

Prévision du bruit routier

2 - Méthode de calcul de propagation du bruit
incluant les effets météorologiques (NMPB 2008)



Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat
Prévention des risques
Développement durable
Infrastructures, transports et mer

Présent
pour
l'avenir



Page laissée blanche intentionnellement

Guide méthodologique

Prévision du bruit routier

*2 - Méthode de calcul de propagation du bruit
incluant les effets météorologiques (NMPB 2008)*



Ce guide méthodologique de calcul de la propagation du bruit routier incluant les effets météorologiques a été rédigé sous le pilotage de Francis Besnard puis d'Emmanuel Le Duc (SETRA) par un groupe de travail composé de :

- François Abbaléa (CSTB)
- Savine Andry (CETE Nord-Picardie - LRPC de Lille)
- Marine Baulac (CSTB)
- Michel Bérengier (LCPC)
- Francis Besnard (SETRA)
- Bernard Bonhomme (CETE Normandie-Centre - LRPC de Blois)
- Jérôme Defrance (CSTB)
- Jean-Pierre Deparis (CETE Nord-Picardie - LRPC de Lille)
- Guillaume Dutilleux (CETE de l'Est - LRPC de Strasbourg - Equipe Ressource Bruit)
- David Ecotière (CETE de l'Est - LRPC de Strasbourg - Equipe Ressource Bruit)
- Benoit Gauvreau (LCPC)
- Vincent Guizard (SETRA)
- Fabrice Junker (EDF)
- Emmanuel Le Duc (SETRA)
- Hubert Lefèvre (CETE de Lyon - LRPC de Clermont-Ferrand)
- Vincent Steimer (CETE de l'Est - LRPC de Strasbourg - Equipe Ressource Bruit, puis CERTU)
- Dirk van Maercke (CSTB)
- Vadim Zouboff (CETE de l'Ouest - LRPC d'Angers)

Ce guide a été relu et validé par les Directions d'Administration Centrale du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire suivantes :

- la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR/Mission Bruit et Agents physiques),
- la Direction des Infrastructures de Transport de la Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM/DIT).

Nous tenons à remercier tous ceux qui par leurs remarques et commentaires, ont contribué à la finalisation de ce document.

Sommaire

Préambule	6
1 Introduction	7
1.1 Objet	7
1.2 Domaine d'application	7
1.3 Organisation du document	7
2 Définitions et notations	9
2.1 Généralités	9
2.2 Définitions	9
2.3 Notations	10
3 Aperçu général de la méthode	12
3.1 Niveau sonore en conditions favorables $(L_{i,F})$ pour le trajet (S_i, R)	12
3.2 Niveau sonore en conditions homogènes $(L_{i,H})$ pour le trajet (S_i, R)	13
3.3 Niveau sonore de long terme pour le trajet (S_i, R)	13
3.4 Niveau sonore de long terme au point R pour tous les trajets	13
3.5 Niveau sonore de long terme au point R en $dB(A)$	14
4 Description de la source	15
4.1 Décomposition des sources	15
4.2 Données d'émission sonore en entrée	16
5 Prise en compte de la micrométéorologie	18
5.1 Méthode d'estimation du "niveau sonore de long terme"	18
5.2 Détermination des valeurs d'occurrences météorologiques	19
6 Analyse de la propagation	22
6.1 Récepteur	22
6.2 Trajets de propagation élémentaires	22
7 Calculs sur un trajet élémentaire	27
7.1 Divergence géométrique	27
7.2 Absorption atmosphérique	27
7.3 Effet de sol	27
7.4 Diffraction	31
7.5 Cas des arêtes verticales	36
7.6 Réflexions sur les obstacles verticaux	36
7.7 Eléments particuliers	37

8	Bibliographie	38
8.1	Articles	38
8.2	Normes	38
8.3	Notes	38
8.4	Ouvrages	39
8.5	Rapports	39
8.6	Thèses	40
A	Organigramme de la méthode de calcul	43
B	Valeurs et cartes d’occurrences de conditions favorables pour la France métropolitaine	45
B.1	Occurrences sur 2 périodes	47
B.2	Occurrences sur 3 périodes	49
B.3	Roses des occurrences	52
B.4	Cartes	59
C	Météorologie et propagation du son	63
C.1	Absorption atmosphérique	63
C.2	Effets de vent et de température	63
D	Analyse météorologique d’une situation acoustique	71
D.1	Propos liminaires	71
D.2	Moyennes et échelles spatio-temporelles	71
D.3	Analyse météorologique d’une situation acoustique	74
E	Aspects géométriques	79
E.1	Principe de Fermat	79
E.2	Ellipsoïde et pondération par zone de Fresnel	80
F	Traitement des éléments particuliers	82
G	Eléments de validation	99
H	Description des sites de la validation	102
H.1	Site de Mulhouse	102
H.2	Site de Massiac	102
H.3	Site de Mer	103
H.4	Site de Couvron	103
H.5	Site de Molsheim	104
H.6	Site de Saint Omer	104
I	Exemples d’application de la NMPB-Routes-2008	106

