données pour une température de 15°C et une humidité relative de 70 %. Elles sont conformes aux valeurs fournies par la norme ISO 9613-1.

### 7.3 Effet de sol

L'atténuation due à l'effet de sol est principalement le résultat de l'interférence entre le son réfléchi par la surface du sol et le son qui se propage directement de la source vers le récepteur. Elle est physiquement liée à la nature plus ou moins acoustiquement absorbante des terrains au-dessus desquels le son se propage. Mais elle est également très dépendante des conditions atmosphériques régnant lors de la propagation, dans le sens où la courbure des rayons modifie la hauteur du trajet au-dessus du sol et donne plus ou moins d'importance aux terrains situés près de la source, près du récepteur, ou entre les deux.

Par conséquent, la présente méthode décrit deux façons différentes, mais basées sur les mêmes principes, de calculer les valeurs d'atténuation dues à l'effet de sol, dans des conditions atmosphériques favorables et homogènes. En conditions favorables, la procédure de calcul est quasiment identique à celle proposée par la norme ISO 9613-2.

### 7.3.1 Caractérisation acoustique des sols

Les propriétés d'absorption acoustique des sols sont essentiellement liées à leur porosité. Les sols compacts sont généralement réfléchissants et les sols poreux absorbants. Pour les besoins opérationnels de calcul, l'absorption acoustique d'un sol est représentée par un coefficient  $G$  adimensionnel, compris entre 0 et 1. On ne distingue que deux types de sols: une valeur de 0 correspond à un sol réfléchissant, et une valeur de 1 à un sol absorbant. Le coefficient  $G$  peut prendre des valeurs intermédiaires entre 0 et 1, pour représenter une absorption équivalente dans le cas de sols variables au long d'un trajet. Dans ce dernier cas,  $G$  est la fraction de la région absorbante le long du trajet (voir également figure 12).

type de sol	$G$ (sans dimension)
sol absorbant (herbe, prairie, arbres, ...)	1
sol réfléchissant (revêtement routier, béton, ...)	0

Note : dans le cas où l'on dispose d'une bonne connaissance des caractéristiques du sol, il est admis d'adopter des valeurs de  $G$  variant continuellement entre 0 et 1. Dans ce cas, on retiendra une valeur de  $G$  unique pour l'ensemble de la zone de propagation.

### 7.3.2 Hauteurs significatives au-dessus du sol

De façon à prendre en compte le mieux possible la réalité du relief du terrain le long d'un trajet de propagation, on introduit la notion de «hauteur équivalente» qui vient en substitution des hauteurs vraies dans les formules de l'effet de sol.

Par convention, on note «h» les hauteurs vraies au-dessus du sol et «z» les hauteurs équivalentes. Les hauteurs équivalentes s'obtiennent à partir du plan de sol moyen entre la source et le récepteur: cela revient à remplacer le sol réel par un sol plan fictif représentant le profil moyen du terrain (figure 11).

La hauteur équivalente d'un point est alors sa hauteur orthogonale par rapport à ce plan moyen. Il est ainsi possible de définir la hauteur équivalente de source  $z_s$  et la hauteur équivalente de récepteur  $z_r$ .

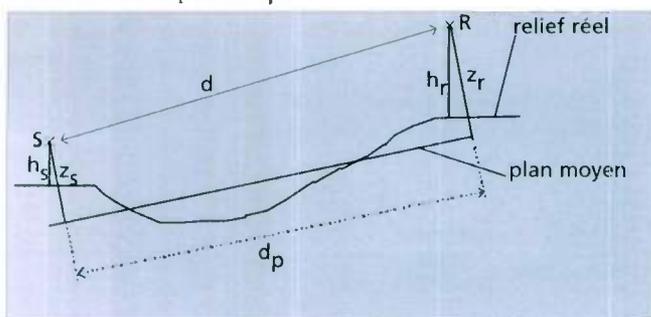


Figure 11 : hauteurs équivalentes par rapport au sol

Le plan de sol moyen peut être obtenu par une régression selon la méthode des moindres carrés, appliquée sur le profil de sol compris entre la source et le récepteur. Si la hauteur équivalente d'un point devient négative (c'est-à-dire que le point est situé en-dessous du plan de sol moyen), on retient une hauteur nulle (et le point d'ancrage est alors confondu avec son éventuel point image s'il y a diffraction).

### 7.3.3 Calcul en conditions favorables

Dans les conditions favorables à la propagation, les rayons sonores sont incurvés vers le sol. Par conséquent, l'effet de sol est essentiellement conditionné par la nature des terrains proches de la source et proches du récepteur. En effet, compte tenu de la courbure des rayons, le trajet de propagation est la plupart du temps suffisamment haut au-dessus des terrains situés au milieu du chemin source-récepteur pour qu'ils n'influencent que de façon minimale l'effet de sol total. Toutefois, pour de grandes distances, le trajet de propagation peut «rebondir» sur les terrains situés entre la source et le récepteur, et cela doit être pris en compte.

Ces phénomènes conduisent à calculer les valeurs d'effet de sol séparément pour les parties du trajet acoustique situées près de la source, entre la source et le récepteur, et près du récepteur. Pour ce faire, on introduit trois zones sur lesquelles un calcul séparé est conduit : zone de source, zone intermédiaire, zone de récepteur.

Dans certaines méthodes, comme par exemple celle décrite dans la norme ISO 9613-2, la largeur de ces zones est très précisément définie ; cela permet de traiter une grande variété de sources, et notamment dans le domaine industriel. Lorsqu'on ne s'intéresse qu'au bruit d'une infrastructure (routière ou ferroviaire), il n'est plus nécessaire de définir précisément ces zones, et notamment la zone de source dont les caractéristiques ne sont plus quelconques mais connues : ce sont celles d'une plateforme routière ou d'une plateforme ferroviaire. Par conséquent, la méthode exposée ici ne nécessite pas de définition stricte de la largeur de ces zones.

Chacune des zones source, intermédiaire et récepteur peut être affectée d'un coefficient de sol  $G$  (voir 7.3.1) différent. Ces coefficients sont notés respectivement  $G_s$ ,  $G_m$  et  $G_r$ . Dans le cas présent, on considère deux coefficients seulement : un coefficient  $G_s$  en région de source, et un coefficient  $G_{\text{trajet}}$  correspondant aux caractéristiques moyennes du sol sur l'ensemble du trajet de propagation, appliqué en zone intermédiaire et en zone de récepteur ( $G_m = G_r = G_{\text{trajet}}$ )<sup>3</sup>.

Si la source considérée représente un tronçon d'infrastructure routière, on considère systématiquement que le sol situé près de la source est de nature réfléchissante ( $G_s = 0$ ), compte tenu du revêtement de la chaussée et de la faible hauteur de la source par rapport au plan de la chaussée<sup>4</sup>. Cette règle ne s'applique pas en revanche si la source considérée est une arête de diffraction (voir paragraphe 7.4.4).

Pour les calculs d'effet de sol en zone intermédiaire et en zone de récepteur, on prend le coefficient  $G_{\text{trajet}}$  égal à la fraction de sol absorbant situé sur l'ensemble du trajet parcouru (figure 12).

<sup>3</sup> En toute rigueur et lorsque les proportions de sols absorbants et réfléchissants sont équivalentes, il conviendrait de prendre en compte le phénomène de discontinuité d'impédance ; celui-ci est négligé dans la présente méthode.

<sup>4</sup> L'éventuelle absorption acoustique de certains revêtements poreux est prise en compte directement dans les hypothèses d'émission sonore.

Toutefois, lorsque la source et le récepteur sont proches ( $d_p \leq 30(z_s + z_r)$ ), la distinction entre la nature des sols situés près de la source et ceux situés près du récepteur perd de son sens. Aux conditions limites, si le récepteur est très près du bord de la plateforme, on ne devrait pas pouvoir considérer un sol absorbant côté récepteur. Pour tenir compte de cette remarque, on corrige donc in fine le facteur de sol  $G_{\text{trajet}}$  de la façon suivante :

$$\text{Si } d_p \leq 30(z_s + z_r) : G'_{\text{trajet}} = G_{\text{trajet}} [d_p / [30(z_s + z_r)]]$$

$$\text{Si } d_p > 30(z_s + z_r) : G'_{\text{trajet}} = G_{\text{trajet}}$$

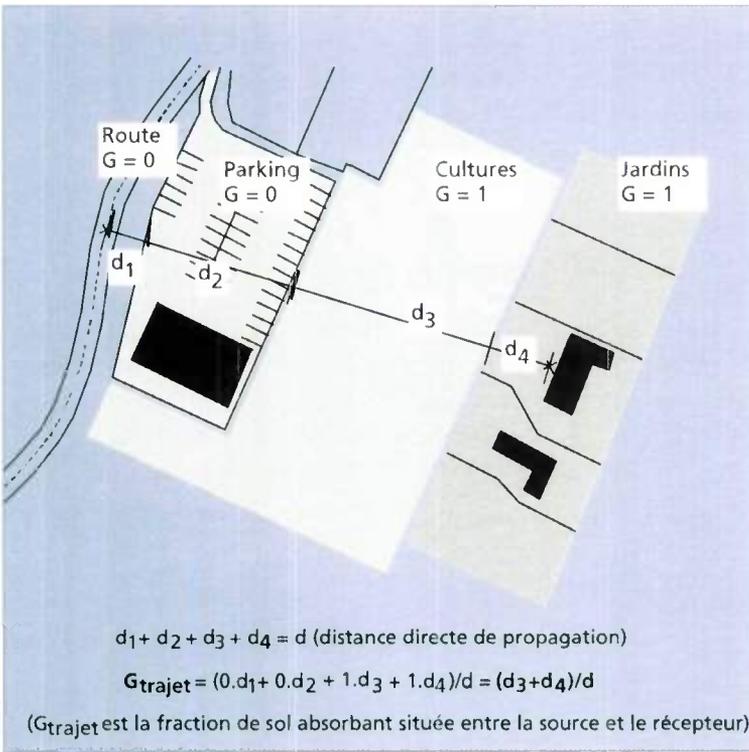


Figure 12 - Détermination du coefficient de sol  $G_{\text{trajet}}$  sur un trajet de propagation

L'atténuation due à l'effet de sol en conditions favorables sur l'ensemble du trajet est alors :

$$A_{\text{sol}, F} = A_{s, F} + A_{m, F} + A_{r, F} \quad (11)$$

Où  $A_{s, F}$ ,  $A_{m, F}$ ,  $A_{r, F}$  sont respectivement les atténuations dues à l'effet de sol près de la source, en zone intermédiaire entre la source et le récepteur, et près du récepteur, calculées chacune selon les formules du tableau 4 (formules conformes à celles de la norme ISO 9613-2).

fréquence centrale nominale (en Hz)	$A_{S, F}$ ou $A_{r, F}$ (en dB)	$A_{m, F}$ (en dB)
125	$-1,5 + G a'(z)$	$-3 q (1 - G)$
250	$-1,5 + G b'(z)$	
500	$-1,5 + G c'(z)$	
1000	$-1,5 + G d'(z)$	
2000	$-1,5 (1 - G)$	
4000	$-1,5 (1 - G)$	

où

$$a'(z) = 1,5 + 3,0e^{-0,12(z-5)^2} \left( 1 - e^{-d_p/50} \right) + 5,7e^{-0,09z^2} \left( 1 - e^{-2,8 \cdot 10^{-6} d_p^2} \right)$$

$$b'(z) = 1,5 + 8,6e^{-0,09z^2} \left( 1 - e^{-d_p/50} \right)$$

$$c'(z) = 1,5 + 14,0e^{-0,46z^2} \left( 1 - e^{-d_p/50} \right)$$

$$d'(z) = 1,5 + 5,0e^{-0,9z^2} \left( 1 - e^{-d_p/50} \right)$$

$$q = 0 \text{ si } d_p \leq 30 (z_s + z_r)$$

$$q = 1 - 30 (z_s + z_r) / d_p \text{ si } d_p > 30 (z_s + z_r)$$

Tableau 4 : Formules de calcul de l'effet de sol en conditions favorables  
(Pour calculer  $A_{S, F}$  prendre  $z = z_s$  et  $G = G_S$  ; pour calculer  $A_{r, F}$  prendre  $z = z_r$  et  $G = G_{\text{trajet}}$  ; pour calculer  $A_{m, F}$  prendre  $G = G_{\text{trajet}}$ ).

### 7.3.4 Calcul en conditions homogènes

Dans le cas du calcul en conditions atmosphériques homogènes, où les rayons sont rectilignes, il n'y a pas lieu de distinguer spécifiquement les zones source, intermédiaire et récepteur.

On prend donc un coefficient de sol  $G_{\text{trajet}}$  unique pour l'ensemble du trajet de propagation, et identique à celui utilisé pour le calcul en conditions favorables (voir ci-dessus).

L'atténuation due à l'effet de sol en conditions homogènes est alors calculée selon les formules suivantes :

– Si  $G_{\text{trajet}} \neq 0$  :

$$A_{\text{sol,H}} = -10 \lg \left[ 4 \frac{k^2}{d_p^2} \left( z_s^2 - \sqrt{\frac{2C_f}{k}} z_s + \frac{C_f}{k} \right) \left( z_r^2 - \sqrt{\frac{2C_f}{k}} z_r + \frac{C_f}{k} \right) \right] \geq -3 (1 - G'_{\text{trajet}}) \quad [12]$$

où  $k = \frac{2\pi f_c}{c}$ ,  $f_c$  étant la fréquence centrale exacte de l'octave considérée, en Hz (125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz), et  $c$  la célérité du son dans l'air, prise égale à 340 m/s ;

$$C_f = d_p \frac{1 + 3w d_p e^{-\sqrt{w} d_p}}{1 + w d_p}, \text{ les valeurs de } w \text{ étant données dans la formule ci-dessous, en fonction de } f \text{ et de } G_{\text{trajet}} :$$

$$[13] \quad w = 0,0185 \frac{f^{2,5} G_{\text{trajet}}^{2,6}}{f^{1,5} G_{\text{trajet}}^{2,6} + 1,3 \cdot 10^3 f^{0,75} G_{\text{trajet}}^{1,3} + 1,16 \cdot 10^6}$$

Si  $A_{\text{sol,H}}$  est inférieur à  $-3 (1 - G'_{\text{trajet}})$ , on prend  $A_{\text{sol,H}} = -3 (1 - G'_{\text{trajet}})$ .

Note : le terme  $-3 (1 - G'_{\text{trajet}})$  prend en compte le fait que lorsque la source et le récepteur sont éloignés, la première réflexion côté source ne se fait plus sur la plateforme routière mais sur le terrain naturel.

– Si  $G_{\text{trajet}} = 0$  :  $A_{\text{sol,H}} = -3 \text{ dB}$

## 7.4 Diffraction

En règle générale, on doit étudier la diffraction sur le sommet de chaque obstacle situé sur le chemin de propagation. Si le trajet passe «suffisamment haut» au-dessus de l'arête de diffraction, il n'y a pas lieu de réaliser le calcul selon les procédures décrites dans ce chapitre, mais d'effectuer les calculs en vue directe, en calculant notamment l'effet de sol selon 7.3. Dans la pratique, on compare, à 500 Hz, la différence de marche  $\delta$  à la quantité  $-\lambda/20$  (soit  $-0,034 \text{ m}$  à 500 Hz). Si la différence de marche  $\delta$  est inférieure à  $-0,034 \text{ m}$ , il n'y a pas lieu de réaliser le calcul de diffraction; on considère que la source et le récepteur sont en vue directe, et le calcul est réalisé, pour **toutes les bandes d'octaves**, selon les procédures décrites en 7.3. Dans le cas contraire, on applique le calcul de diffraction comme décrit dans le présent chapitre, pour **toutes les bandes d'octaves**. Cette règle est applicable à tous les cas (homogène ou favorable, diffraction simple ou diffraction multiple).

Lorsqu'un calcul est conduit selon la procédure décrite dans le présent chapitre, il convient de ne pas prendre en compte le terme d'atténuation  $A_{\text{sol}}$  dans les formules [2] et [4]. L'effet de sol est en effet pris en compte directement dans la formule générale de calcul de la diffraction.

Les formules proposées ici permettent de traiter la diffraction sur des écrans minces, des écrans épais, des bâtiments, des buttes de terres (naturelles ou artificielles), ainsi que par les bords de remblais, de déblais et de viaduc.

Lorsque, sur un trajet de propagation, on rencontre plusieurs obstacles diffractants, ceux-ci sont traités comme une seule diffraction multiple, en appliquant la procédure exposée au paragraphe 7.4.3.

Note : on ne cumule deux calculs de diffraction successifs que lorsque véritablement les obstacles sont très éloignés entre eux, mais il faut alors prendre en compte les réflexions sur le sol entre les diffractions, ce qui devient souvent trop compliqué dans la pratique.

Les procédures exposées dans ce chapitre permettent de calculer aussi bien en conditions homogènes que favorables, la courbure des rayons étant prise en compte dans le calcul de la différence de marche ainsi que des effets de sol avant et après diffraction.

### 7.4.1 Principes généraux

La figure 13 illustre la méthode générale de calcul de l'atténuation due à la diffraction. Cette méthode est basée sur la décomposition du trajet de propagation en deux parties : le trajet dit «côté source», situé entre la source et le point de diffraction, et le trajet dit «côté récepteur», situé entre le point de diffraction et le récepteur.

On calcule :

- un effet de sol côté source,  $\Delta_{sol}(S,O)$ ,
- un effet de sol côté récepteur,  $\Delta_{sol}(O,R)$ ,
- et trois diffractions : entre la source S et le récepteur R,  $\Delta_{dif}(S,R)$ , entre la source image S' et R,  $\Delta_{dif}(S',R)$ , et entre S et le récepteur image R',  $\Delta_{dif}(S,R')$ .

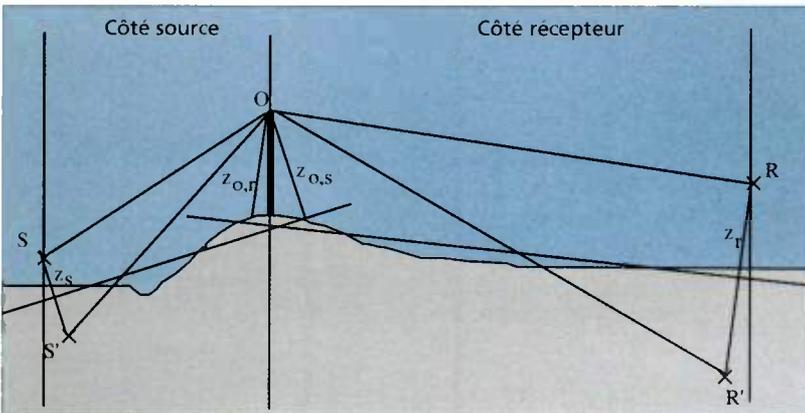


Figure 13 : Principe de calcul général de l'atténuation due à la diffraction

S	source		
R	récepteur		
S'	source image par rapport au plan de sol moyen côté source		
R'	récepteur image par rapport au plan de sol moyen côté récepteur		
O	point de diffraction		
$z_s$	hauteur équivalente de la source S par rapport au plan de sol moyen côté source		
$z_{o,s}$	hauteur équivalente du point de diffraction O par rapport au plan de sol moyen côté source		
$z_r$	hauteur équivalente du récepteur R par rapport au plan de sol moyen côté récepteur		
$z_{o,r}$	hauteur équivalente du point de diffraction O par rapport au plan de sol moyen côté récepteur		

La non-planéité du sol entre la source et le point de diffraction, ainsi qu'entre le point de diffraction et le récepteur, est prise en compte par le biais de hauteurs équivalentes calculées par rapport aux plans de sol moyen, côté source d'une part et côté récepteur d'autre part (deux plans), selon la méthode décrite en 7.3.2.

### 7.4.2 Diffraction pure

Pour une diffraction pure, en l'absence d'effet de sol, l'atténuation est donnée par:

- si  $(40/\lambda)C''\delta \geq -2$  :

$$\Delta_{\text{dif}} = 10 \lg(3 + (40/\lambda)C''\delta) \quad [14]$$

- si  $(40/\lambda)C''\delta \geq -2$  :

$$\Delta_{\text{dif}} = 0 \text{ dB}$$

où

$\lambda$  est la longueur d'onde à la fréquence centrale nominale de la bande d'octave considérée

$\delta$  est la différence de marche entre le trajet diffracté et le trajet direct (7.4.3)

$C''$  est un coefficient prenant en compte les diffractions multiples:

$C'' = 1$  pour une diffraction simple;

$C'' = \frac{1 + (5\lambda/e)^2}{1/3 + (5\lambda/e)^2}$  pour une diffraction multiple, où  $e$  est la distance totale entre les diffractions extrêmes (voir figure 14) dans le cas de diffractions multiples.