I.1	Site en léger déblai	106
I.2	Site en fort déblai	117
I.3	Site en remblai avec écran bas	126
I.4	Site avec diffraction multiple	131
J	De la NMPB-Routes-96 à la NMPB-Routes-2008	134

Préambule

La nouvelle version de la méthode de prévision du bruit, “NMPB 2008”, est la méthode de calcul traitant de la propagation des émissions sonores actualisant celle de 1996. Elle est destinée aux services en charge du volet bruit des études des projets de développement ou de correction de l'existant (résorption des points noirs du bruit).

La méthode publiée en 1996 s'efforçait déjà de donner un compromis entre précision, durée de calcul et effort de collecte des données. Elle fut, d'ailleurs, retenue comme méthode de référence à utiliser dans la cadre de la directive 2002/49/CE relative à l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement, dans l'attente de l'élaboration d'une méthode harmonisée au niveau européen.

L'objet de ce document est de présenter la nouvelle méthode et les améliorations qu'elle apporte.

La NMPB 2008 est issue du travail du Sétra, des laboratoires de Strasbourg, de Clermont Ferrand, de Lille et de Blois, du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment et de EDF. Elle vient répondre aux interrogations laissées en suspens par la méthode précédente, tout en y intégrant les avancées techniques et scientifiques. Les principaux changements résident en la recherche d'une plus grande cohérence dans les calculs des effets de sol, et dans la prise en compte de la météorologie à partir de l'exploitation de données recueillies sur de longues périodes.

Cette nouvelle version a été rigoureusement testée et calée à partir de campagnes de mesures très complètes sur un large éventail de cas réels représentatifs de la plupart des situations rencontrées par les ingénieurs routiers. Les avancées et les améliorations très significatives contribuent à un nouveau progrès décisif, pour lequel l'apport des services d'études et de recherches précités a été essentiel.

Ces changements bien que majeurs pour la fiabilité de ces méthodes ne soulèvent pas de problèmes d'utilisation pour les services concernés, les bureaux d'études acoustiques, ou encore les éditeurs de logiciels, l'esprit de la précédente version étant conservé.

Ce document, relatif à la propagation du bruit, vient compléter la récente mise à jour des méthodes de calcul d'émission publiées en 1981 et achève ainsi la révision des méthodes de prévision du bruit routier. Une prochaine publication concernera un volet ferroviaire.

Afin que les services routiers puissent dès à présent profiter de ses avancées, j'ai demandé que le volet routier soit publié et qu'il soit désormais l'outil de référence de prévision du bruit du trafic routier au sein des services du ministère. Cette méthode devrait contribuer également à améliorer les outils futurs dont disposera la Commission Européenne.

Le Directeur des Infrastructures de Transport

A blue ink signature consisting of several loops and a vertical stroke at the bottom.

Marc Papinutti

1- Introduction

La méthode "Prévision du bruit routier" est composée de deux documents :

- Le premier intitulé "Calcul des émissions sonores dues au trafic routier" qui permet d'associer des niveaux de puissance sonore à un trafic sur une infrastructure [Abq2008] ;
- Le deuxième intitulé "NMPB 2008 - Méthode de propagation du bruit incluant les effets météorologiques". Il permet de calculer le niveau de bruit engendré à grande distance par une infrastructure représentée par ses émissions sonores. Il s'agit du présent document.

1.1-Objet

Le présent guide méthodologique décrit une méthode actualisée de calcul de la propagation du bruit routier en milieu extérieur permettant, conformément aux exigences de la réglementation, de calculer le niveau sonore à longue distance des voies et de prendre en compte les effets des conditions météorologiques. Il s'agit d'une révision de la NMPB-Routes-96, qui est appelée NMPB-Routes-2008.

La NMPB-Routes-2008 ne remet pas en cause le principe d'un calcul détaillé de niveaux sonores de long terme dans deux types de conditions météorologiques bien distinctes :

- conditions favorables à la propagation du son ;
- conditions homogènes.

Le résultat final est toujours obtenu en cumulant énergétiquement les niveaux sonores observés dans ces deux types de conditions, pondérés par la probabilité d'occurrence de conditions favorables sur le site considéré et son complément. 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 situations atmosphériques conventionnelles.

1.2- Domaine d'application

La méthode de calcul décrite ici a été essentiellement mise au point dans le but d'offrir aux bureaux d'études, aux sociétés d'autoroutes et aux services du MEEDDAT (SIR, SMO, CETE, LRPC) un outil de prévision des niveaux sonores qui prenne en compte les effets des conditions météorologiques.

La limite de validité des calculs en distance est de 800 m sur une perpendiculaire à l'infrastructure et un récepteur situé 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 présent document expose une méthode de calcul détaillée. Les calculs sont effectués par bandes de tiers d'octave, de 100 Hz à 5 kHz. La méthode est fondée sur la décomposition des sources en sources ponctuelles. Son utilisation manuelle, sans l'aide de l'informatique, en sera donc très limitée.

La méthode permet de calculer des niveaux sonores L_{Aeq} sur les 2 périodes Jour (6h-22h) et Nuit (22h-6h), ou sur les 3 périodes Jour (6h-18h), Soir (18h-22h) et Nuit (22h-6h), selon l'application.

Comme son nom l'indique, la NMPB-Routes-2008 ne traite que du bruit routier. Toutefois, la méthode pourra facilement être adaptée au bruit ferroviaire et au bruit industriel par la suite.

1.3- Organisation du document

Le contenu du présent document est structuré de la façon suivante :

- Le Chapitre 2 rassemble les définitions générales, le vocabulaire, les paramètres et grandeurs utilisés dans la NMPB-Routes-2008 ;

- Le Chapitre 3 donne l’aperçu général de la méthode. L’organigramme détaillé de la méthode est donné à l’Annexe A ;
- Le Chapitre 4 précise comment représenter une infrastructure par une ou plusieurs lignes-source, et comment décomposer une ligne-source routière en sources ponctuelles. D’autre part, ce chapitre rappelle les paramètres nécessaires au calcul du niveau de puissance conformément à [Abq2008] ;
- Le Chapitre 5 décrit la prise en compte de la micrométéorologie du site à traiter. Différents modes d’estimation des probabilités d’occurrences de conditions favorables sont proposés. Ce chapitre est complété par l’Annexe B qui rassemble les occurrences tabulées pour 41 stations météorologiques réparties sur tout le territoire français. Le lecteur souhaitant des compléments concernant les effets de la micrométéorologie sur la propagation du son en trouvera à l’Annexe C. A des fins d’approfondissement ou d’utilisation “avancée”, l’Annexe D apporte des compléments sur l’analyse d’une situation météorologique ;
- Le Chapitre 6 aborde la notion de trajet élémentaire entre source et récepteur, ainsi que l’identification des trajets élémentaires en 3D. Des compléments sur les aspects géométriques de la propagation sont donnés à l’Annexe E ;
- Le Chapitre 7, qui spécifie le calcul de l’atténuation sur un trajet élémentaire, constitue le noyau de la NMPB-Routes-2008. Il est complété par l’Annexe F qui traite des éléments particuliers ;
- L’Annexe G donne une analyse statistique des résultats de la confrontation de la NMPB-Routes-2008 à des campagnes expérimentales sur des sites de topographie complexe ;
- Les sites retenus pour les campagnes expérimentales sont présentés à l’Annexe H ;
- A l’attention des personnes qui souhaiteraient, soit tester leur compréhension de la NMPB-Routes-2008, soit implanter la méthode, l’Annexe I fournit des exemples d’application pour différents profils en travers ;
- Les utilisateurs qui seraient déjà familiers de la NMPB-Routes-96, trouveront à l’Annexe J l’inventaire des changements introduits par la NMPB-Routes-2008.

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.

La notation \widehat{MN} désigne la longueur de trajet courbe entre les points M et N , en conditions favorables à la propagation (Cf. Section C.2.1.2).

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 (Cf. Section 7.3.1) sont notées par la lettre z .

Les niveaux sonores, notés par l'initiale L , sont exprimés en dB par bande de tiers d'octave lorsque l'indice A est omis. Les niveaux sonores en dB(A) sont affectés de l'indice A.

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 :

$$L_1 \oplus L_2 = 10 \log_{10} \left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} \right) \quad (2.1)$$

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 (Cf. Section C.2.1.3 pour une explication physique).

Conditions atmosphériques favorables à la propagation du son (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 (Cf. Section C.2.1.2 pour une explication physique).

Conditions atmosphériques défavorables à la propagation du son (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 (Cf. Section C.2.1.1 pour une explication physique).

Trajet direct : ligne droite reliant la source S et le récepteur R (Cf. Figure 7.1).