Les valeurs de  $\Delta_{\text{dif}}$  doivent être bornées:

- si  $\Delta_{\text{dif}} < 0$  :  $\Delta_{\text{dif}} = 0 \text{ dB}$

- si  $\Delta_{\text{dif}} > 25$  :  $\Delta_{\text{dif}} = 25 \text{ dB}$  pour une diffraction sur une arête horizontale

- pas de borne maximale pour une diffraction sur une arête verticale (diffraction latérale).

### 7.4.3 Calcul de la différence de marche

La différence de marche  $\delta$  se calcule dans un plan vertical contenant la source et le récepteur. Ceci est une approximation par rapport au principe de Fermat, mais qui reste acceptable ici (lignes de sources). Elle se calcule selon les schémas suivants, en fonction des situations rencontrées:

#### a) Conditions homogènes

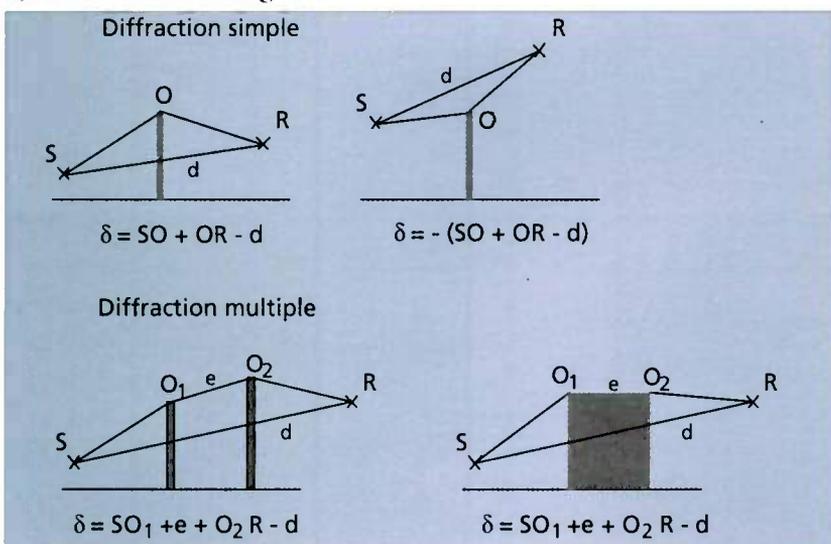


Figure 14 : Calcul de la différence de marche en conditions homogènes (O, O<sub>1</sub>, O<sub>2</sub> sont les points de diffraction)

#### b) Conditions favorables

En conditions favorables, on reproduit l'effet de la courbure des rayons en déplaçant vers le haut de la quantité  $\Delta h$  (formule 15) le point du trajet direct situé au droit de l'arête de diffraction (figure 15).

Lorsque le fait de courber le rayon met S et R en vue directe, la différence de marche  $\delta$  doit être négative.

À noter qu'il est possible que S et R soient masqués en situation homogène et passent en vue directe en situation favorable (deuxième schéma de la figure 15). Dans cette situation, le rayon "contourne" l'obstacle.

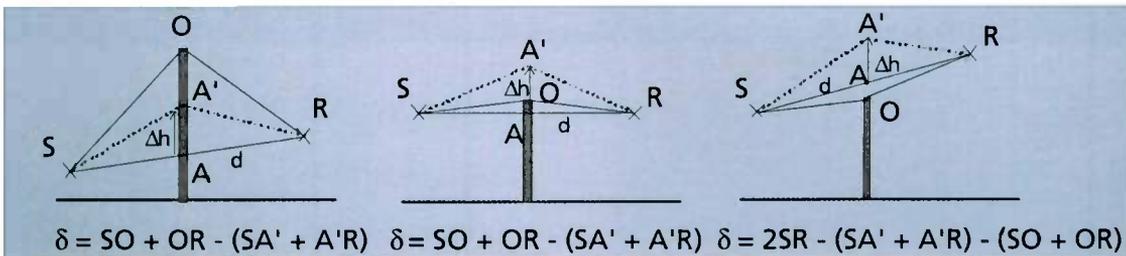


Figure 15: Calcul de la différence de marche en conditions favorables (diffraction simple)

S	Source	O	Point de diffraction
R	Récepteur	A'	Transformée du point A opérée par un décalage vertical vers le haut du point A de la quantité $\Delta h$
A	Point du trajet direct S-R en propagation rectiligne situé au droit de l'arête de diffraction		

Pour les diffractions multiples en conditions favorables, on appliquera les principes suivants :

- 1- déterminer le point  $A'$  à partir de la quantité  $\Delta h$  calculée au droit de chaque arête diffractant;
- 2- éliminer les arêtes conduisant à une diffraction négative (vue directe);
- 3- déterminer le rayon conduisant au plus court chemin reliant la source et le récepteur et passant par chacun des points de diffraction pris en compte (figure 16).

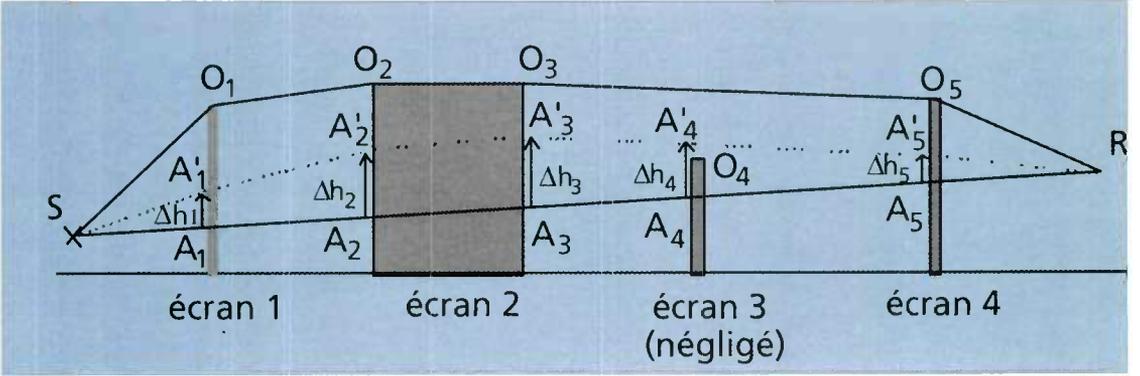


Figure 16 : Exemple de calcul de la différence de marche en conditions favorables, dans le cas de diffractions multiples

$$\delta = SO_1 + O_1O_2 + O_2O_3 + O_3O_5 + O_5R - (SA'_1 + A'_1A'_2 + A'_2A'_3 + A'_3A'_5 + A'_5R)$$

La quantité  $\Delta h$  (en m) se calcule selon la formule (voir figure 17) :

$$\Delta h = \frac{d_1 d_2}{2\gamma} \quad [15]$$

où

$\gamma$  représente le rayon de courbure du trajet acoustique, en m.  $\gamma$  sera pris égal à  $8d$ ,  $d$  étant la distance directe de propagation, sans pouvoir devenir inférieur à 1000 m (si  $\gamma \leq 1000$  m,  $\gamma = 1000$  m).

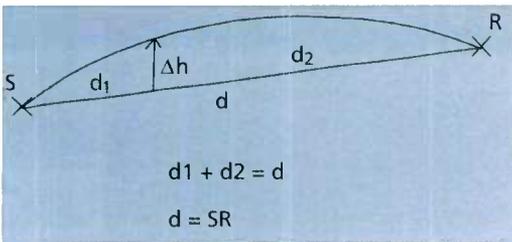


Figure 17 : Définition du terme  $\Delta h$

#### 7.4.4 Calcul de l'atténuation $A_{\text{dif}}$

L'atténuation due à la diffraction, prenant en compte les effets de sol côté source et côté récepteur, se calcule selon la formule générale suivante:

$$A_{\text{dif}} = \Delta_{\text{dif}}(S,R) + \Delta_{\text{sol}}(S,O) + \Delta_{\text{sol}}(O,R) \quad [16]$$

où  $\Delta_{\text{dif}}(S,R)$  est l'atténuation due à la diffraction entre la source  $S$  et le récepteur  $R$

$\Delta_{\text{sol}}(S,O)$  est l'atténuation due à l'effet de sol côté source, pondérée par la diffraction côté source (formule 17)

$\Delta_{\text{sol}}(O,R)$  est l'atténuation due à l'effet de sol côté récepteur, pondérée par la diffraction côté récepteur (formule 18)

Calcul du terme  $\Delta_{\text{sol}}(S,O)$  :

$$\Delta_{\text{sol}}(S,O) = -20 \lg \left( 1 + \left( 10^{\frac{A_{\text{sol}}(S,O)}{20}} - 1 \right) 10^{-\frac{(\Delta_{\text{dif}}(S',R) - \Delta_{\text{dif}}(S,R))}{20}} \right) \quad [17]$$

où  $A_{\text{sol}}(S,O)$  est l'atténuation due à l'effet de sol entre la source  $S$  et le point de diffraction  $O$ ; pour les plateformes routières, et lorsque l'arête de diffraction n'est pas trop éloignée, on peut forfaitiser ce terme à la valeur de -3 dB, de façon à tenir compte de la réflexion sur la plateforme:  $A_{\text{sol}}(S,O) = -3$  dB (en conditions homogènes et favorables). Dans les autres cas, le terme  $A_{\text{sol}}(S,O)$  se calcule selon le cas en conditions favorables (7.3.3) ou en conditions homogènes (7.3.4), avec les hypothèses suivantes:

$$z_r = z_{0,s}$$

$$d = SO$$

en conditions favorables:

$$G_s = 0,$$

$$G_m = G_r = G'_{\text{trajet}} \text{ calculé entre } S \text{ et } O$$

en conditions homogènes:

$$G = G'_{\text{trajet}} \text{ calculé entre } S \text{ et } O$$

$\Delta_{\text{dif}}(S',R)$  est l'atténuation due à la diffraction entre la source image  $S'$  et  $R$ , calculée selon la formule 14.

$\Delta_{\text{dif}}(S,R)$  est l'atténuation due à la diffraction entre  $S$  et  $R$ , calculée selon la formule 14.

Calcul du terme  $\Delta_{sol(O,R)}$  :

$$\Delta_{sol(O,R)} = -20 \lg \left( 1 + \left( 10^{-A_{sol(OR)}/20} - 1 \right) 10^{-(\Delta_{dif(S,R')} - \Delta_{dif(S,R)})/20} \right) \quad [18]$$

où

$A_{sol(O,R)}$  est l'atténuation due à l'effet de sol entre le point de diffraction O et le récepteur R, calculée selon le cas en conditions favorables (7.3.3) ou en conditions homogènes (7.3.4), avec les hypothèses suivantes :

$$z_s = z_{o,r}$$

$$d = OR$$

en conditions favorables :

$$G_s = G_m = G_r = G_{trajet} \text{ calculé entre O et R}$$

en conditions homogènes :

$$G = G_{trajet} \text{ calculé entre O et R}$$

Attention : il n'y a pas lieu ici de prendre en compte la correction  $G'_{trajet}$  puisque la source considérée n'est plus la route elle-même, mais le point de diffraction. C'est donc bien  $G_{trajet}$  qui doit intervenir dans le calcul des effets de sol, y compris pour le terme minorant de la formule [12] qui devient :

$$\ll -3 (1 - G_{trajet}) \gg$$

$\Delta_{dif(S,R')}$  est l'atténuation due à la diffraction entre S et le récepteur image R', calculée selon la formule 14.

$\Delta_{dif(S,R)}$  est l'atténuation due à la diffraction entre S et R, calculée selon la formule 14.

Note : la formule [14] peut être utilisée pour calculer des diffractions sur des arêtes verticales (diffractions latérales). Si c'est le cas, on prend  $A_{dif} = \Delta_{dif(S,R)}$  et on conserve le terme  $A_{sol}$  dans les formules [2] et [4]. De plus,  $A_{atm}$  et  $A_{sol}$  seront calculés à partir de la longueur totale du trajet de propagation ( $A_{div}$  restant lui calculé à partir de la distance directe d).

## 7.5 Réflexion sur obstacles verticaux

Les réflexions sur des obstacles verticaux sont traitées par le biais de sources images. Sont ainsi traitées les réflexions sur les façades des bâtiments et les écrans anti-bruit. On considère qu'un obstacle est vertical si son inclinaison par rapport à la verticale est inférieure à 15°.

Si l'on souhaite traiter des réflexions sur des obstacles fortement inclinés, il est alors nécessaire d'appliquer cette méthode en 3-Dimensions.

Les obstacles dont les dimensions sont petites devant la longueur d'onde doivent être négligés pour le calcul de réflexion.

Les réflexions sur le sol ne sont pas traitées ici: elles sont intégrées directement dans les calculs d'effet de sol et de diffraction.

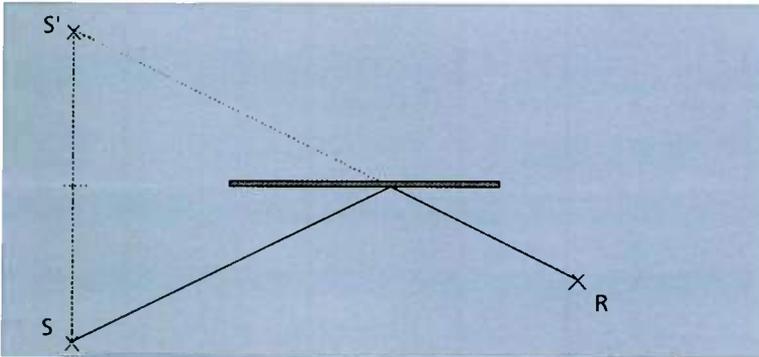


Figure 18 : Réflexion spéculaire sur un obstacle traitée par la méthode des sources images  
S : source  
S' : source image  
R : Récepteur

Si  $L_W$  est le niveau de puissance de la source S et  $\alpha_r$  le coefficient d'absorption de la surface de l'obstacle, le niveau de puissance de la source image S' est égal à :

$$L_{W'} = L_W + 10\lg(1-\alpha_r) \quad 0 \leq \alpha_r < 1 \quad [19]$$

On applique ensuite les atténuations de propagation vues plus haut à ce trajet source image-récepteur, comme pour un trajet direct.

## 7.6 Eléments particuliers

Dans cette première version, les tranchées, tunnels et couvertures partielles sont traités par le biais de sources équivalentes comme décrit dans le Guide du Bruit des Transports Terrestres.

**Page laissée blanche intentionnellement**

## Annexe 1

### Valeurs et cartes d'occurrences météorologiques de long terme des conditions favorables à la propagation sonore

Cette annexe présente :

- 2 tableaux fournissant pour chaque station météorologique les pourcentages d'occurrence de long terme des conditions «favorables» à la propagation sonore, par pas de 20 degrés de direction source élémentaire-récepteur, et pour chaque période considérée (6h-22h et 22h-6h);
- 1 carte situant les stations météorologiques ayant fait l'objet d'une exploitation, qui permet d'identifier les stations sur les cartes qui suivent;
- 18 cartes fournissant, par pas de 40 degrés de direction source élémentaire-récepteur, les lignes d'isovaleurs d'occurrence de conditions «favorables», de jour (6h-22h) et de nuit (22h-6h), à l'exclusion des zones d'altitude supérieure à 500 mètres.

Les valeurs d'occurrences figurant dans les tableaux et sur les cartes sont des **pourcentages**.

L'angle exprimant la direction source-récepteur est noté comme pour les roses des vents : c'est l'angle entre cette direction et le nord si on considère le récepteur au centre de la rose, compté dans le sens des aiguilles d'une montre. En d'autres termes, la valeur d'occurrence donnée correspond au bruit en provenance de cette direction. Exemples :

- la source est au nord du récepteur  $\Rightarrow$  direction 360 degrés
- la source est à l'est du récepteur  $\Rightarrow$  direction 90 degrés
- la source est au sud-ouest du récepteur  $\Rightarrow$  direction 225 degrés.

Du fait de problèmes de disponibilité des données, les valeurs pour la période 22 h-6 h ne sont données que pour 35 des 40 stations.

Les zones d'altitude supérieure à 500 mètres sont représentées en fond tramé. Dans ces zones, les lignes isovaleurs sont tracées en pointillé. **Ce tracé répond à un simple objectif de lisibilité, mais n'a aucune validité sur le plan météorologique:** il est expressément déconseillé de déduire de ces cartes des valeurs d'occurrence à l'intérieur de ces zones.

(cartes établies par la division climatologie du CSTB - Nantes)

# Jour

direction (deg)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
ABBEVILLE	33	31	32	33	35	36	36	38	41	46	48	49	49	47	46	45	43	38
AVORD	32	31	32	32	31	30	30	32	34	38	40	41	41	41	41	39	36	34
BORDEAUX	34	32	30	29	28	26	26	28	31	35	38	41	42	43	43	43	41	38
BREST	46	43	40	38	37	37	38	39	42	46	49	51	52	53	52	52	51	49
CAEN	35	33	32	30	31	31	33	37	43	47	48	49	50	49	49	48	45	40
CAMBRAI	31	29	29	30	32	35	39	42	46	51	53	54	52	49	45	41	38	34
CARCASSONNE	44	34	31	31	31	30	29	30	28	40	52	57	60	60	60	59	56	56
CARPENTRAS	39	35	31	21	19	19	20	21	22	23	24	28	40	42	45	44	43	41
CHERBOURG	37	33	32	33	34	36	38	40	43	47	51	52	52	52	50	47	44	41
DIJON	35	33	30	29	27	28	29	31	33	34	36	36	36	36	36	37	37	37
DINARD	41	38	36	34	33	33	34	37	39	42	45	46	47	48	48	47	45	43
DUNKERQUE	37	34	34	35	35	38	39	43	47	50	52	53	53	51	50	48	44	39
ÉVREUX	36	33	32	32	31	32	34	36	39	44	46	47	48	48	46	44	43	40
GOURDON	24	23	24	25	26	27	29	32	34	36	36	35	36	36	36	34	31	28
ISTRES	55	51	47	38	31	30	30	30	31	31	32	35	43	49	52	54	54	55
LA ROCHELLE	41	39	37	36	35	34	33	31	31	33	37	40	40	41	40	40	42	43
LILLE	32	31	30	31	32	35	37	40	45	48	50	51	50	49	45	43	39	34
LIMOGES	31	30	29	29	27	26	26	28	31	33	34	35	34	34	34	35	33	32
LORIENT	40	39	38	36	34	33	34	36	42	45	48	50	51	52	52	50	47	42
LUXEUIL	25	25	25	25	26	28	30	32	34	35	35	36	36	36	34	31	28	26
LYON	40	38	34	28	28	29	30	30	30	29	30	30	34	35	35	38	40	40
MÂCON	40	36	32	28	27	27	28	29	30	31	33	36	38	39	41	42	43	42
MT-DE-MARSAN	25	24	24	24	24	25	25	28	30	34	37	39	40	40	39	36	32	28
MONTÉLIMAR	62	61	56	49	38	24	22	21	22	22	22	22	24	34	49	56	61	62
MONTPELLIER	42	38	36	33	31	30	30	31	32	35	38	38	39	40	43	45	46	45
NANTES	33	33	33	33	32	32	33	34	38	41	43	43	42	41	40	39	37	35
NICE	40	35	34	29	29	27	26	26	24	23	24	25	28	29	35	37	37	40
NÎMES	51	49	46	42	34	29	27	27	28	28	28	29	32	39	45	48	50	51
ORLÉANS	35	35	34	33	33	33	34	36	39	42	44	45	45	44	43	41	39	37
PAU	23	22	21	22	22	22	22	23	26	29	32	34	36	36	35	33	30	27
PERPIGNAN	52	43	30	26	25	24	22	21	20	22	30	45	50	53	55	55	55	54
POITIERS	33	31	30	30	30	31	31	33	36	39	41	42	41	40	38	38	36	34
REIMS	27	26	26	26	27	29	32	36	38	41	42	43	43	43	40	36	32	29
RENNES	37	36	35	33	33	33	35	36	37	38	39	40	41	41	41	39	37	37
ST-DIZIER	28	28	28	28	29	30	32	35	38	40	41	41	40	38	36	33	30	28
ST-RAPHAËL	38	32	31	30	32	33	35	33	30	30	32	32	36	38	41	42	42	43
STRASBOURG	30	28	26	25	27	28	30	32	34	35	36	35	34	32	32	32	32	32
TOUL	33	33	33	32	32	33	34	35	37	39	41	41	40	39	35	33	32	32
TOULOUSE	28	25	24	25	26	26	27	29	32	38	40	42	44	45	45	44	41	36
TOURS	34	34	33	33	33	33	32	33	35	37	39	40	41	41	40	39	37	35