2.3-Notations

α	Coefficient d'atténuation atmosphérique, en dB/km.
α_r	Coefficient d'absorption acoustique de la paroi d'un obstacle.
δ	Différence de marche, en m, intervenant dans les calculs de diffraction.
δz_s	Correctif de hauteur de source en conditions favorables, en m.
δz_r	Correctif de hauteur de récepteur en conditions favorables, en m.
δz_T	Correctif de hauteur dû à la turbulence en conditions favorables, en m.
λ	Longueur d'onde, en m, à la fréquence médiane nominale f_m d'une bande de tiers d'octave donnée : $\lambda = c/f_m$.
Γ	Rayon de courbure, en m, du trajet de propagation en conditions favorables.
Δ_{dif}	Atténuation due à la diffraction pure (<i>i.e.</i> sans prise en compte des effets de sols), en dB.
A_{atm}	Atténuation due à l'absorption atmosphérique dans une bande de tiers d'octave donnée, en dB.
$A_{dif,F}$	Atténuation due à la diffraction en conditions favorables dans une bande de tiers d'octave donnée, en dB.
$A_{dif,H}$	Atténuation due à la diffraction en conditions homogènes dans une bande de tiers d'octave donnée, en dB.
A_{div}	Atténuation due à la divergence géométrique, en dB.
$A_{i,F}$	Atténuation due à la propagation entre S_i et R en conditions favorables dans une bande de tiers 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.
$A_{sol,F}$	Atténuation due à l'effet de sol en conditions favorables dans une bande de tiers d'octave donnée, en dB.
$A_{sol,H}$	Atténuation due à l'effet de sol en conditions homogènes dans une bande de tiers d'octave donnée, en dB.
A_{talus}	Atténuation due à un talus de déblai, 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 7.1). 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 longueur de la projection du segment SR sur le plan de sol moyen perpendiculairement à celui-ci (voir Figure 7.1).
e	Distance entre les points de diffraction extrêmes dans le cas de diffractions multiples, en m.
f_m	Fréquence médiane nominale d'une bande de tiers d'octave donnée, en Hz. Valeurs possibles : {100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000}.
G	Coefficient de sol, sans dimension, compris entre 0 et 1. Caractérise l'absorption acoustique d'un sol.
G_{talus}	Coefficient de sol moyen du talus de déblai en bord de voie.
G_{trajet}	Coefficient de sol le long d'un trajet de propagation.
G'_{trajet}	Coefficient de sol équivalent le long d'un trajet de propagation.
h_0	Plus grande des deux hauteurs de l'arête de diffraction par rapport à chacun des deux plans de sol moyen côté source et côté récepteur.
h_r	Hauteur de R au-dessus du sol, en m (voir Figure 7.1).
h_s	Hauteur de S au-dessus du sol, en m (voir Figure 7.1).
I	Point de réflexion sur le talus (voir Figure 7.3).
k	Nombre d'onde pour une bande d'octave donnée, en m^{-1} : $k = 2\pi f_m/c$
L_{AeqLT}	Niveau sonore global de long terme L_{Aeq} dû à l'ensemble des sources et sources images au point R , en dB(A).
$L_{eq,LT}$	Niveau sonore de long terme L_{eq} dû à l'ensemble des sources et sources images au point R dans une bande de tiers d'octave donnée, en dB.

$L_{i,F}$	Niveau sonore L_{eq} dû à la source S_i au point R en conditions favorables dans une bande de tiers d'octave donnée, en dB.
$L_{i,H}$	Niveau sonore L_{eq} dû à la source S_i au point R en conditions homogènes dans une bande de tiers d'octave donnée, en dB.
L_{Awi}	Niveau de puissance acoustique d'une source S_i dans une bande de tiers d'octave donnée, en dB(A).
$L_{W/mVL}$	Niveau de puissance acoustique par unité de longueur pour un débit de 1 véhicule léger / heure, en dB/m.
$L_{W/mPL}$	Niveau de puissance acoustique par unité de longueur pour un débit de 1 poids-lourd / heure, en dB/m.
O	Point de diffraction.
p	Probabilité d'occurrence de conditions favorables sur une période de long terme dans une direction donnée, $p \in [0, 1]$.
p_i	Probabilité d'occurrence de conditions favorables sur une période de long terme dans la direction du trajet direct entre S_i et R .
Q_{PL}	Débit horaire de poids-lourds, en véhicules/h.
Q_{VL}	Débit horaire de véhicules légers, en véhicules/h.
R	Point récepteur.
R'	Récepteur image.
S	Source ponctuelle.
S_i	Source ponctuelle d'indice i dans une ligne de sources.
S'	Source image par rapport au plan moyen.
S''	Source image par rapport au plan du talus.
$z_{o,r}$	Hauteur équivalente de O mesurée perpendiculairement au plan de sol moyen côté récepteur, en m (voir Figure 7.4).
$z_{o,s}$	Hauteur équivalente de O mesurée perpendiculairement au plan de sol moyen côté source, en m (voir Figure 7.4).
z_r	Hauteur équivalente de R mesurée perpendiculairement au plan de sol moyen, en m (voir Figure 7.1).
z_s	Hauteur équivalente de S mesurée perpendiculairement au plan de sol moyen, en m (voir Figure 7.1).

3-Aperçu général de la méthode

Pour un récepteur R les calculs sont réalisés selon les étapes suivantes (Cf. Figure A.1) :

1. décomposition des sources de bruit en sources sonores ponctuelles (Cf. Section 4.1);
2. détermination du niveau de puissance acoustique de chaque source (Cf. Section 4.2);
3. calcul de la probabilité d'occurrence de conditions favorables pour chaque direction (S_i, R) (Cf. Chapitre 5);
4. recherche des trajets de propagation entre chaque source et le récepteur - trajets directs, réfléchis et/ou diffractés - (Cf. Chapitre 6);
5. sur chaque trajet de propagation (Cf. Chapitre 7) :
 - calcul de l'atténuation en conditions favorables;
 - calcul de l'atténuation en conditions homogènes;
 - calcul du niveau sonore de long terme de chaque trajet et de l'occurrence des conditions favorables;
6. cumul des niveaux sonores de long terme de chaque trajet, permettant ainsi de calculer le niveau sonore total au point récepteur (cf; Section 3.3).

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 (Cf. Figure A.1).

Lorsque cette méthode est utilisée à des fins réglementaires, comme l'application de l'arrêté du 5 mai 1995, les hypothèses de calcul retenues doivent être représentatives d'une situation moyenne annuelle (trafic, sol, atmosphère).

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

3.1-Niveau sonore en conditions favorables ($L_{i,F}$) pour le trajet (S_i, R)

$$L_{i,F} = L_{Awi} - A_{i,F} \quad (3.1)$$

Le terme $A_{i,F}$ représente l'atténuation totale le long du chemin de propagation en conditions favorables, et se décompose de la manière suivante :

$$A_{i,F} = A_{div} + A_{atm} + A_{front,F} \quad (3.2)$$

où

- A_{div} est l'atténuation due à la *divergence* géométrique;
- A_{atm} est l'atténuation due à l'absorption *atmosphérique*;
- $A_{front,F}$ est l'atténuation due à la *frontière* du milieu de propagation en conditions favorables. Elle peut contenir les termes suivants :
 - $A_{sol,F}$ qui est l'atténuation due au *sol* en conditions favorables;
 - $A_{dif,F}$ qui est l'atténuation due à la *diffraction* en conditions favorables;
 - A_{talus} qui est l'atténuation due à la réflexion sur un *talus* de déblai.

Pour un trajet et un tiers d'octave donnés on peut avoir les deux cas suivants :

- soit on calcule $A_{sol,F}$ et A_{talus} ($A_{dif,F}=0$ dB), en absence de diffraction :
 - si aucun talus n'est présent (Cf. Section 7.3.5), alors $A_{talus}=0$ dB et $A_{front,F}=A_{sol,F}$;
 - sinon il faut calculer $A_{sol,F}$ et A_{talus} , et $A_{front,F}=A_{sol,F}+A_{talus}$;
- soit on calcule $A_{dif,F}$ ($A_{sol,F}=0$ dB et $A_{talus}=0$ dB). L'effet de sol et l'éventuel talus de déblai sont pris en compte dans la formule de $A_{dif,F}$ elle-même. On a donc $A_{front,F}=A_{dif,F}$.

3.2- Niveau sonore en conditions homogènes ($L_{i,H}$) pour le trajet (S_i, R)

La démarche est rigoureusement identique au cas des conditions favorables présenté à la section précédente.

$$L_{i,H} = L_{Awi} - A_{i,H} \quad (3.3)$$

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

$$A_{i,H} = A_{div} + A_{atm} + A_{front,H} \quad (3.4)$$

où

- A_{div} est l'atténuation due à la *divergence* géométrique ;
- A_{atm} est l'atténuation due à l'absorption *atmosphérique* ;
- $A_{front,H}$ est l'atténuation due à la *frontière* du milieu de propagation en conditions homogènes. Elle peut contenir les termes suivants :
 - $A_{sol,H}$ qui est l'atténuation due au *sol* en conditions homogènes ;
 - $A_{dif,H}$ qui est l'atténuation due à la *diffraction* en conditions homogènes.
 - A_{talus} qui est l'atténuation due à la réflexion sur un *talus* de déblai.