# Nuit

direction (deg)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
ABBEVILLE	77	76	76	77	79	81	84	86	87	88	88	87	86	84	84	83	81	79
AVORD	84	83	82	83	85	87	89	90	90	90	90	89	90	90	91	91	89	87
BORDEAUX	88	87	85	85	85	87	88	90	92	93	94	95	95	95	94	94	92	90
BREST	75	73	73	73	74	76	78	79	80	81	82	83	84	85	84	83	81	78
CAEN	74	71	70	71	74	77	81	85	88	90	91	91	91	90	89	86	83	78
CAMBRAI	68	68	69	73	78	82	85	87	88	89	90	91	91	89	86	81	76	71
CARCASSONNE	93	88	79	77	78	78	81	91	91	90	88	83	83	83	83	87	92	93
CHERBOURG	71	67	65	66	68	71	75	79	82	84	84	83	83	82	81	80	77	74
DIJON	86	86	87	90	89	89	86	85	86	87	90	94	96	98	96	94	89	87
DUNKERQUE	64	62	62	64	67	72	74	78	79	80	80	80	79	78	76	74	70	66
ÉVREUX	79	78	77	78	79	82	83	85	87	88	89	90	90	90	90	88	86	83
GOURDON	86	87	87	87	88	89	91	94	96	97	97	95	93	91	89	87	86	86
ISTRES	95	94	91	84	77	71	67	66	67	69	74	78	83	87	88	90	92	94
LILLE	74	73	73	76	79	82	84	86	87	87	88	89	89	89	88	86	82	78
LIMOGES	89	88	87	88	89	89	90	91	91	92	92	93	94	95	95	94	92	90
LORIENT	82	79	76	76	77	77	80	81	82	82	82	82	83	86	88	88	87	85
LUXEUIL	90	89	89	89	91	93	95	96	97	96	96	95	94	94	94	93	92	90
LYON	87	88	91	89	89	85	82	82	83	84	89	92	96	94	91	88	87	87
MT-DE-MARSAN	90	87	85	84	86	89	92	96	97	98	97	97	96	97	97	97	96	94
MONTÉLIMAR	94	95	96	96	90	82	73	65	63	63	65	73	83	90	97	96	95	94
MONTPELLIER	94	91	89	86	84	83	82	81	83	85	87	88	91	91	93	93	93	94
NANTES	85	84	85	86	88	89	91	91	91	91	90	90	90	90	90	89	88	87
NICE	98	98	97	92	89	78	74	74	73	74	85	89	94	96	97	98	98	99
NÎMES	95	95	94	90	85	80	76	74	74	76	78	82	86	89	91	91	92	94
ORLÉANS	80	78	78	79	82	85	87	88	89	89	89	89	90	91	91	90	87	83
PAU	93	89	87	86	87	89	93	95	97	99	99	98	97	97	97	96	96	95
PERPIGNAN	96	88	79	70	62	61	61	62	71	80	88	96	97	97	96	97	97	97
POITIERS	84	83	83	85	87	89	90	91	91	92	92	93	94	94	93	92	89	86
REIMS	80	80	80	82	84	87	89	91	92	94	95	96	95	94	91	89	86	82
RENNES	84	83	84	85	87	88	89	90	90	90	90	91	91	91	90	89	86	85
ST-DIZIER	83	83	83	85	88	91	93	95	95	95	94	94	94	93	92	91	88	85
STRA5BOURG	85	85	88	90	92	92	92	92	92	93	94	96	97	96	94	91	88	86
TOUL	90	90	89	90	91	92	91	89	87	85	86	86	88	91	94	94	94	92
TOULOUSE	87	84	80	78	78	78	82	88	93	97	98	97	95	93	92	92	91	90
TOURS	84	82	81	82	84	86	88	88	88	87	86	87	87	88	89	89	88	86

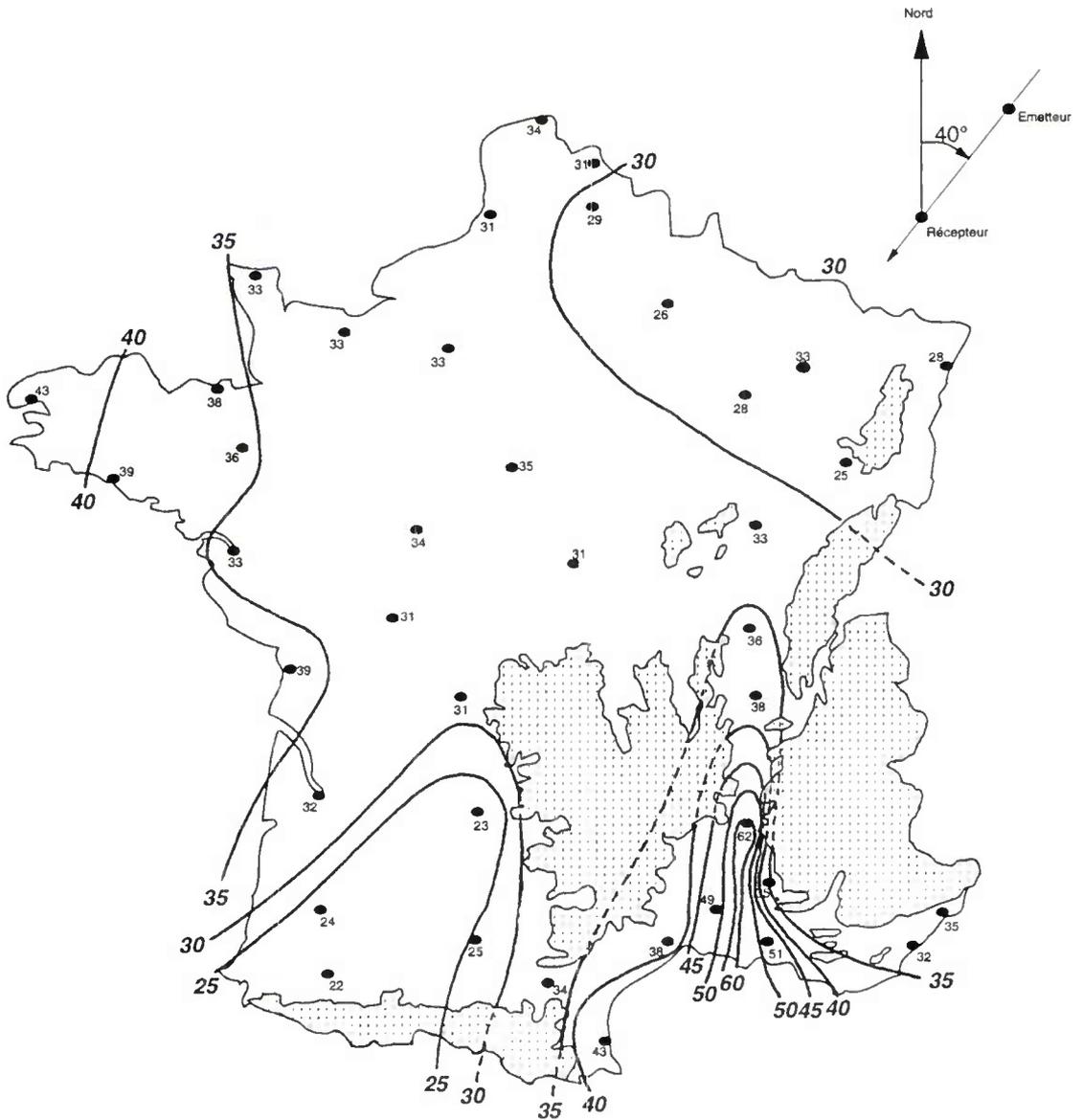
**Page laissée blanche intentionnellement**