Pour un trajet et un tiers d'octave donnés on peut avoir les deux cas suivants :

- soit on calcule $A_{sol,H}$ et A_{talus} ($A_{dif,H}=0$ dB), en absence de diffraction :
 - si aucun talus n'est présent (Cf. Section 7.3.5), alors $A_{talus}=0$ dB et $A_{front,H}=A_{sol,H}$;
 - sinon il faut calculer $A_{sol,H}$ et A_{talus} , et $A_{front,H}=A_{sol,H}+A_{talus}$;
- soit on calcule $A_{dif,H}$ ($A_{sol,H}=0$ dB et $A_{talus}=0$ dB). L'effet de sol et l'éventuel talus de déblai sont pris en compte dans la formule de $A_{dif,H}$ elle-même. On a donc $A_{front,H}=A_{dif,H}$.

3.3- Niveau sonore de long terme pour le trajet (S_i, R)

Le niveau sonore "de long terme" dû à la source ponctuelle i est obtenu par sommation énergétique du niveau sonore en conditions homogènes et du niveau sonore en conditions favorables. Ces niveaux sonores sont pondérés par l'occurrence moyenne p_i des conditions favorables dans la direction du trajet (S_i, R) (Cf. Section 5.1):

$$L_{i,LT} = 10 \log_{10} \left(p_i 10^{L_{i,F}/10} + (1-p_i) 10^{L_{i,H}/10} \right) \quad (3.5)$$

La détermination des occurrence moyennes p_i est décrite à la Section 5.2.

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

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

$$L_{eq,LT} = 10 \log_{10} \left(\sum_i 10^{0.1L_{i,LT}} + \sum_{i'} 10^{0.1L_{i',LT}} \right) \quad (3.6)$$

où :

- i représente l'ensemble des sources ponctuelles ;
- i' l'ensemble des sources images correspondant à des réflexions sur des obstacles verticaux.

La prise en compte des réflexions par le biais des sources images est décrite à la Section 7.6. Le pourcentage d'occurrences 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).

3.5 - Niveau sonore 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 de tiers d'octave¹ :

$$L_{Aeq,LT} = 10 \log_{10} \left(\sum_{j=1}^{18} 10^{0.1 L_{eq,LT}(j)} \right) \quad (3.7)$$

où j est l'indice des 18 bandes de tiers d'octave de 100 à 5000 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.

¹ La pondération A est directement prise en compte dans le niveau de puissance L_{Awi} .

4- Description de la source

Une infrastructure de transport terrestre considérée en tant que source de bruit présente des spécificités du fait de :

- sa géométrie linéaire, on parle de “ligne-source”, et la répartition de la puissance acoustique sur la largeur de la plateforme circulée ;
- la variabilité de son émission sonore le long de l’itinéraire.

Pour calculer le niveau sonore engendré par une telle infrastructure, une modélisation de la source est nécessaire. Le modèle retenu ici repose sur une décomposition de l’infrastructure en sources sonores ponctuelles.

4.1- Décomposition des sources

4.1.1- Notion de tronçon acoustiquement homogène

En premier lieu, il est nécessaire de déterminer les tronçons (ou “arcs”, en termes de géomatique) sur lesquels on peut considérer que :

1. l’émission sonore ne varie pas, ou varie peu [Abq2008];
2. la géométrie du profil en travers de la route ne varie pas. Ceci permet d’appliquer le même modèle de décomposition de la ligne-source en sources élémentaires.

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

4.1.2- Etendue des lignes-source

L’infrastructure est représentée par des lignes-source. Chaque ligne-source doit respecter les contraintes suivantes pour chaque récepteur :

- le rapport de la distance à la source ponctuelle la plus éloignée et de la distance à la source ponctuelle la plus proche doit être supérieur ou égal à 10 ;
- la distance à la source ponctuelle la plus éloignée doit être supérieure ou égale à 200 m.

4.1.3- Position des lignes-source

L’infrastructure est représentée par un certain nombre de lignes-source. Le nombre et la position des ces lignes-source dépendent de la précision recherchée. Lorsqu’on ne cherche pas à limiter le nombre de calculs à réaliser, on positionnera une ligne-source au centre de chaque voie de circulation (Cf. Figure 4.1).

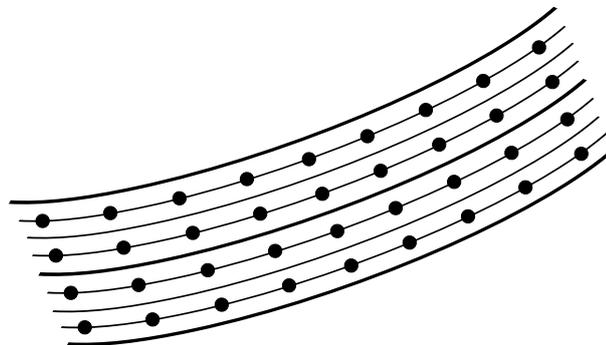


FIG. 4.1 – Position optimale des lignes-source dans le cas d’une route à 2x2 voies.

Il est également possible, en fonction de la distance à la voie et des conditions de propagation, de représenter chaque sens de circulation par une ligne-source placée au centre de la chaussée de chaque sens, voire de représenter la totalité de l’infrastructure par une seule ligne-source 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-source au centre de chaque voie de circulation, et ce choix s'impose lorsqu'il y a diffraction ou lorsque le trafic est fortement dissymétrique entre les deux sens de circulation.

4.1.4 - Décomposition des lignes-source en sources ponctuelles élémentaires

Chaque ligne-source préalablement définie est décomposée en un ensemble de sources sonores ponctuelles. Chaque source ponctuelle est placée à 0.05 m au-dessus de la chaussée. Il existe plusieurs façons de procéder à cette décomposition :

Décomposition équiangulaire : on balaie le site depuis le point récepteur considéré par un ensemble de rayons espacés d'un angle constant. A chaque intersection d'un de ces rayons avec une ligne-source, on place un point source¹. Avec cette méthode, la décomposition d'une ligne-source dépend du point récepteur considéré. Dans tous les cas, le pas angulaire du balayage sera inférieur à 10° (Cf. Figure 4.2). En présence d'un segment de ligne-source non symétrique par rapport à la perpendiculaire passant par le récepteur, le pas angulaire doit être inférieur ou égal à 5°. Dans le cas d'un segment-source qui ne coupe pas la perpendiculaire passant par le récepteur, le pas angulaire doit être inférieur ou égal à 2°.

Décomposition équidistante : chaque ligne-source est décomposée en sources ponctuelles régulièrement espacées. Afin de conserver une bonne précision, le pas entre 2 sources consécutives ne doit pas être supérieur à la moitié de la distance orthogonale entre la voie et le point récepteur le plus proche, sans toutefois dépasser 20 m. Ici, la même décomposition est valable pour tous les récepteurs considérés.

Décomposition variable : dans certaines situations, notamment lorsque des points récepteurs sont proches de la voie en vue partiellement masquée, il peut être nécessaire de modifier localement la décomposition en sources ponctuelles en resserrant le pas entre deux sources consécutives¹.

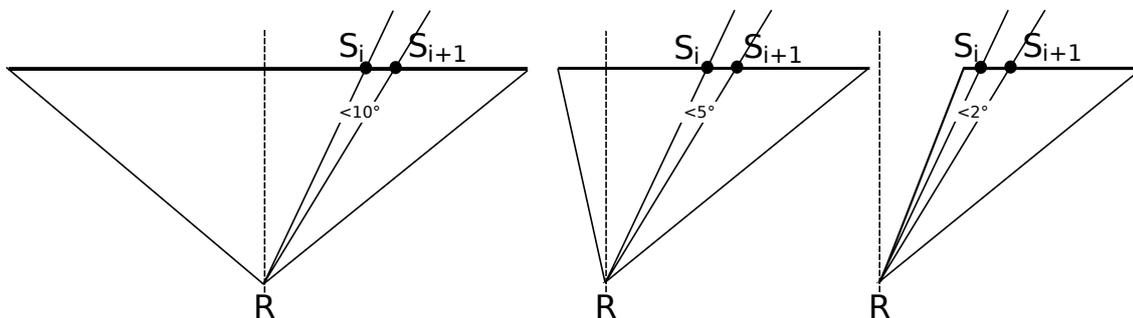


FIG. 4.2 – Décomposition équiangulaire - angle maximal de discrétisation en fonction de l'angle de vue.

4.2 - 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 de tiers d'octave donnée est obtenu à partir des valeurs fournies dans [Abq2008] en appliquant la formule suivante :

$$L_{Awi} = [(L_{W/mVL} + 10 \log_{10} Q_{VL}) \oplus (L_{W/mPL} + 10 \log_{10} Q_{PL})] + 10 \log_{10} l_i + R(j) \quad (4.1)$$

où

- $L_{W/mVL}$ et $L_{W/mPL}$ sont les niveaux de puissance par unité de longueur, tels que définis dans [Abq2008], respectivement pour les véhicules légers et les poids-lourds. Ces niveaux dépendent de la formulation du revêtement de chaussée, de son âge, de la déclivité et de la vitesse des véhicules ;

¹ En cas de décomposition équiangulaire ou de pas variable, le niveau de puissance acoustique de chaque source L_{Awi} varie.