# Stations utilisées pour les cartographies



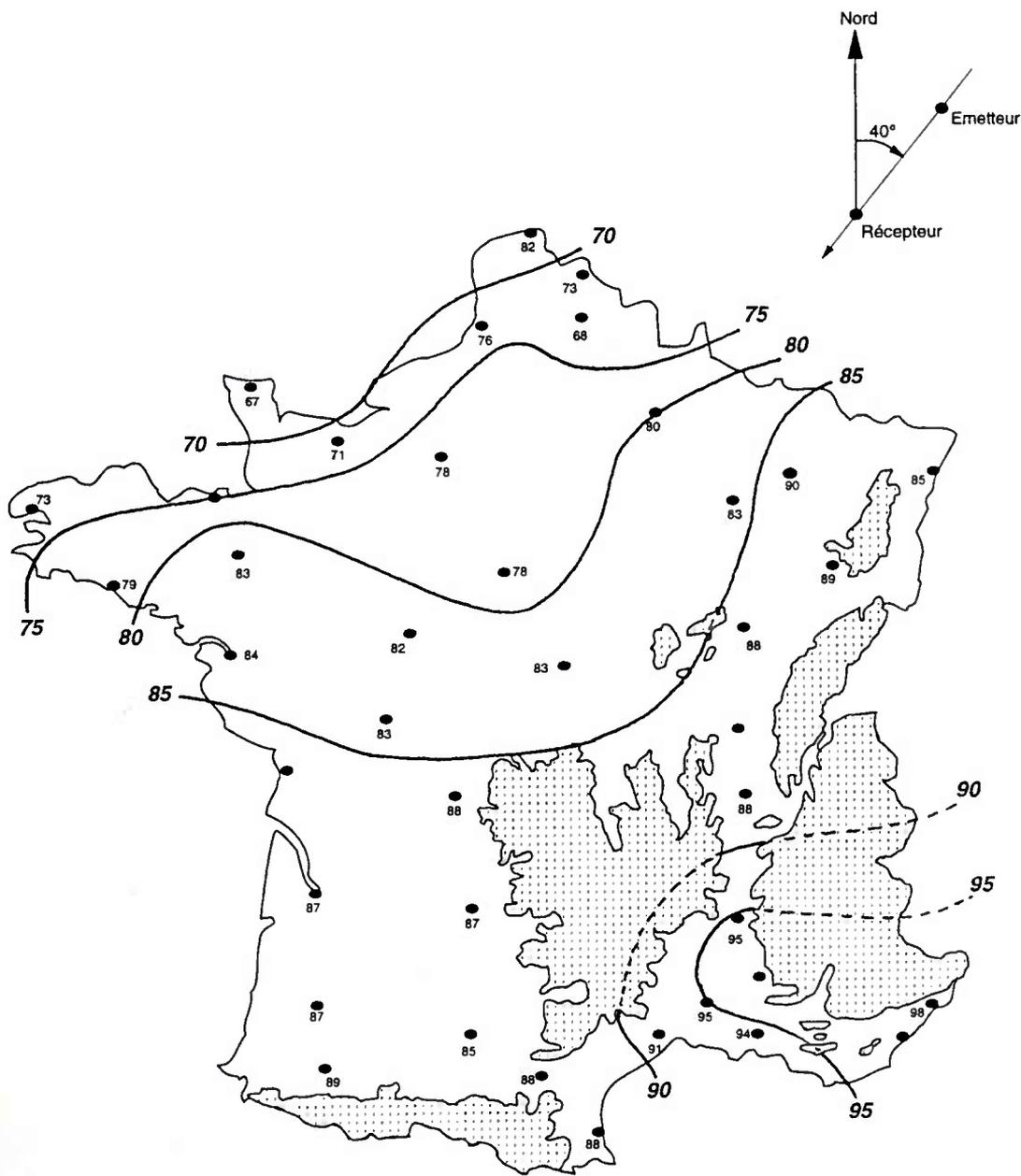
# Jour

Direction Émetteur-Récepteur 40 degrés



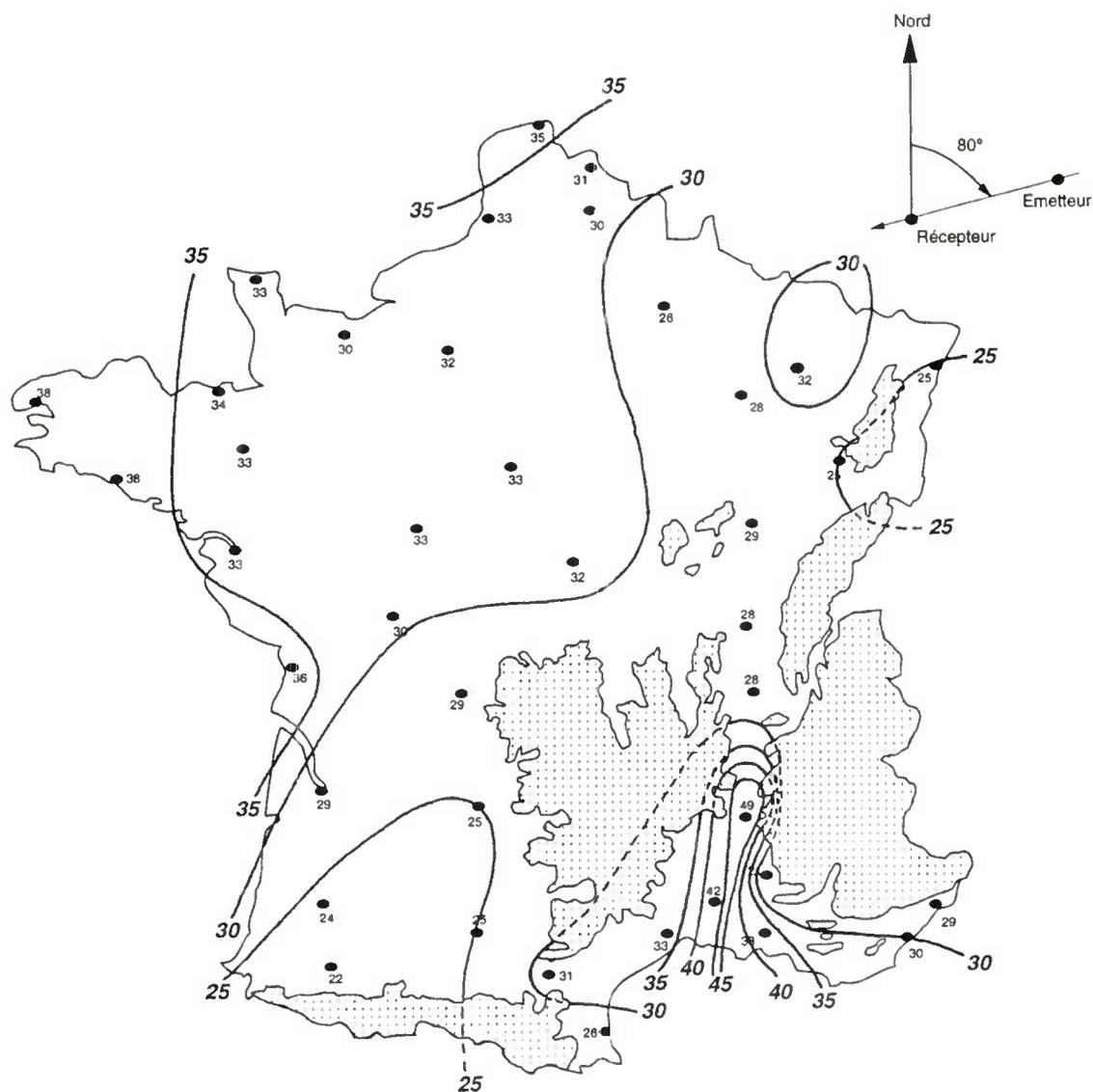
# Nuit

Direction Émetteur-Récepteur 40 degrés



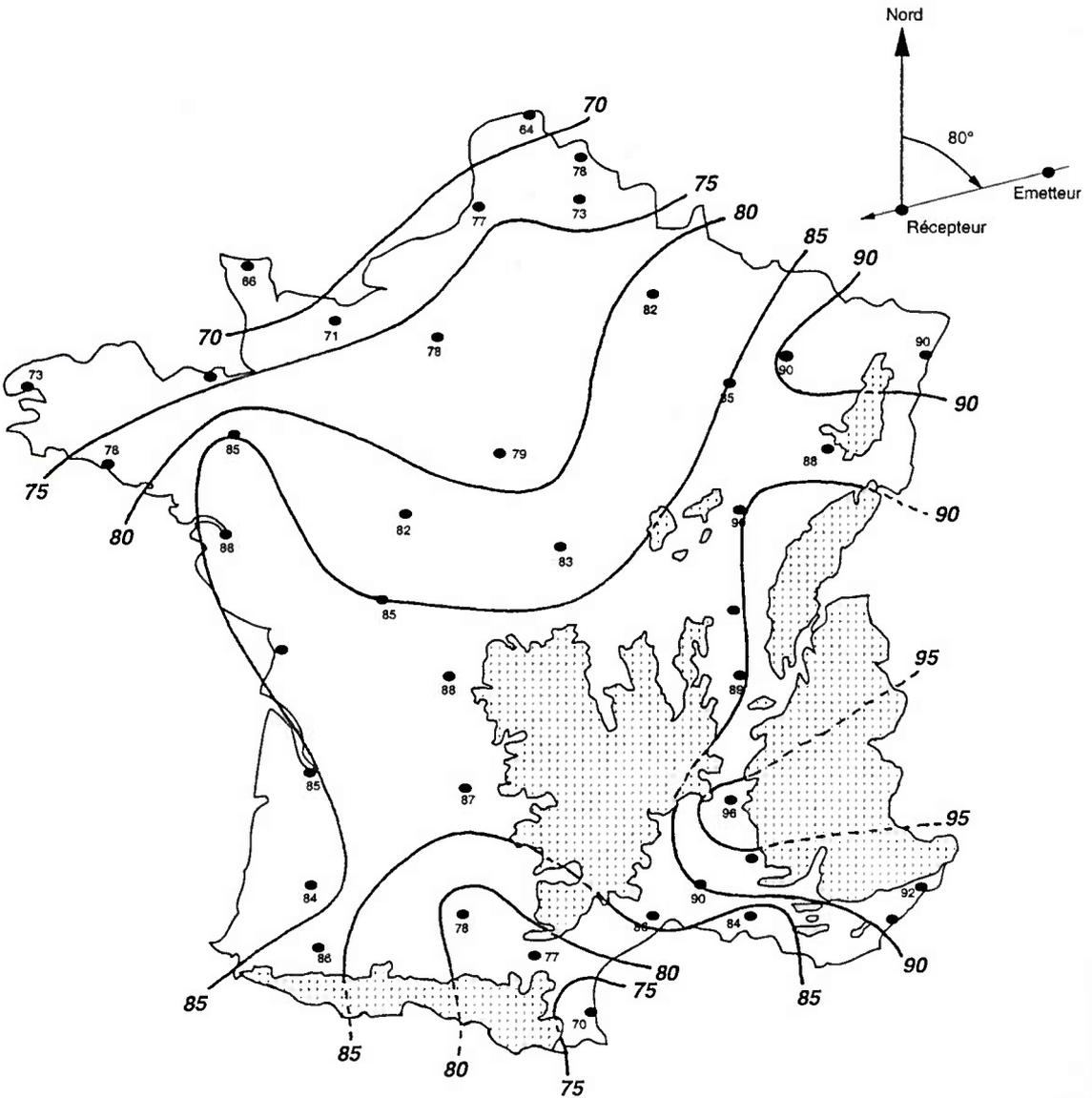
# Jour

Direction Émetteur-Récepteur 80 degrés



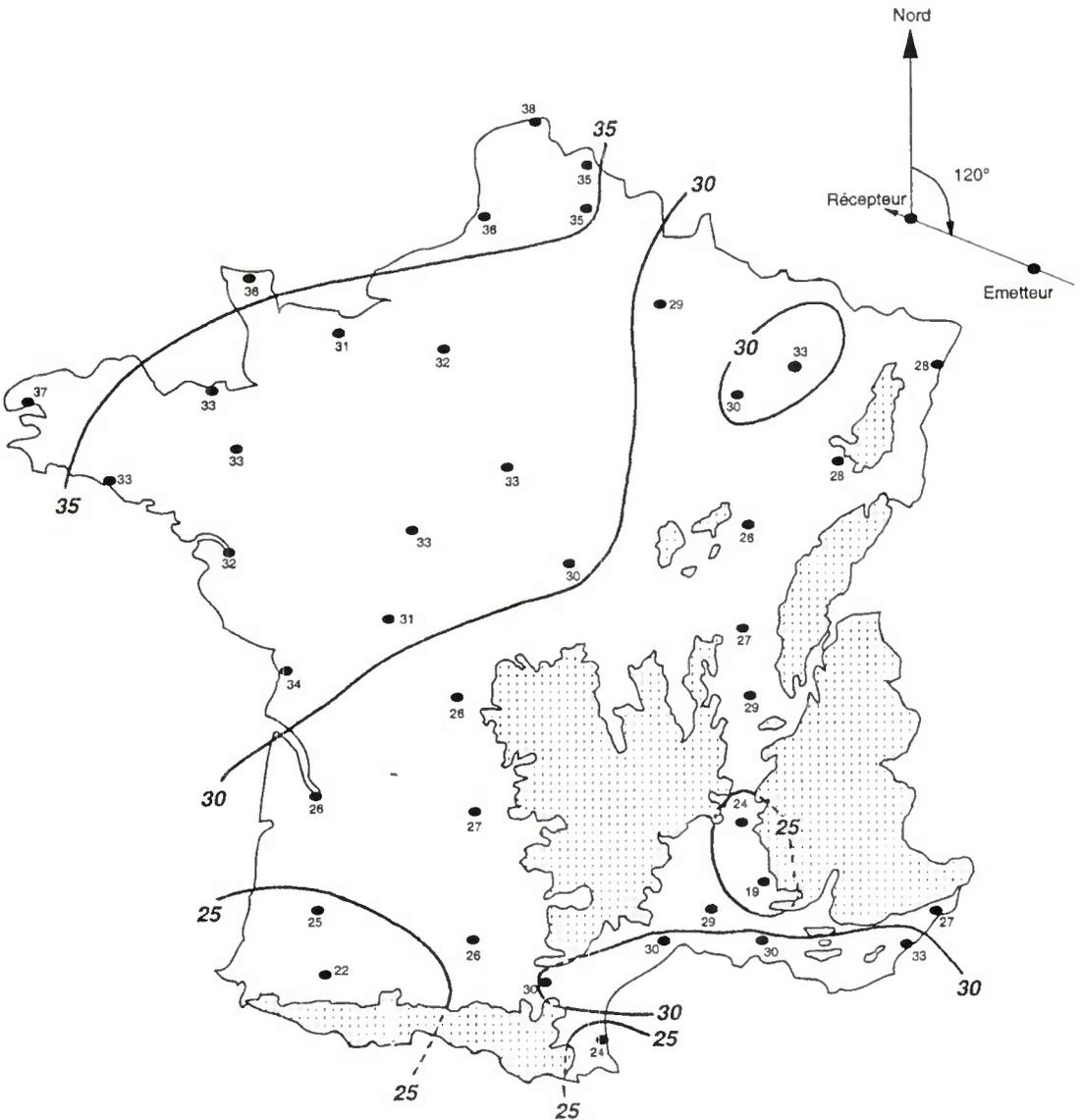
# Nuit

Direction Émetteur-Récepteur 80 degrés



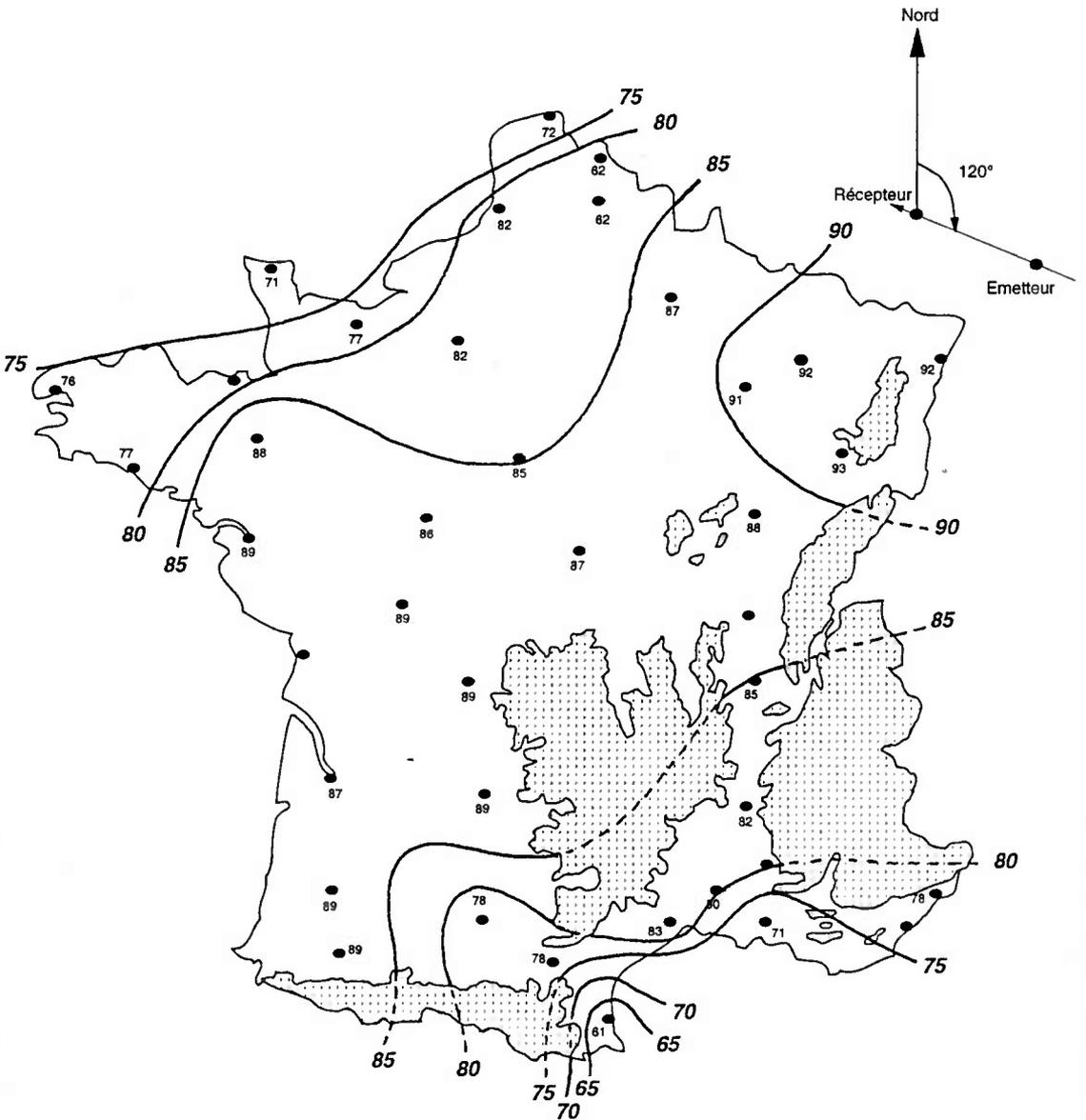
# Jour

Direction Émetteur-Récepteur 120 degrés



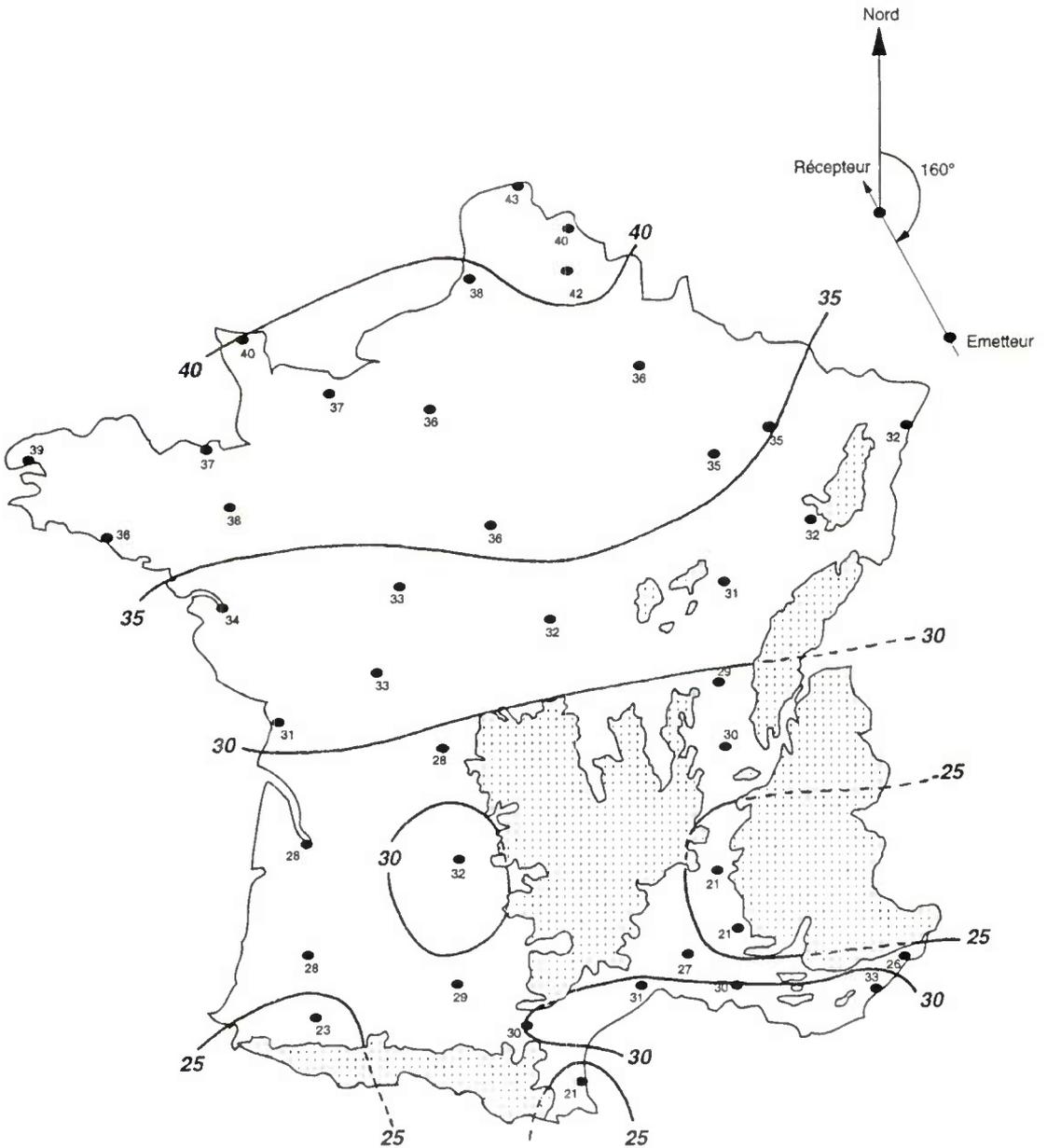
# Nuit

Direction Émetteur-Récepteur 120 degrés



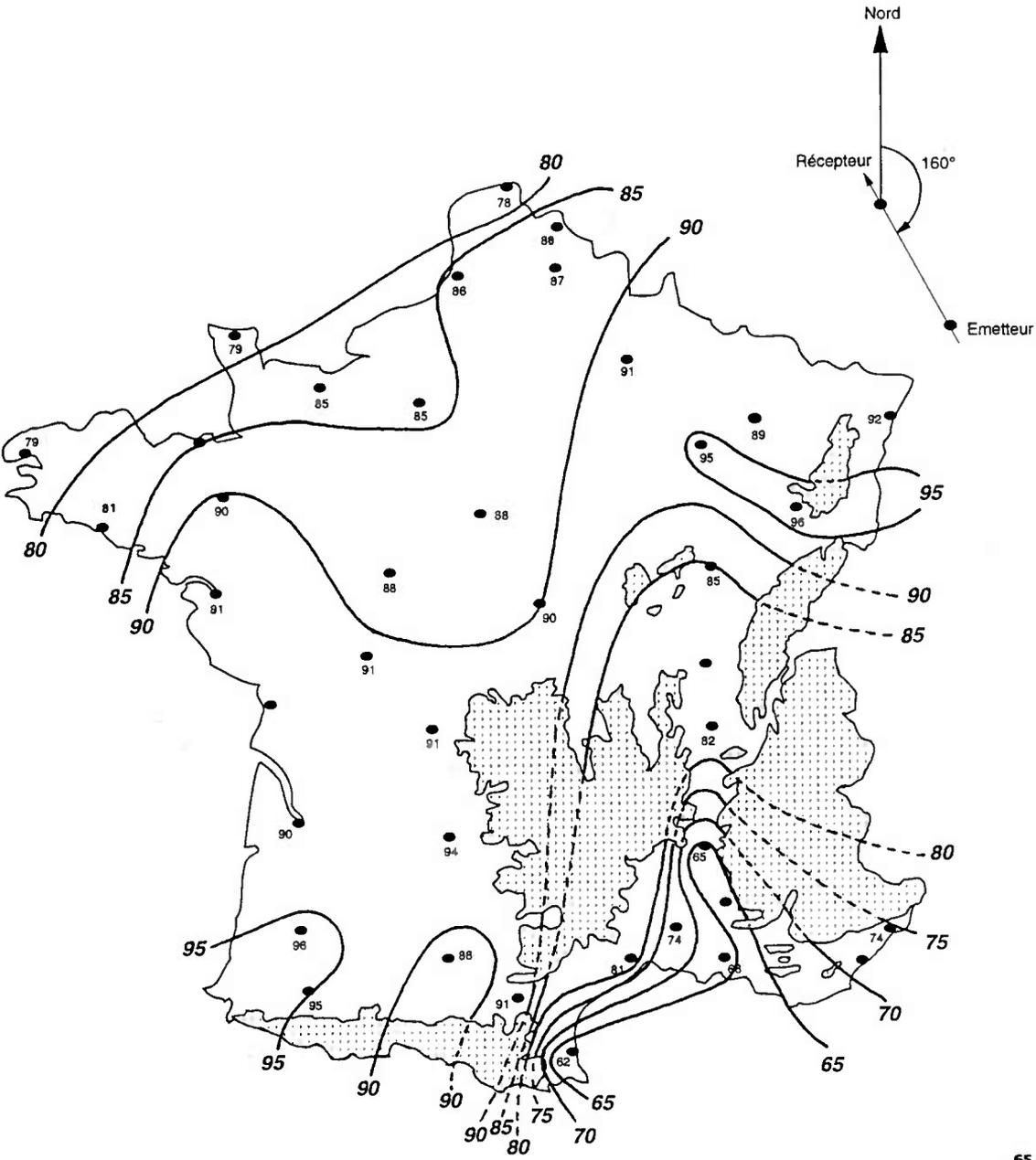
# Jour

Direction Émetteur-Récepteur 160 degrés



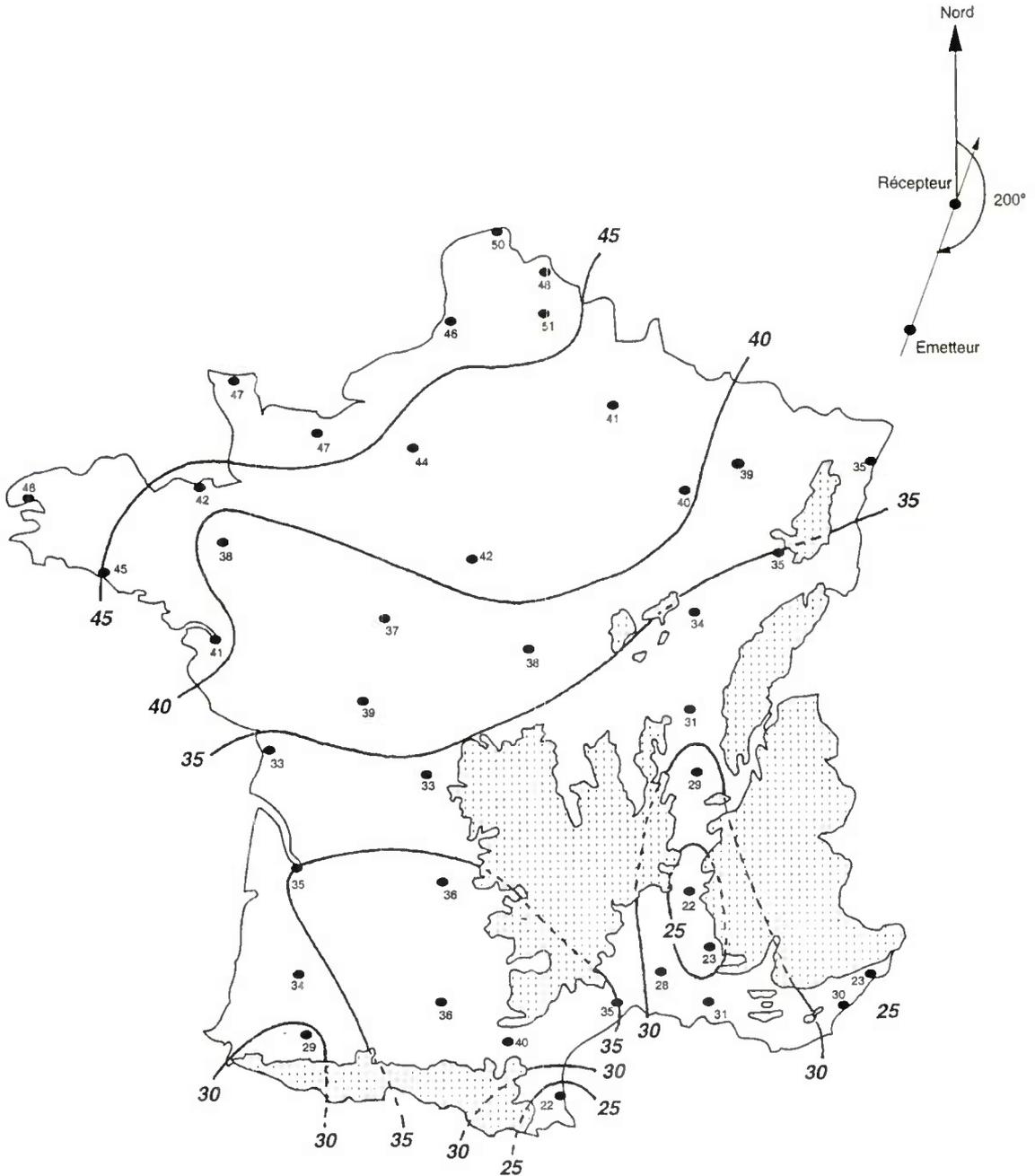
# Nuit

Direction Émetteur-Récepteur 160 degrés



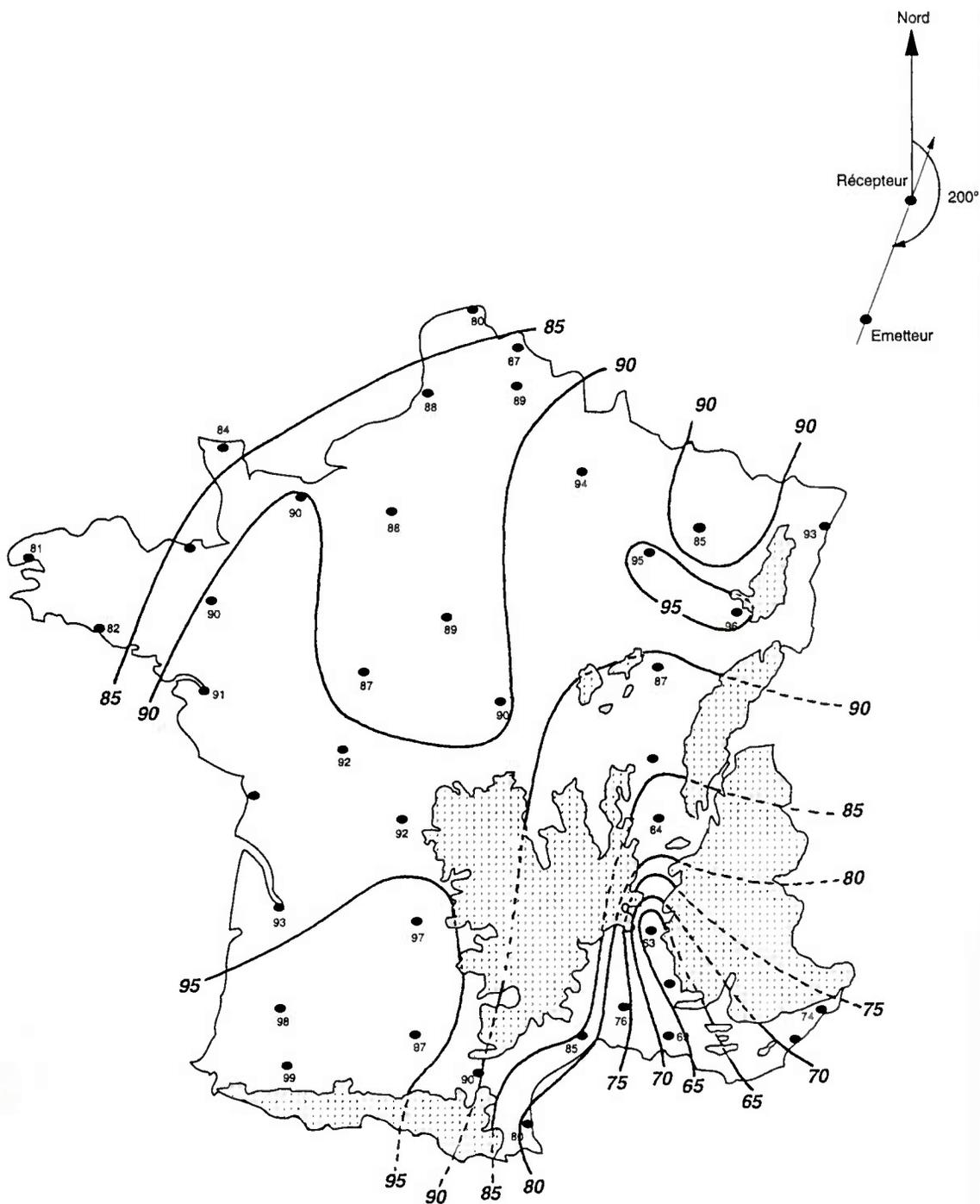
# Jour

Direction Émetteur-Récepteur 200 degrés



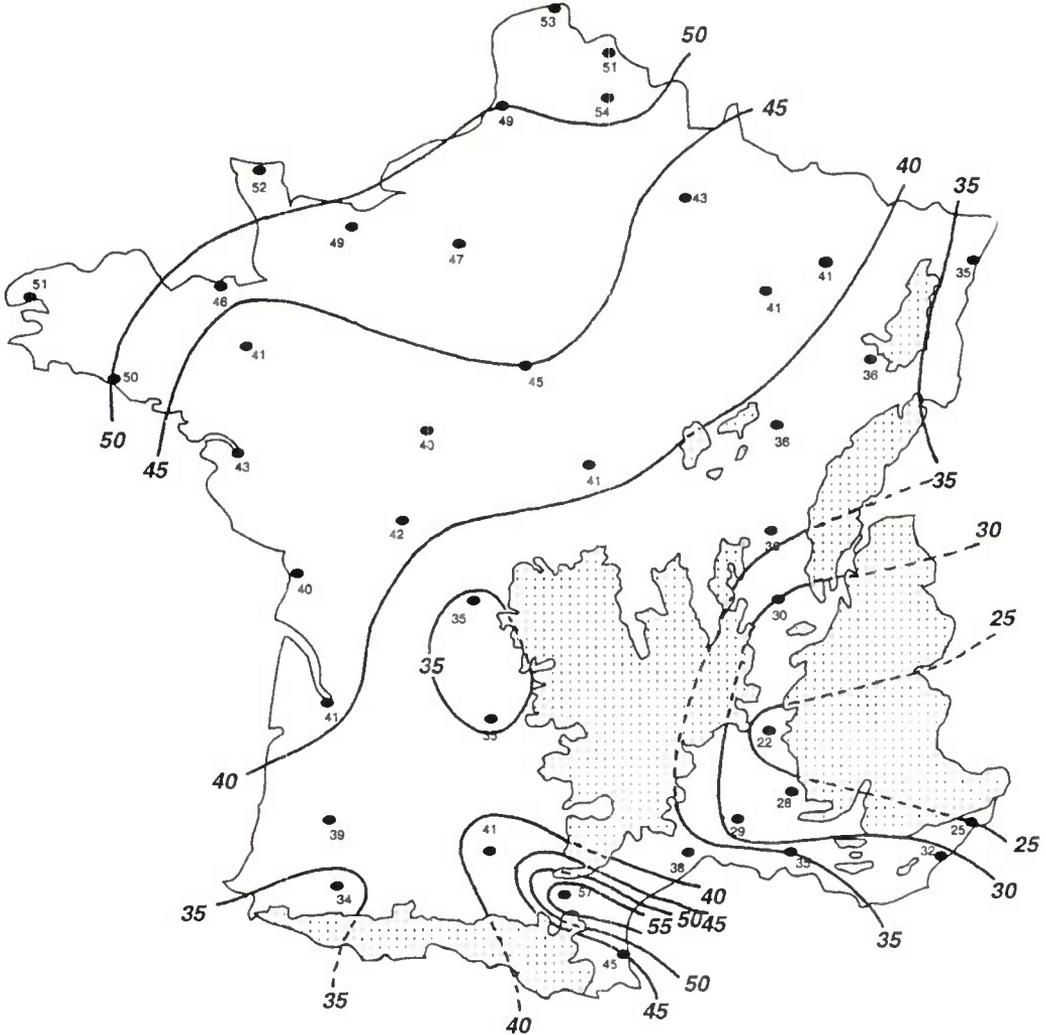
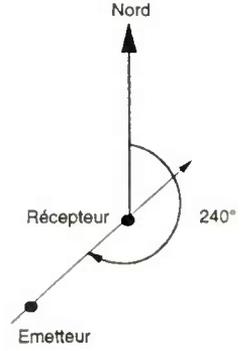
# Nuit

Direction Émetteur-Récepteur 200 degrés



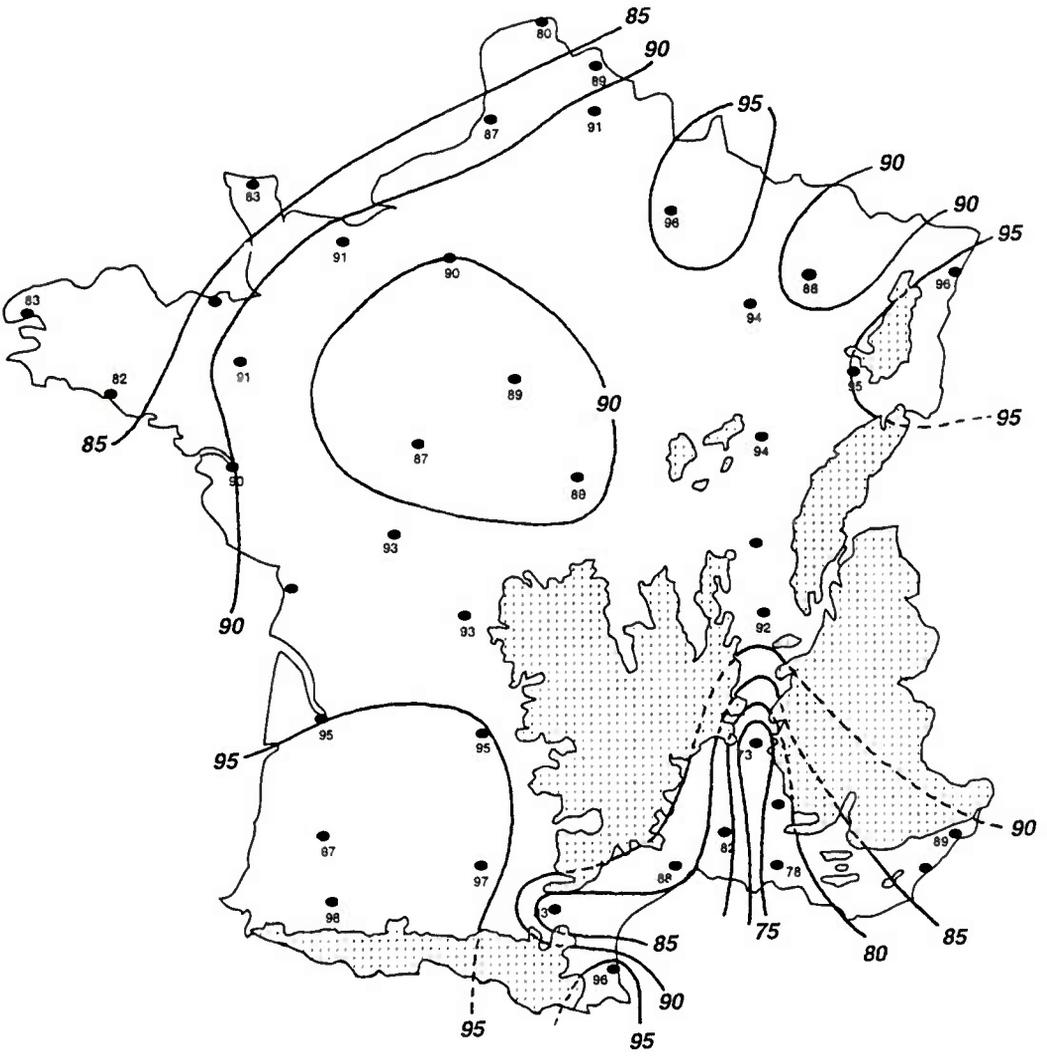
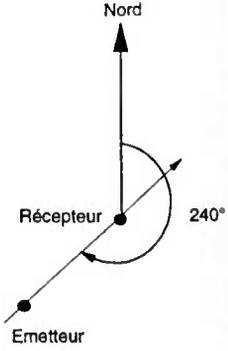
# Jour

Direction Émetteur-Récepteur 240 degrés



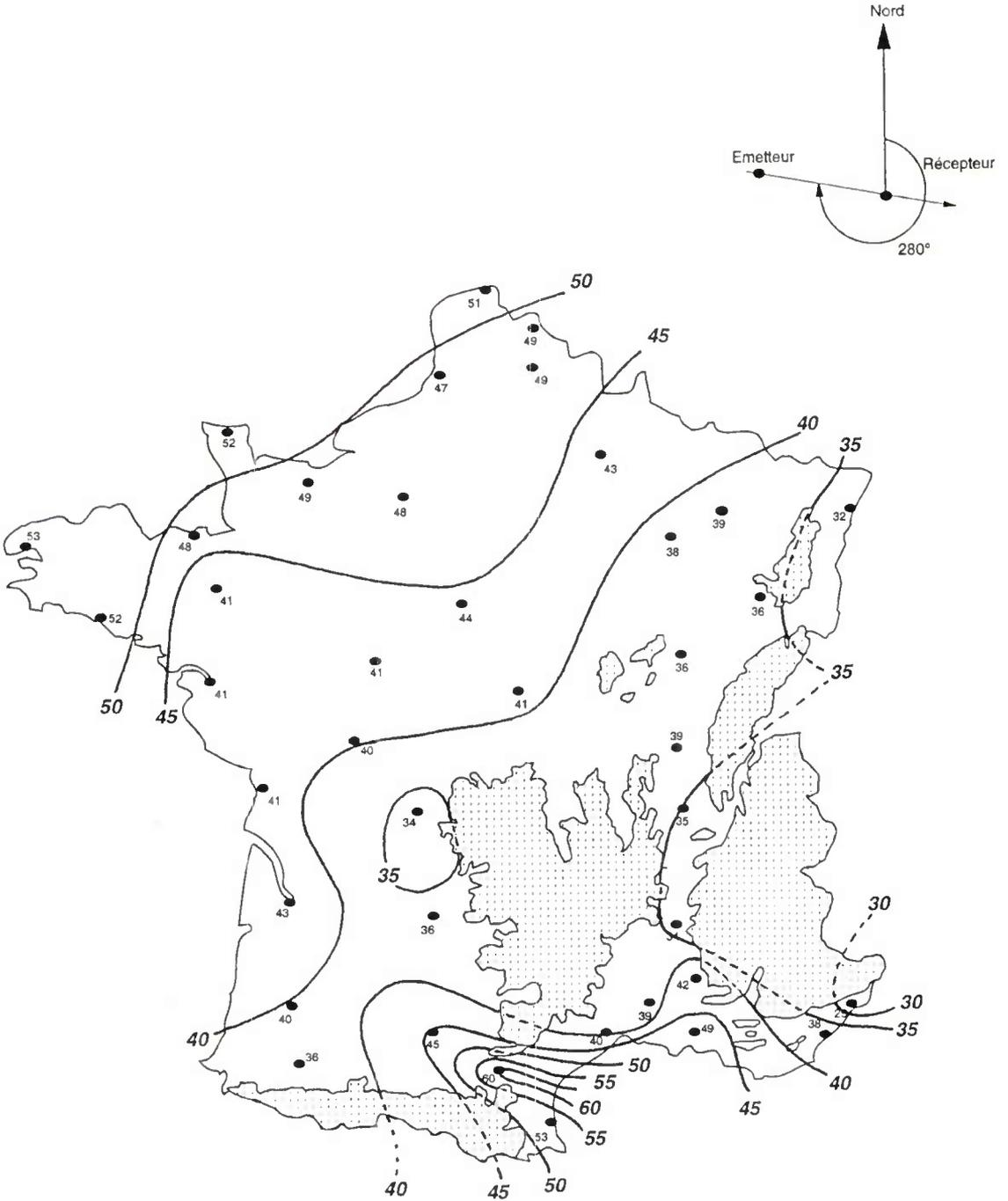
# Nuit

Direction Émetteur-Récepteur 240 degrés



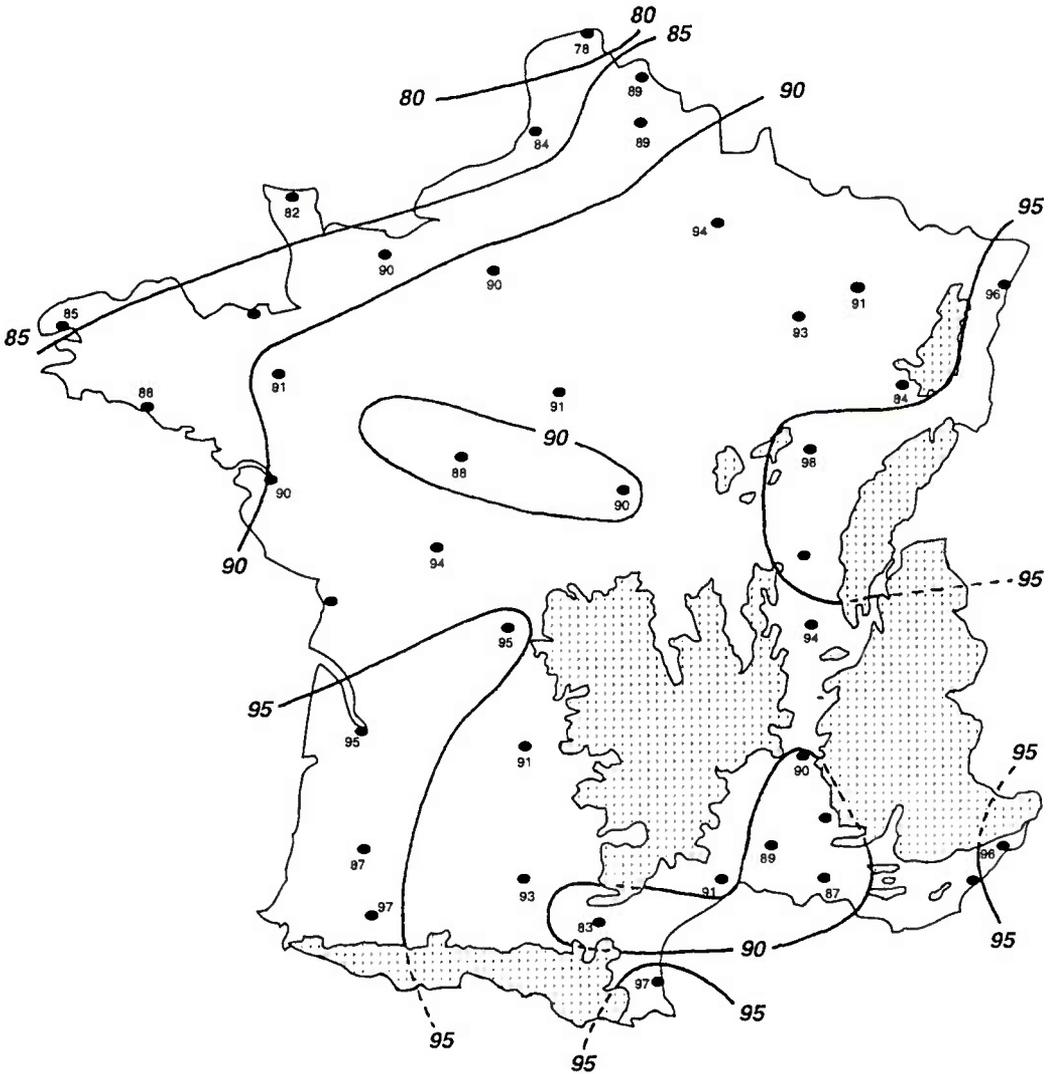
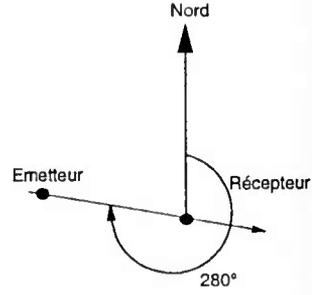
# Jour

Direction Émetteur-Récepteur 280 degrés



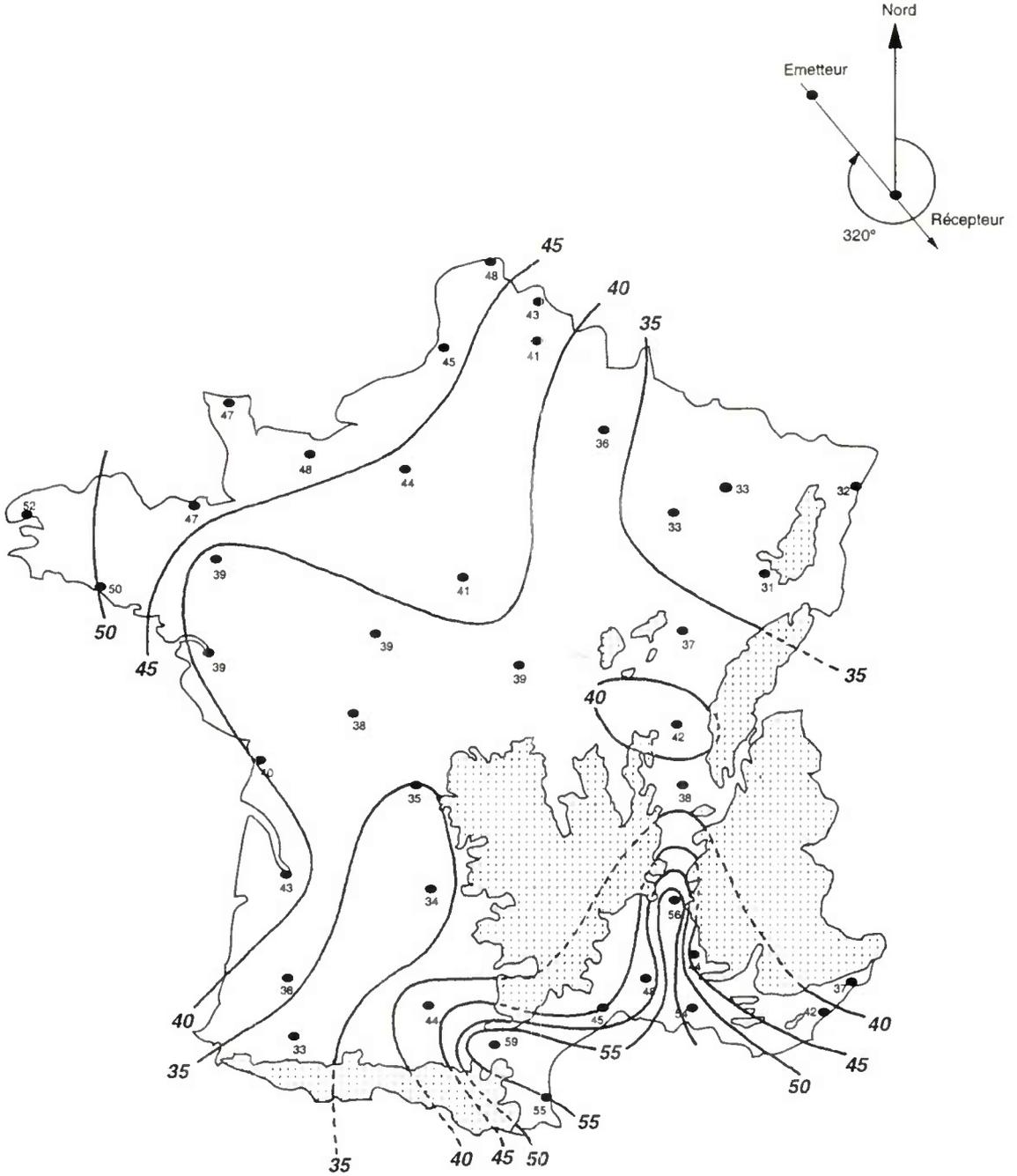
# Nuit

Direction Émetteur-Récepteur 280 degrés



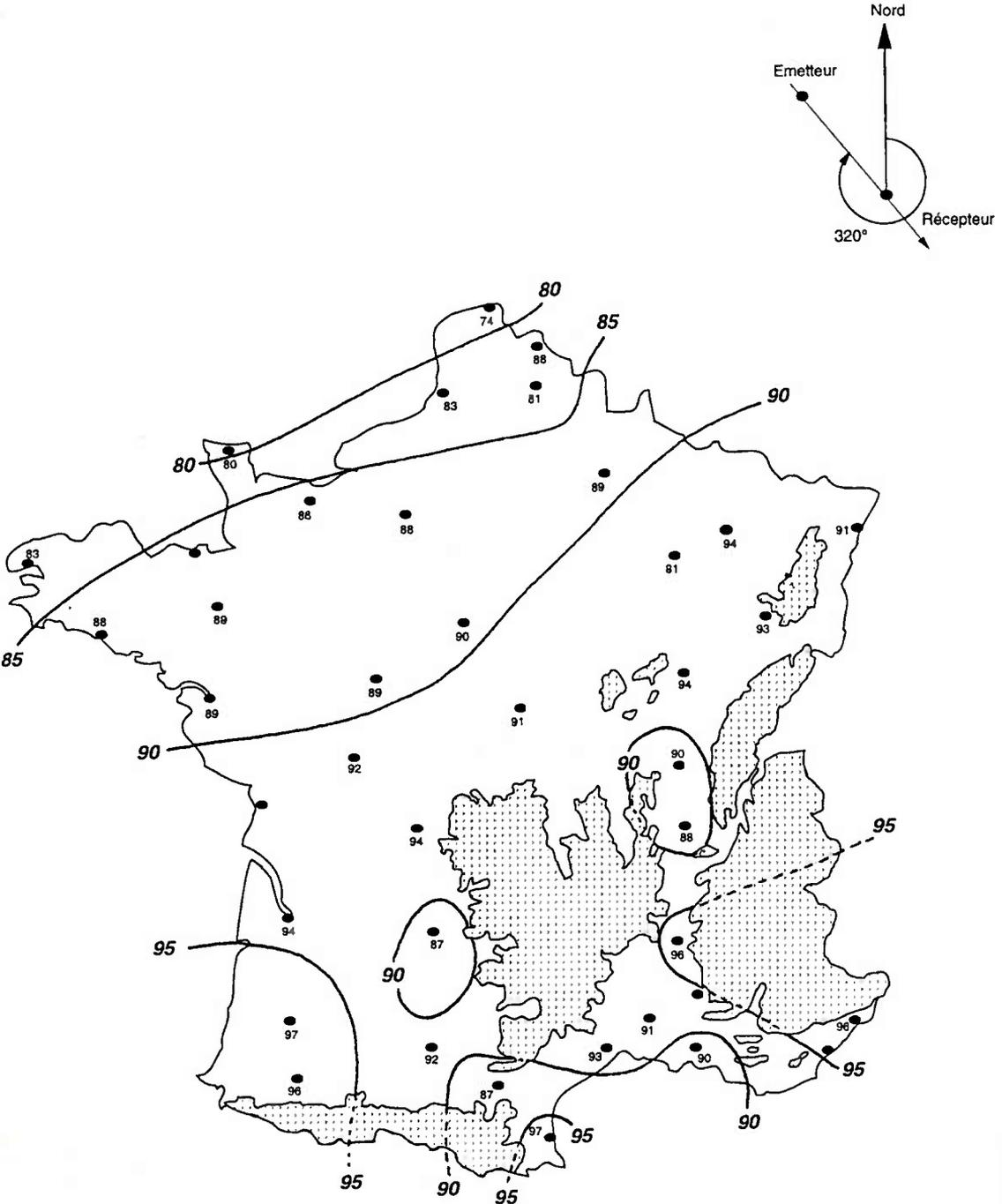
# Jour

Direction Émetteur-Récepteur 320 degrés



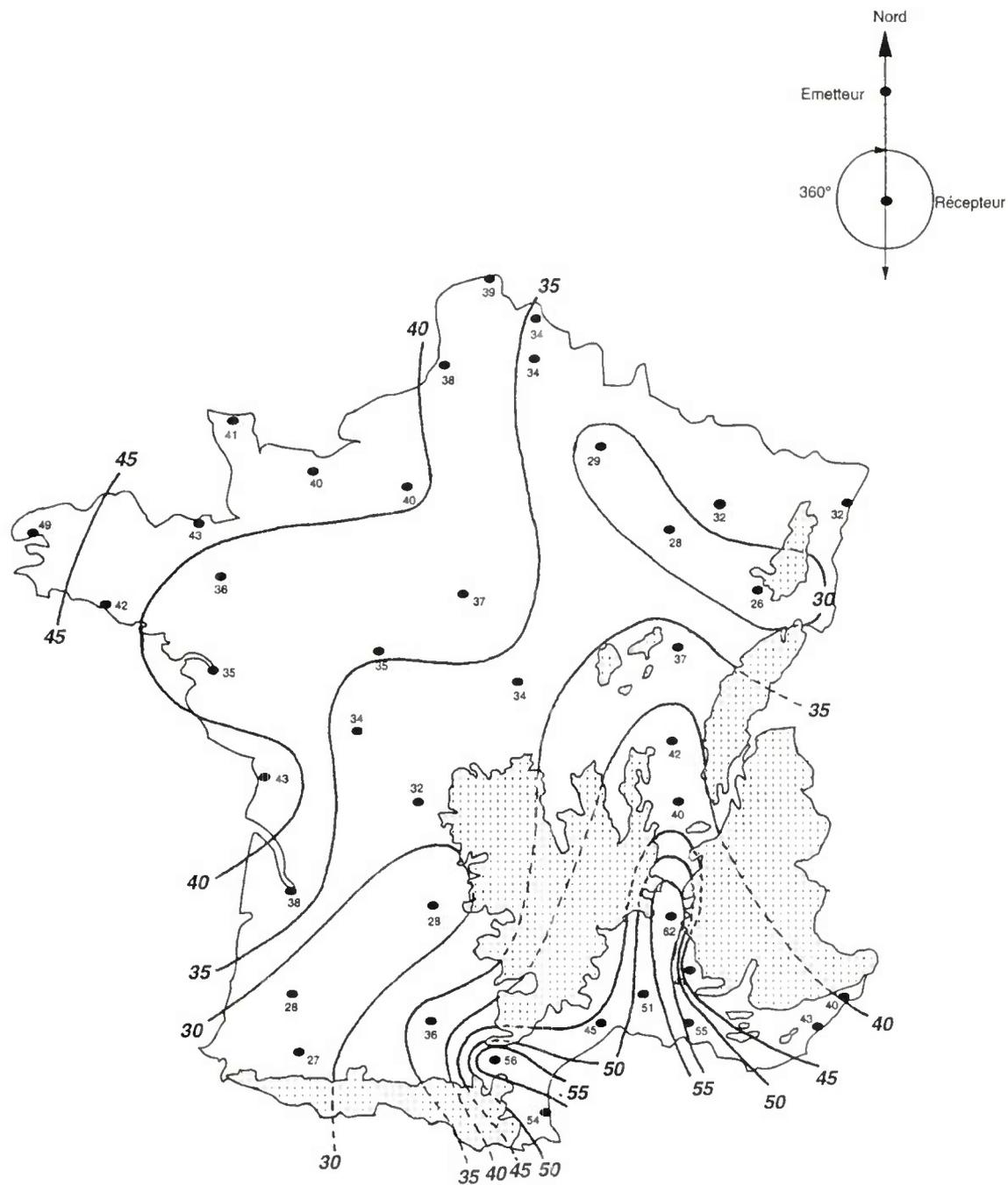
# Nuit

Direction Émetteur-Récepteur 320 degrés



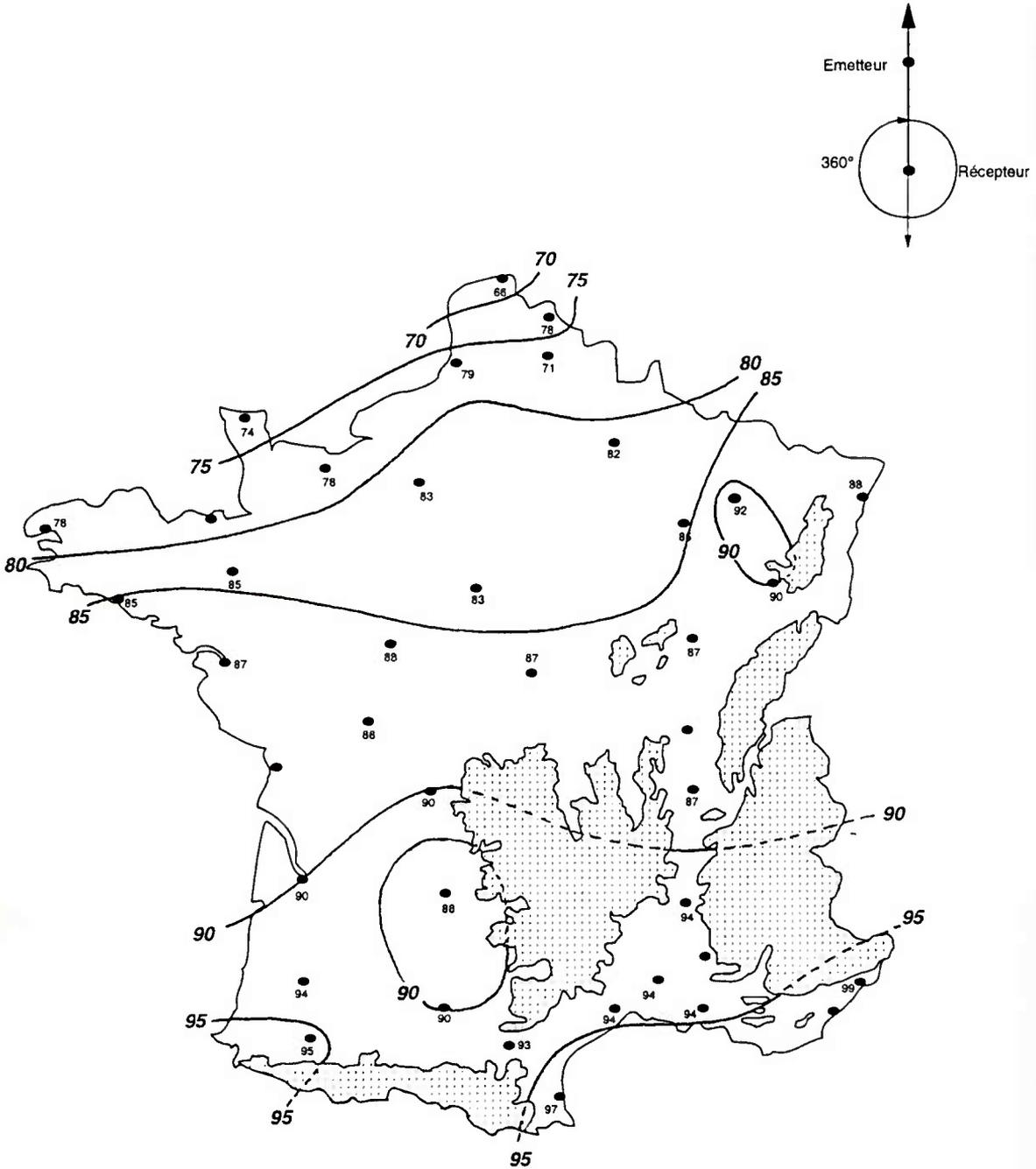
# Jour

Direction Émetteur-Récepteur 360 degrés



# Nuit

Direction Émetteur-Récepteur 360 degrés



**Page laissée blanche intentionnellement**

## Annexe 2

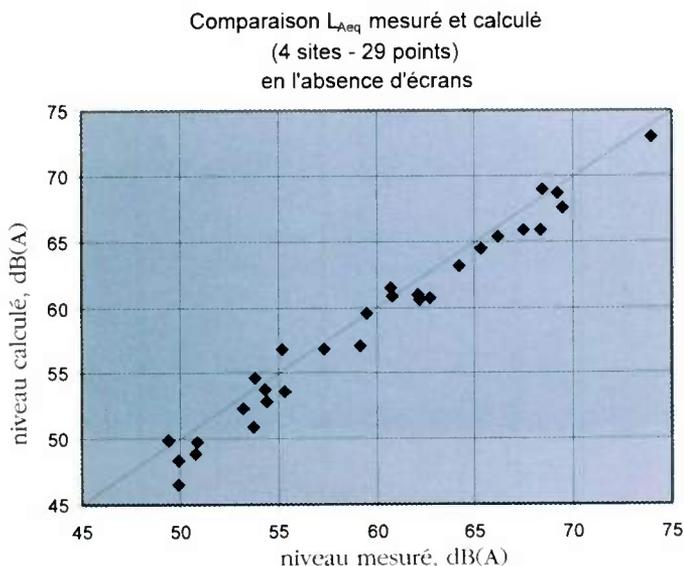
### Éléments de validation

Les calculs réalisés selon la méthode de calcul décrite dans ce document ont été confrontés à des mesures in situ sur quelques sites. Peu de situations réelles sont disponibles à l'heure actuelle pour comparer des valeurs mesurées par rapport aux calculs, étant donné qu'il est nécessaire de disposer de mesures de longue durée (plusieurs jours ou plusieurs semaines) pour lesquelles on connaît, sur chaque intervalle de temps, les valeurs des niveaux sonores et les valeurs de gradient thermique, de gradient de vitesse du vent, ainsi que la direction du vent. D'autres mesures de ce type sont programmées pour poursuivre la validation de la méthode de calcul.

#### a) Comparaison sur sites en l'absence d'écrans

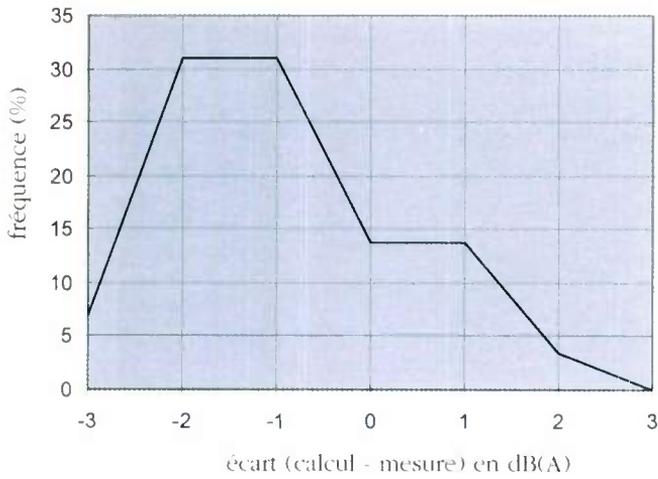
Quatre sites ont été utilisés pour les comparaisons. Les profils en travers sont soit en remblai, soit au terrain naturel et les points de mesures sont répartis sur des distances au bord de la plate-forme allant de 30 à 550 m. Les comparaisons portent sur le  $L_{Aeq,LT}$

Les comparaisons mesures/calcul sont représentées sur le graphique suivant :



Les différences mesure/calcul se caractérisent par l'histogramme ci-dessous :

**4 sites (29 points)  
(en l'absence d'écrans)**

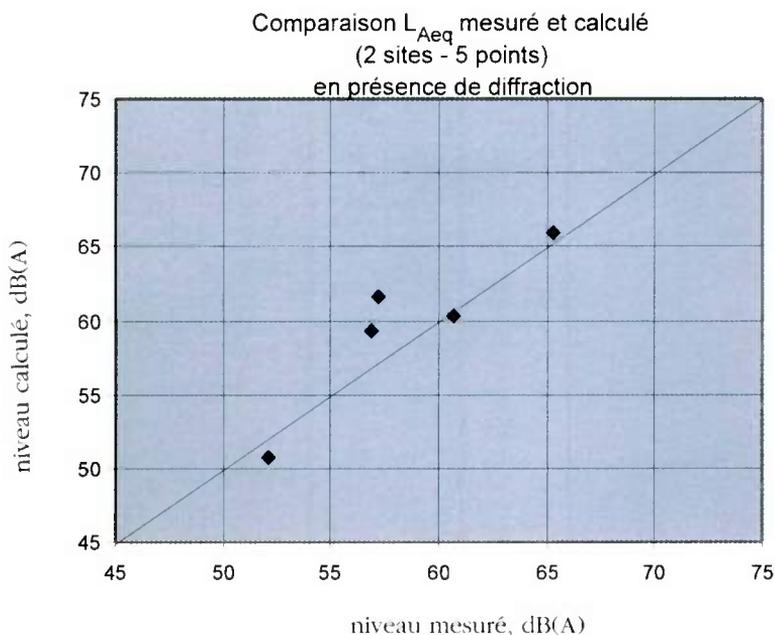


moyenne :  
-1,0 dB(A)  
écart-type :  
1,2 dB(A)

Ces comparaisons montrent que les écarts, sur les sites utilisés, entre le calcul et la mesure sont tout à fait acceptables et que l'on peut accorder une bonne confiance aux résultats de calcul, même s'il semble y avoir une légère tendance à la sous-estimation par rapport à la mesure.

## b) Comparaisons sur sites avec écrans

Les comparaisons ont été réalisées sur deux sites comportant des diffractions en vue masquée, représentant 5 points récepteurs au total. Les résultats montrent un écart moyen de +1,5 dB(A), et sont représentés sur le graphique ci-dessous.



Des comparaisons complémentaires ont également été réalisées entre les calculs selon cette méthode et selon les méthodes «classiques» antérieures (Guide du Bruit, MicroBruit, Mithra). Ces analyses n'ont pas montré d'incohérences, mais plutôt une bonne concordance entre ces différentes méthodes.

Les comparaisons avec des mesures de longue durée seront toutefois poursuivies.

**Page laissée blanche intentionnellement**

## Annexe 3

### Éléments d'application

#### 1. Introduction

Cette annexe a pour objet d'expliquer la méthodologie de calcul de la présente méthode, à travers deux exemples. Il s'agit d'une approche purement scolaire, consistant à appliquer la méthode de façon séquentielle, en suivant pas à pas l'organigramme (cf. figure 1).

Ces exemples permettront à l'utilisateur de comprendre :

- la logique de la "NMPB";
- l'utilisation des formules.

Dans cette note, nous n'aborderons pas les points suivants :

- choix de la modélisation de la source;
- influence des paramètres (hauteurs, type de sol ...).

Les exemples présentés ne balayent pas tous les points abordés par la NMPB, le site choisi est volontairement simplifié. Nous traiterons les cas suivants :

- cas d'un site plan;
- cas de la diffraction simple;
- prise en compte des effets météorologiques.

#### 2. Hypothèses

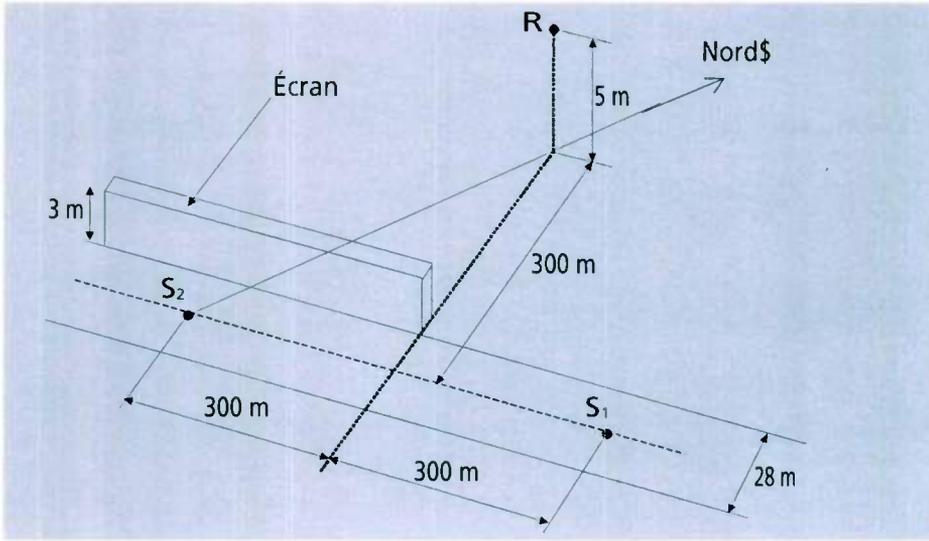
Nous prendrons les hypothèses suivantes :

##### Hypothèse n°1

La route est modélisée par une ligne source unique, située au centre de la plate-forme. Soulignons que cette approche simplificatrice ne convient que pour une étude de dégrossissage, et qu'il est vivement conseillé, lorsqu'il y a diffraction, de considérer une ligne source par voie de circulation (cf. § 5.1.2). La ligne source est décomposée en sources ponctuelles conformément au § 5.1.3. Chaque exemple de calcul n'est présenté que pour une seule source ponctuelle. Dans un cas réel, la contribution totale de la route serait obtenue par la sommation énergétique des contributions de chaque source ponctuelle au récepteur.

### Hypothèse n°2

Les calculs seront conduits entre deux sources  $S_1$  et  $S_2$  et un récepteur  $R$ , dont la configuration est définie ci-dessous :



Les sources sont situées à une hauteur de 0,5 m.

La nature des sols est la suivante :

- Chaussée réfléchissante  $\rightarrow G_s = 0$
- Chemin de propagation absorbant  $\rightarrow G_m = G_r = 1$

Orientation du site: La direction  $S_2R$  est orientée selon la direction Sud-Nord.

### Hypothèse n°3

Le site respecte les critères nécessaires pour l'utilisation des valeurs d'occurrences météorologiques fournies en annexe 1. On fera référence à la station météorologique de Cambrai, pour la période diurne.

### Hypothèse n°4

Le niveau de puissance acoustique  $L_{AW}$  des sources élémentaires ponctuelles est obtenu à partir des données de trafic suivantes :

- Trafic fluide sur route horizontale
- $Q_{VL} = 2000 \text{ VL/h}$ ,  $V_{VL} = 110 \text{ km/h}$
- $Q_{PL} = 200 \text{ PL/h}$ ,  $V_{PL} = 90 \text{ km/h}$
- La longueur de la portion de ligne source est:  $l_1 = l_2 = 50 \text{ m}$

À l'aide des valeurs fournies par le Guide du Bruit des Transports Terrestres (abaques 4.1 et 4.2) on en déduit les niveaux d'émission sonore :

$$E_{VL} = 38 \text{ dB(A)}$$

$$E_{PL} = 45 \text{ dB(A)}$$

En injectant ces valeurs dans la formule du niveau de puissance acoustique  $L_{Aw}$  fournie au §5.2, à la fréquence centrée sur l'octave  $j$  on a :

$$L_{Aw} = 10 \lg \left[ 10^{(38 + 10 \lg(2000))/10} + 10^{(45 + 10 \lg(200))/10} \right] + 20 + 10 \lg(50) - R(j) = 110 - R(j) \text{ dB (A)}$$

On obtient la répartition spectrale suivante :

j	Bande d'octave	R(j) en dB(A)	$L_{Aw}(j)$ en dB(A)
1	125 Hz	-14	96
2	250 Hz	-10	100
3	500 Hz	-7	103
4	1000 Hz	-4	106
5	2000 Hz	-7	103
6	4000 Hz	-12	98

#### Hypothèse n°5

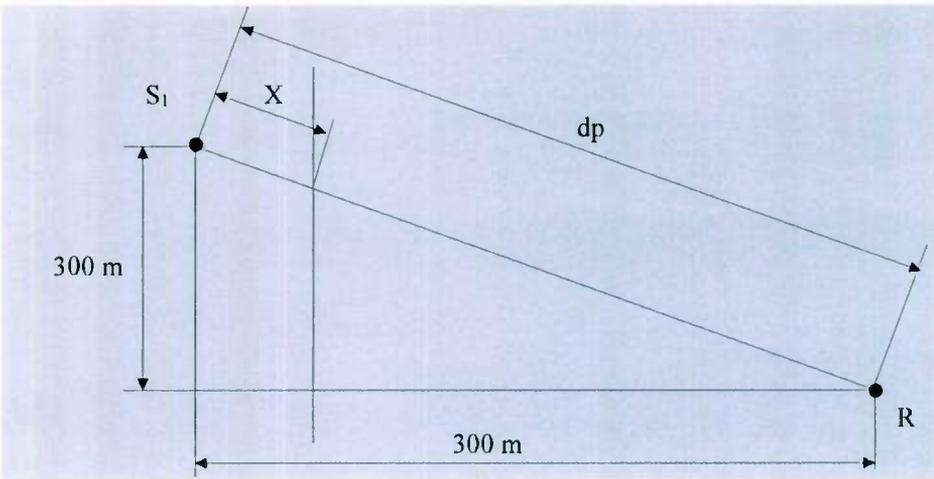
Les diffractions sur les arêtes verticales ne sont pas prises en compte dans le calcul.

### 3. Exemples d'application

#### 3.1 Site plan sans diffraction (Trajet $S_1R$ )

À travers cet exemple, vous apprendrez comment on applique les formules de divergence géométrique, d'absorption atmosphérique et d'effet de sol, sur un site plan très simple. Il s'agit de calculer les atténuations sur le trajet  $S_1R$ , représenté par les schémas ci-dessous :

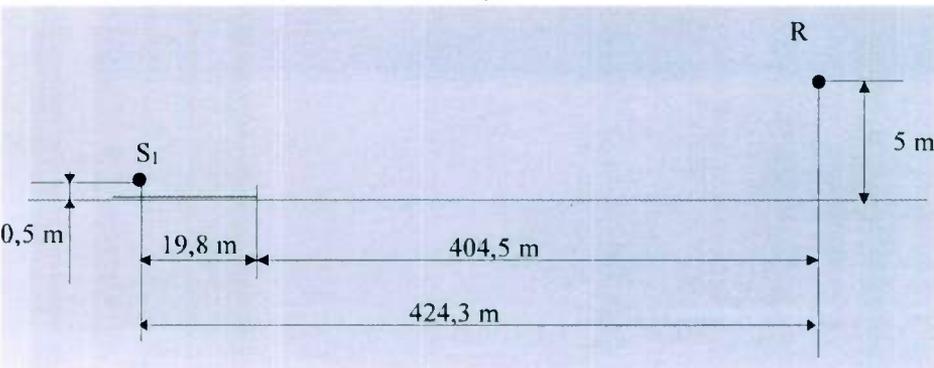
Vue en plan :



$$d_p = \sqrt{300^2 + 300^2} = 300 \sqrt{2} = 424,3 \text{ m}$$

$$X = 14 \frac{424,3}{300} = 14 \sqrt{2} = 19,8 \text{ m}$$

Vue en coupe dans le plan vertical  $S_1R$  :



### 3.1.1 Divergence géométrique

Il s'agit d'appliquer la formule [9] de la méthode (cf. §7.1).

$$A_{\text{div}} = 20 \cdot \lg(d) + 11$$

$$\text{avec } d = \sqrt{424,3^2 + 5^2} \cong 424,3 \text{ m}$$

$$A_{\text{div}} = 63,5 \text{ dB(A)}$$

Cette atténuation est identique dans chaque bande d'octave.

### 3.1.2 Absorption atmosphérique

Le calcul d'absorption atmosphérique s'effectue par bande d'octave, en appliquant la formule [10] (cf. §7.2) de la méthode.

$$A_{\text{atm}} = \alpha \cdot d / 1000$$

Fréquence centrale	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
$\alpha$ en dB/km	0,38	1,13	2,36	4,08	8,75	26,4
$A_{\text{atm}}$ en dB(A)	0,2	0,5	1,0	1,7	3,7	11,2

### 3.1.3 Effet de sol

#### 3.1.3.1 Conditions de propagation FAVORABLES

Ce calcul s'effectue à l'aide des formules données par bande d'octave du tableau 4 (cf. §7.3.3). Les paramètres pris pour ces calculs sont les suivants :

$$\begin{aligned} h_s = z_s &= 0,5 \text{ m}^5 \\ h_r = z_r &= 5 \text{ m}^5 \\ d_p &= 424,3 \text{ m} \end{aligned}$$

Nature du sol :

$$\begin{aligned} G_s &= 0 \\ G_m = G_r &= 1 \end{aligned}$$

5 Nous avons ces relations car, dans cet exemple, le plan moyen est confondu avec le relief réel (cf §7.3.2).

La valeur de  $G'_{\text{trajet}}$  s'obtient à partir des expressions du §7.3.3.

D'après la figure 12 on a :

$$G_{\text{trajet}} = \frac{0 \times 19,8 + 1 \times 404,5}{424,3} = 0,95$$

Et comme on a :  $30(z_S + z_R) = 165 < d_P = 424,3 \text{ m}$  alors  $G'_{\text{trajet}} = G_{\text{trajet}}$

Calculons, par exemple à 250 Hz, l'atténuation due au sol  **$A_{\text{sol, F}}$**  :

La formule [11] donne :  $A_{\text{sol, F}} = A_{S, F} + A_{m, F} + A_{R, F}$

— L'atténuation du sol côté source vaut :

$$A_{S, F} = -1,5 + G_S \cdot b'(z_S) \quad \text{avec } G_S = 0$$

$$\rightarrow A_{S, F} = -1,5 \text{ dB(A)}$$

— L'atténuation du sol côté récepteur vaut :

$$A_{R, F} = -1,5 + G'_{\text{trajet}} \cdot b'(z_R) \quad \text{avec } G'_{\text{trajet}} = 0,95$$

$$\rightarrow A_{R, F} = -1,5 + 0,95 \cdot b'(z_R)$$

$$b'(z_R) = -1,5 + 8,6 \cdot e^{-0,09 \cdot z_R^2} (1 - e^{-d_P/50})$$

$$\rightarrow b' = 2,40$$

$$\text{d'où } A_{R, F} = 0,78 \text{ dB(A)}$$

— L'atténuation du sol en zone intermédiaire vaut :

$$A_{m, F} = -3 \cdot q (1 - G'_{\text{trajet}})$$

Comme on a :  $30(z_S + z_R) = 165 < d_P = 424,3 \text{ m}$

alors  $q = 1 - 30(z_S + z_R)/d_P = 0,61$

$$\rightarrow A_{m, F} = -0,09 \text{ dB(A)}$$

Enfin :

$$A_{\text{sol, F}} = A_{S, F} + A_{m, F} + A_{R, F}$$

$$\rightarrow A_{\text{sol, F}} = -0,8 \text{ dB(A)}$$

En appliquant cette démarche sur chaque bande d'octave, on obtient le tableau de résultats ci-dessous :

Fréquence	$A_{s,F}$	$A_{m,F}$	$A_{r,F}$	$A_{sol,F}$ en dB(A)
	$G_s = 0$	$G'_{trajet} = 0,95$		
125 Hz	-1,5	-0,09	3,00	1,4
250 Hz	-1,5	-0,09	0,78	-0,8
500 Hz	-1,5	-0,09	-0,08	-1,7
1000 Hz	-1,5	-0,09	-0,08	-1,7
2000 Hz	-1,5	-0,09	-0,08	-1,7
4000 Hz	-1,5	-0,09	-0,08	-1,7

### 3.1.3.2 Conditions de propagation HOMOGENES

Calculons par exemple à 125 Hz l'atténuation due au sol  $A_{sol, H}$ . Pour cela, il faut développer le calcul de la formule [12] (cf. §7.3.4) :

$$A_{sol, H} = -10 \cdot \lg \left[ 4 \frac{k^2}{d_p^2} \left( z_s^2 - \sqrt{\frac{2 \cdot C_f}{k} z_s + \frac{C_f}{k}} \right) \left( z_r^2 - \sqrt{\frac{2 \cdot C_f}{k} z_r + \frac{C_f}{k}} \right) \right] \geq -3 (1 - G'_{trajet})$$

$$\text{avec: } C_f = d_p \frac{1 + 3 u d_p e^{-\sqrt{u} d_p}}{1 + u d_p}$$

$$\text{et: } w = 0,0185 \frac{f^{2,5} G_{trajet}^{2,6}}{f^{1,5} \cdot G_{trajet}^{2,6} + 1,3 \cdot 10^3 \cdot f^{0,75} \cdot G_{trajet}^{1,3} + 1,16 \cdot 10^6}$$

Les expressions précédentes donnent les résultats suivants :

$$w = 0,000234$$

pour  $G_{trajet} = 0,95$  et  $f = 125$  Hz.

d'où :

$$C_f = 446,87$$

$$k = (2\pi f)/c \quad \text{avec } c = 340 \text{ m/s}$$

$$\rightarrow k = 2,31$$

En injectant ces résultats dans la formule [12], on obtient l'atténuation suivante :

$$A_{sol, H} = -4,18 \text{ dB(A)}$$

$$\text{or } A_{sol, H} < -3 (1 - G'_{trajet}) = -3 (1 - 0,95) = -0,15$$

On prendra donc  $A_{sol, H} = -0,15 \text{ dB(A)}$

En appliquant cette démarche sur chaque bande d'octave, on obtient le tableau de résultats ci-dessous :

Fréquence	$C_f$	$A_{sol, H}$ en dB(A)
	$G_{trajet} = 0,95$	
125 Hz	338,52	-0,2*
250 Hz	333,14	5,4
500 Hz	151,25	13,8
1000 Hz	19,64	16,7
2000 Hz	2,43	8,8
4000 Hz	0,47	1,8

\* Valeur bornée par  $-3 (1 - G'_{trajet}) = -0,15 \text{ dB(A)}$

### 3.1.4 Niveau global au récepteur

Le niveau sonore au récepteur en conditions favorables, par bande d'octave, est calculé selon la formule [1] :

bande d'octave	$L_{Aw(j)}$ en dB(A)	$A_{div}$	$A_{atm}$	$A_{sol,F}$	$L_{1,F}$ en dB(A)
125 Hz	96	63,5	0,2	1,4	30,9
250 Hz	100	63,5	0,5	-0,8	36,8
500 Hz	103	63,5	1,0	-1,7	40,2
1000 Hz	106	63,5	1,7	-1,7	42,5
2000 Hz	103	63,5	3,7	-1,7	37,5
4000 Hz	98	63,5	11,2	-1,7	25

Le niveau sonore global, en conditions favorables, est obtenu en faisant le cumul énergétique des niveaux dans chaque bande d'octave :

$$L_{1, F} = 46 \text{ dB(A)}$$

La démarche est identique en conditions homogènes:

bande d'octave	$L_{Aw(j)}$ en dB(A)	$A_{div}$	$A_{atm}$	$A_{sol.H}$	$L_{1,H}$ en dB(A)
125 Hz	96	63,5	0,2	-0,2	32,5
250 Hz	100	63,5	0,5	5,4	30,6
500 Hz	103	63,5	1,0	13,8	24,7
1000 Hz	106	63,5	1,7	16,7	24,1
2000 Hz	103	63,5	3,7	8,8	27
4000 Hz	98	63,5	11,2	1,8	21,5

Le niveau sonore global, en conditions homogènes, est obtenu en faisant le cumul énergétique des niveaux dans chaque bande d'octave:

$$L_{1,H} = 36,1 \text{ dB(A)}$$

Le calcul du niveau de Long Terme  $L_{1,LT}$  s'effectue, dans une bande d'octave donnée, selon la formule [5] (cf. § 4) ci-dessous:

$$L_{1,LT} = 10 \cdot \lg \left[ p_1 \cdot 10^{L_{1,F}/10} + (1 - p_1) \cdot 10^{L_{1,H}/10} \right]$$

Pour appliquer cette formule, il est nécessaire de connaître l'occurrence moyenne  $p_1$  des conditions favorables dans la direction du trajet ( $S_1,R$ ), faisant un angle de  $90^\circ$  avec le nord. À l'aide de l'hypothèse 3 et du tableau des occurrences en annexe 1, on en déduit:

$$p_1 = 32 \%$$

Ce qui donne le tableau de résultats suivant:

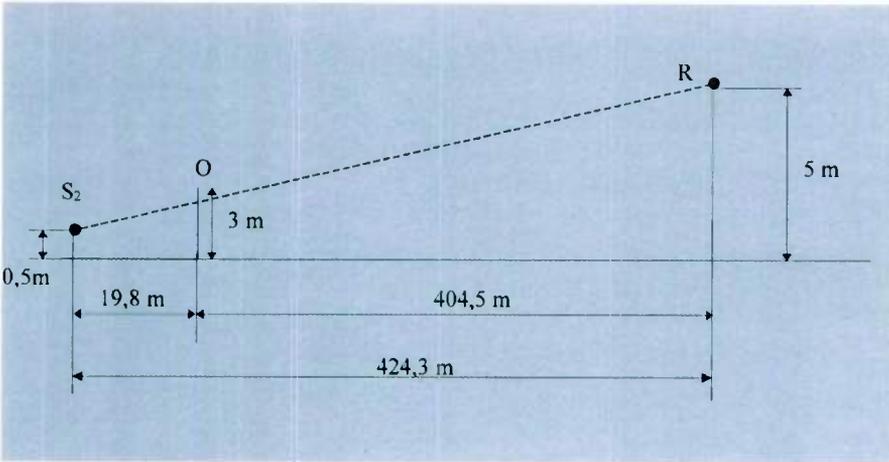
bande d'octave	$L_{1,H}$ en dB(A)	$L_{1,F}$ en dB(A)	$L_{1,LT}$ en dB(A)
125 Hz	32,5	30,9	32
250 Hz	30,6	36,8	33,6
500 Hz	24,7	40,2	35,5
1000 Hz	24,1	42,5	37,6
2000 Hz	27	37,5	33,3
4000 Hz	21,5	25	22,9

Le niveau sonore global de Long Terme est obtenu en faisant le cumul énergétique des niveaux dans chaque bande d'octave :

$$L_{1, LT} = 41,9 \text{ dB(A)}$$

### 3.2 Site plan avec diffraction (Trajet S<sub>2</sub>R)

Dans le second exemple, la source S<sub>2</sub> est masquée par un écran. Il convient donc de calculer les termes d'atténuation due à la diffraction. Notons que dans ce cas le terme A<sub>sol</sub> est pris égal à zéro.



#### 3.2.1 Divergence géométrique

Idem qu'en 3.1.1

$$A_{div} = 63,5 \text{ dB(A)}$$

Cette atténuation est identique dans chaque bande d'octave.

#### 3.2.2 Absorption atmosphérique

Idem qu'en 3.1.2

Fréquence centrale	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
α en dB/km	0,38	1,13	2,36	4,08	8,75	26,4
A <sub>atm</sub> en dB(A)	0,2	0,5	1,0	1,7	3,7	11,2

### 3.2.3 Effet de sol

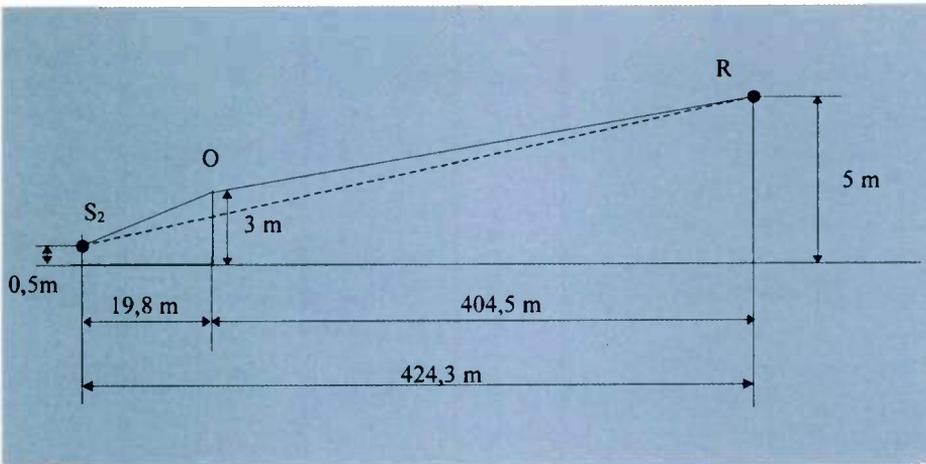
Comme il y a diffraction sur l'arête sommitale de l'écran, il ne faut pas prendre en compte le terme d'atténuation  $A_{sol}$  dans le calcul (cf. texte en gras dans § 7.4).

$$A_{sol} = 0 \text{ dB(A)}$$

### 3.2.4 Diffraction

#### 3.2.4.1 Conditions de propagation HOMOGENES

Schéma :



La différence de marche, sur le trajet  $S_2R$ , est donnée par la figure 14 (cf. §7.4.3) :

$$\delta_{S_2R} = S_2O + OR - S_2R = \sqrt{19,8^2 + 2,5^2} + \sqrt{404,5^2 + 2^2} - \sqrt{424,3^2 + 4,5^2} = 0,1383 \text{ m}$$

On vérifie que  $\delta_{S_2R} > -0,034 \text{ m}$ , il y a donc bien diffraction (cf. §7.4).

Le calcul en diffraction s'effectue à partir de la formule [16] :

$$A_{dif} = \Delta_{dif}(S_2,R) + \Delta_{sol}(S_2,O) + \Delta_{sol}(O,R)$$

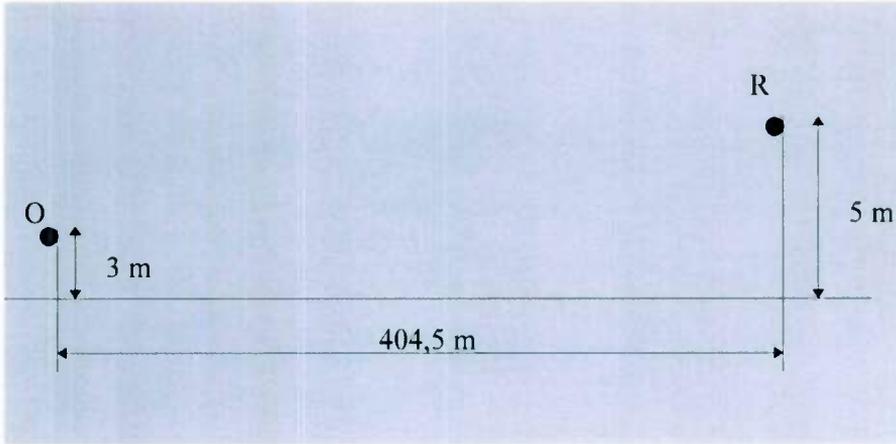
Le terme  $\Delta_{dif}(S_2,R)$  correspond à l'atténuation due à la diffraction pure sur l'arête sommitale de l'écran, exprimée par la formule [14]. Les deux autres termes correspondent à la pondération de la diffraction par les effets de sol de part et d'autre de l'écran. Ils se calculent de façon similaire grâce aux expressions [17] et [18].

Calculons par exemple  $\Delta_{sol}(O,R)$  à la fréquence 250 Hz. La formule [18] donne:

$$\Delta_{sol}(O,R) = -20 \cdot \lg \left[ 1 + \left( 10^{-A_{sol}(O,R)/20} - 1 \right) 10^{-\left( \Delta_{dif}(S_2,R') - \Delta_{dif}(S_2,R) \right)/20} \right]$$

Reprenons les termes qui constituent cette expression:

→  $A_{sol}(O,R)$  est l'effet de sol entre le point de diffraction O et le récepteur R. Dans ce cas nous avons la configuration suivante:



$$G_{trajet} = 1$$

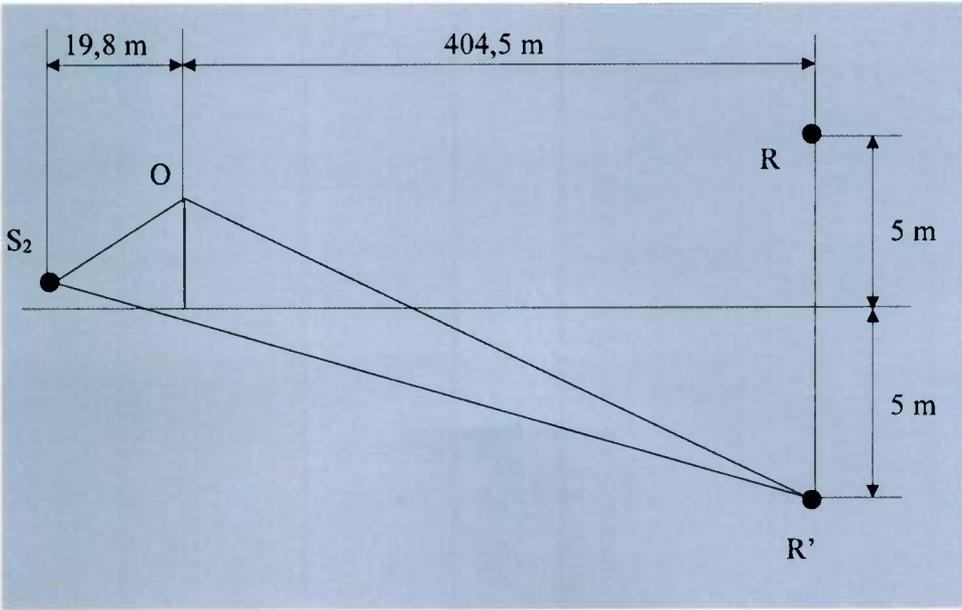
Après calcul selon la formule [12], on obtient les résultats suivants:

Fréquence	Cf	$A_{sol}(O,R),H$ en dB(A)
$G_{trajet} = 1$		
250 HZ	149,1	8,1

$\Delta_{dif}(S_2,R)$  est calculé à partir de la formule [14], avec  $\delta_{S_2R}$  la différence de marche entre  $S_2$  et R, et  $C'' = 1$ . Le résultat à 250 Hz est:

$$\Delta_{dif}(S_2,R) = 8,5 \text{ dB(A)}$$

$\Delta_{\text{dif}}(S_2, R)$  est aussi calculé à partir de la formule [14], à l'aide de la différence de marche  $\delta_{S_2 R'}$  entre  $S_2$  et  $R'$ . Cette différence de marche se calcule de la façon suivante:



$$\delta_{S_2 R'} = S_2, O + OR' - S_2 R' = 0,20 \text{ m}$$

d'où le résultat à 250 Hz:

$$\Delta_{\text{dif}}(S_2, R') = 9,5 \text{ dB(A)}$$

Enfin, à l'aide des trois valeurs précédentes, il est possible de calculer  $\Delta_{\text{sol}}(O, R)$  à 250 Hz:

$$\Delta_{\text{sol}}(O, R) = -20 \cdot \lg \left[ 1 + \left( 10^{-8,1/20} - 1 \right) 10^{-(9,5 - 8,5)/20} \right] = 6,8 \text{ dB(A)}$$

Le calcul  $\Delta_{\text{sol}}(S_2, O)$  s'effectue de façon analogue, avec  $A_{\text{sol}}(S_2, O) = -3 \text{ dB(A)}$  et  $\delta_{S_2' R} = 0,276 \text{ m}$ . Ce qui donne :

$$\Delta_{\text{sol}}(S_2, O) = -2,5 \text{ dB(A)}$$

En appliquant la formule [16]:

$$A_{\text{dif}} = \Delta_{\text{dif}}(S_2, R) + \Delta_{\text{sol}}(S_2, O) + \Delta_{\text{sol}}(O, R)$$

$$A_{\text{dif, H}} = 8,5 + (-2,5) + 6,8 = 12,8 \text{ dB(A)}$$

$$A_{\text{dif, H}} = 12,8 \text{ dB(A)} \text{ à } 250 \text{ Hz}$$

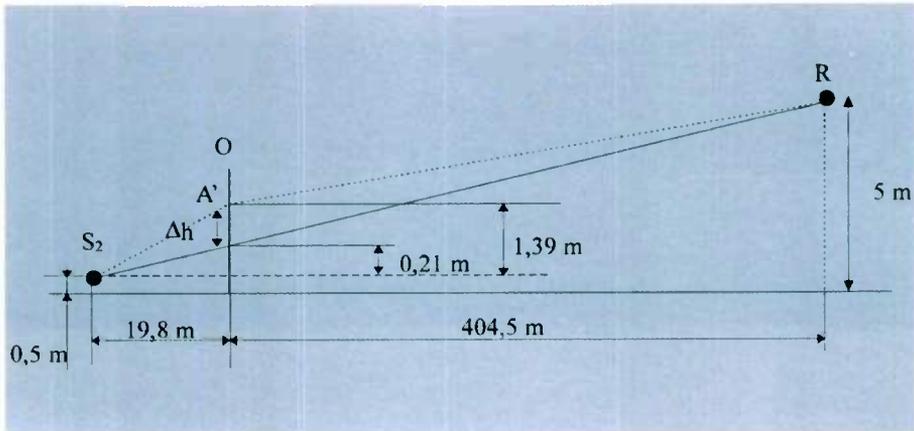
En appliquant cette démarche sur chaque bande d'octave, on obtient le tableau de résultats ci-dessous :

Bande d'octave	$\Delta dif(S_2,R)$	$\Delta dif(S'_2,R)$	$\Delta dif(S_2,R')$	$\Delta sol(S_2,O)$	$\Delta sol(O,R)$	<b>A<sub>dif,H</sub></b>
125 Hz	7,0	8,5	7,7	-2,6	0	<b>4,4</b>
250 Hz	8,5	10,5	9,5	-2,5	6,8	<b>12,8</b>
500 Hz	10,5	12,8	11,7	-2,4	5,9	<b>14,0</b>
1000 Hz	12,8	15,5	14,2	-2,3	0	<b>10,5</b>
2000 Hz	15,5	18,3	17	-2,3	0	<b>13,2</b>
4000 Hz	18,3	21,2	19,9	-2,2	0	<b>16,1</b>

### 3.2.4.2 Conditions de propagation FAVORABLES

En conditions favorables, les calculs sont identiques à ceux menés en conditions homogènes, à condition d'utiliser les formules d'effet de sol en conditions favorables (cf. tableau 4, §7.3.3) et de calculer les différences de marche, en tenant compte de la courbure des rayons (cf. figure 15, §7.4.3). Aussi, nous développerons uniquement les calculs de différence de marche.

Calcul de  $\delta_{S_2R}$  :



D'après la formule [15] (cf. §7.4.3) :

$$\Delta h = \frac{d_1 \cdot d_2}{2 \cdot \gamma} \quad \text{avec } \gamma = 8 \cdot d = 3394,3 \text{ m} > 1000 \text{ m}$$

$$\text{d'où } \Delta h = \frac{19,8 \times 404,5}{2 \times 3394,3} 1,18 \text{ m}$$

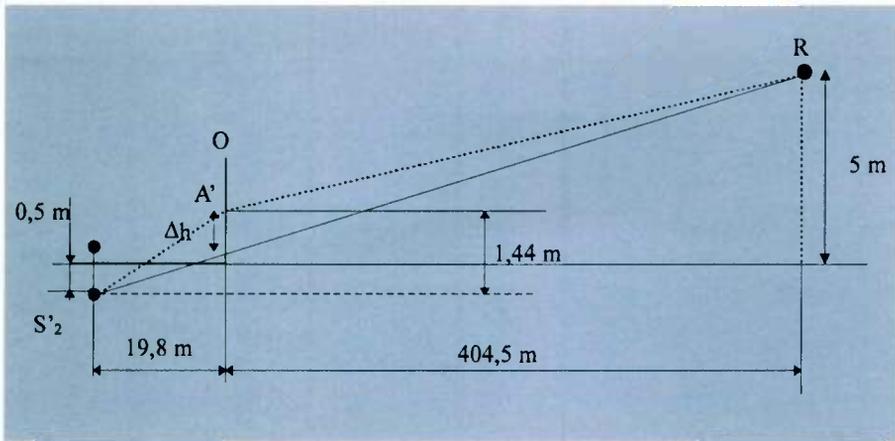
D'après le 1er schéma de la figure 15, la différence de marche se calcule comme suit :

$$\delta_{S_2R} = S_2O + OR - (S_2A' + A'R)$$

$$\delta_{S_2R} = \sqrt{19,8^2 + 2,5^2} + \sqrt{404,5^2 + 2^2} - \left( \sqrt{19,8^2 + 1,39^2} + \sqrt{404,5^2 + 3,11^2} \right) = 0,101 \text{ m}$$

On vérifie que  $\delta_{S_2R} > -0,034 \text{ m}$ , il y a donc bien diffraction (cf. §7.4).

Calcul de  $\delta_{S'_2R}$  :

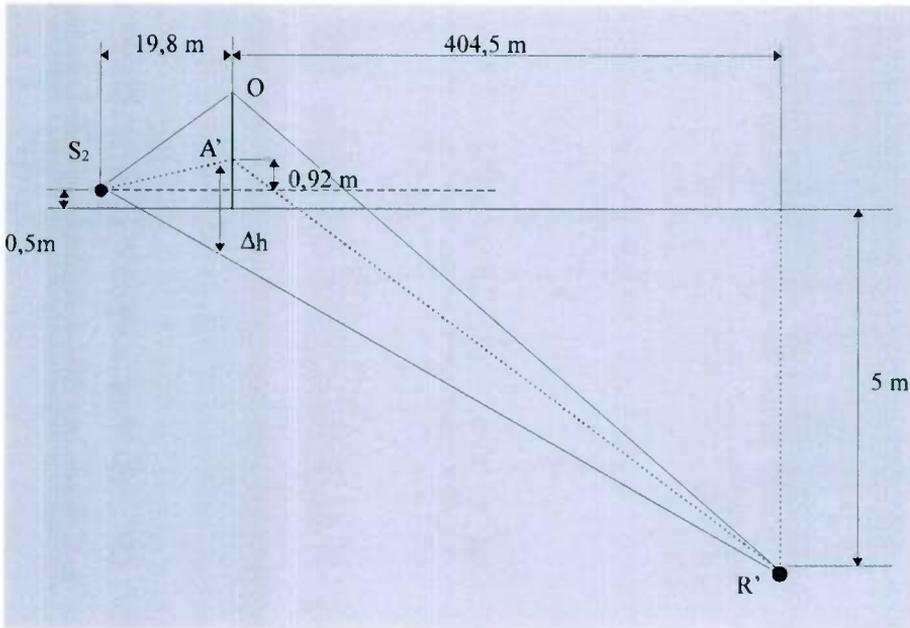


Remarque: compte tenu de la précision des calculs, la valeur de  $\Delta h$  est la même que sur le trajet  $S_2R$ .

$$\delta_{S'_2R} = S'_2O + OR - (S'_2A' + A'R)$$

$$\delta_{S'_2R} = \sqrt{19,8^2 + 3,5^2} + \sqrt{404,5^2 + 2^2} - \left( \sqrt{19,8^2 + 1,44^2} + \sqrt{404,5^2 + 4,06^2} \right) = 0,24 \text{ m}$$

Calcul de  $\delta_{S_2R'}$ :



Remarque: compte tenu de la précision des calculs, la valeur de  $\Delta h$  est la même que sur le trajet  $S_2R$ .

$$\delta_{S_2R'} = S_2O + OR' - (S_2A' + A'R')$$

$$\delta_{S_2R'} = \sqrt{19,8^2 + 2,5^2} + \sqrt{404,5^2 + 8^2} - \left( \sqrt{19,8^2 + 0,92^2} + \sqrt{404,5^2 + 6,42^2} \right) = 0,164 \text{ m}$$

Ainsi, grâce aux résultats obtenus sur les différences de marche, et aux valeurs de  $\Delta_{sol}(O,R)$ , nous pouvons calculer l'atténuation due à la diffraction, par bande d'octave:

Bande d'octave	$\Delta_{dif}(S_2,R)$	$\Delta_{dif}(S'_2,R)$	$\Delta_{dif}(S_2,R')$	$\Delta_{sol}(S_2,O)$	$\Delta_{sol}(O,R)$	$A_{dif,F}$
125 Hz	6,5	8,1	7,3	-2,6	5,3	9,2
250 Hz	7,8	10,0	8,9	-2,4	4,0	9,4
500 Hz	9,5	12,3	11,0	-2,3	0,2	7,4
1000 Hz	11,7	14,9	13,5	-2,2	0	9,5
2000 Hz	14,3	17,7	16,2	-2,1	0	12,2
4000 Hz	17,0	20,6	19,0	-2,1	0	14,9

### 3.2.5 Niveau global au récepteur

Le niveau sonore au récepteur en conditions favorables, par bande d'octave, est calculé selon la formule [1]:

Bande d'octave	$L_{AW(j)}$ en dB(A)	$A_{div}$	$A_{atm}$	$A_{sol,F}$	$A_{dif,F}$	$L_{2,F}$ en dB(A)
125 Hz	96	63,5	0,2	0	9,2	23,1
250 Hz	100	63,5	0,5	0	9,4	26,6
500 Hz	103	63,5	1,0	0	7,4	31,1
1000 Hz	106	63,5	1,7	0	9,5	31,3
2000 Hz	103	63,5	3,7	0	12,2	23,6
4000 Hz	98	63,5	11,2	0	14,9	8,4

Le niveau sonore global, en conditions favorables, est obtenu en faisant le cumul énergétique des niveaux dans chaque bande d'octave:

$$L_{2,F} = 35,5 \text{ dB(A)}$$

La démarche est identique en conditions homogènes:

Bande d'octave	$L_{AW(j)}$ en dB(A)	$A_{div}$	$A_{atm}$	$A_{sol,H}$	$A_{dif,H}$	$L_{2,H}$ en dB(A)
125 Hz	96	63,5	0,2	0	4,4	27,9
250 Hz	100	63,5	0,5	0	12,8	23,2
500 Hz	103	63,5	1,0	0	14,0	24,5
1000 Hz	106	63,5	1,7	0	10,5	30,3
2000 Hz	103	63,5	3,7	0	13,2	22,6
4000 Hz	98	63,5	11,2	0	16,1	7,2

Le niveau sonore global, en conditions homogènes, est obtenu en faisant le cumul énergétique des niveaux dans chaque bande d'octave:

$$L_{2,H} = 33,7 \text{ dB(A)}$$

Le calcul du niveau de Long Terme  $L_{2,LT}$  s'effectue, dans une bande d'octave donnée, selon la formule [5] (cf. § 4) ci-dessous :

$$L_{2,LT} = 10 \cdot \lg \left[ p_2 \cdot 10^{L_{2,F}/10} + (1 - p_2) \cdot 10^{L_{2,H}/10} \right]$$

Pour appliquer cette formule, il est nécessaire de connaître l'occurrence moyenne  $p_2$  des conditions favorables dans la direction du trajet ( $S_2,R$ ), faisant un angle de  $180^\circ$  avec le nord. À l'aide de l'hypothèse 3 et du tableau des occurrences en annexe 1, on en déduit :

$$p_2 = 46 \%$$

Ce qui donne le tableau de résultats suivant :

bande d'octave	$L_{2,H}$ en dB(A)	$L_{2,F}$ en dB(A)	$L_{2,LT}$ en dB(A)
125 Hz	27,9	23,1	26,3
250 Hz	23,2	26,6	25,1
500 Hz	24,5	31,1	28,7
1000 Hz	30,3	31,3	30,7
2000 Hz	22,6	23,6	23
4000 Hz	7,2	8,4	7,8

Le niveau sonore global, de Long Terme, est obtenu en faisant le cumul énergétique des niveaux dans chaque bande d'octave :

$$L_{2,LT} = 34,6 \text{ dB(A)}$$

Suivi de fabrication : Bureau Éditions du CERTU  
Conception : Atelier Trois-Quarts Face, Lyon - © 04 72 61 95 43  
Photogravure : Accord Image - © 04 72 73 00 31  
Impression : Uni Graphic - © 04 72 04 35 60  
Achévé d'imprimer : janvier 1997  
Dépôt légal : 1er trimestre 1997  
ISBN : 2-11-089201-3

© 1997, Ministère de l'Équipement, du Logement,  
des Transports et du Tourisme  
Centre d'études sur les réseaux, les transports,  
l'urbanisme et les constructions publiques  
Service d'études techniques des routes et  
autoroutes  
Laboratoire central des ponts et chaussées  
Centre scientifique et technique du bâtiment

Cet ouvrage est en vente  
au CERTU

Bureau de vente :  
9, rue Juliette Récamier  
69456 Lyon Cedex 06  
☎ 04 72 74 58 96

au SETRA

Bureau de vente des publications :  
46, avenue Aristide Briand - BP 100  
92223 Bagneux Cedex  
☎ 01 46 11 31 53

au LCPC

Section des publications  
58, boulevard Lefevre  
75732 Paris Cedex 15  
☎ 01 40 43 52 26

au CSTB

4, avenue du Recteur Poincaré  
75782 Paris Cedex 16  
☎ 01 64 68 85 11

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement des éditeurs est illi-  
cite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que ce soit, consti-  
tuerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

**Page laissée blanche intentionnellement**

# bruit des infrastructures routières

La nouvelle réglementation dans le domaine du bruit routier (arrêté du 5 mai 1995) nous conduit à revoir les méthodes de prévision des niveaux sonores dus aux infrastructures routières. Ce document présente une nouvelle méthode de calcul complète, permettant de réaliser les études d'impact ainsi que les études de dimensionnement des protections acoustiques. Sa particularité essentielle réside dans la prise en compte des conditions météorologiques réelles du site pour l'évaluation des niveaux sonores.

The new french regulation in the field of road traffic noise lead us to bring up to date the road noise predicting methods. This document presents a global new predicting method to be used for noise assessment and antinoise device calculations. Its main particularity is that it takes into account the local meteorological conditions in noise levels assessment.