- 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 mètres de la portion de ligne-source représentée par la source ponctuelle i (Cf. Figure 4.3) :

$$l_i = 1/2(S_{i-1}S_i + S_iS_{i+1}) \quad (4.2)$$

- $R(j)$ est la valeur du spectre de bruit routier normalisé à 0 dB et pondéré A, tel que défini dans [Abq2008]. Le spectre est à choisir en fonction du revêtement de chaussée, entre “Drainant” et “non Drainant” .

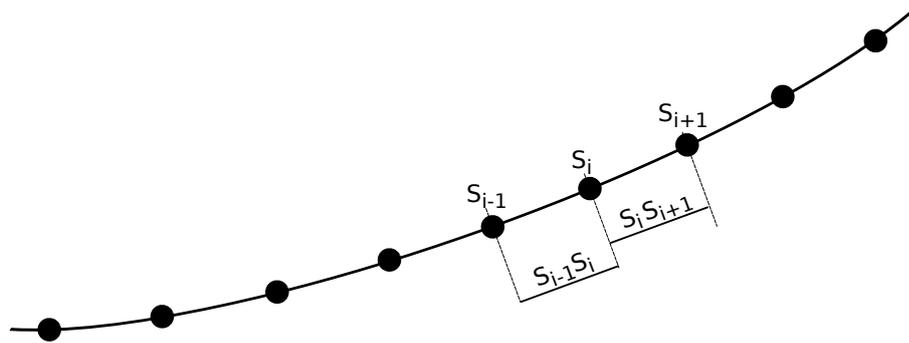


FIG. 4.3 – Notations pour le calcul de la longueur de source représentée par une source ponctuelle.

5- Prise en compte de la micrométéorologie

5.1- Méthode d'estimation du “niveau sonore de long terme”

La méthode consiste à calculer les niveaux sonores dans deux conditions de propagation typiques (définies à l'Annexe C) :

- Conditions de propagation *favorables* : niveaux notés L_F . Ces niveaux calculés ne sont pas des niveaux “extrêmes”, mais ils correspondent en quelque sorte à une moyenne des niveaux observés en conditions plutôt favorables à la propagation. Dans la NMPB-Routes-2008, ces conditions favorables correspondent à un gradient vertical linéaire de célérité acoustique de 0.07 /s ;
- Conditions de propagation *homogènes* : niveaux notés L_H . Bien qu'elles soient rarement rencontrées en réalité, ces conditions sont les plus simples à modéliser puisque les rayons sonores sont alors 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.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode opérationnelle simple permettant de calculer les niveaux sonores en 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 hypothèse de départ surestime les niveaux sonores réels obtenus dans ces conditions de propagation, mais va dans le sens d'une meilleure protection des riverains.

Le niveau de long terme est donc calculé en faisant la somme énergétique des niveaux L_F et L_H , pondérés respectivement par la probabilité d'occurrence des conditions favorables sur le site et la probabilité complémentaire :

$$L_{LT} = 10 \log_{10} \left(p 10^{L_F/10} + (1-p) 10^{L_H/10} \right) \quad (5.1)$$

où p est la probabilité d'occurrence des conditions favorables à long terme. p est donc compris entre 0 et 1. Cette formule est illustrée par la Figure 5.1, où l'on considère que le niveau L_F règne pendant la fraction p du temps, et le niveau L_H pendant la fraction complémentaire $1-p$ du temps.

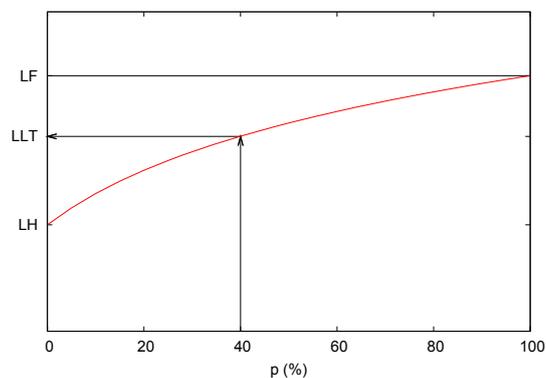


FIG. 5.1 – Principe de calcul du niveau sonore de long terme en fonction de la probabilité d'occurrence p (%). On montre par exemple ici le niveau L_{LT} obtenu pour une occurrence de conditions favorables égale à 40 %.

Sur un site donné, cette probabilité d'occurrence de conditions favorables dépend de la direction récepteur-source, 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 (Cf. Section 3.4).

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

5.2 - Détermination des valeurs d'occurrences météorologiques

5.2.1 - Simplifications possibles

Avant d'entreprendre certaines actions particulièrement lourdes en vue de déterminer les probabilités d'occurrences de conditions favorables, 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 favorables, les seuils visés, on est assuré que ces seuils seront également respectés en 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 ont 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.

5.2.2 - Occurrences calculées pour la France métropolitaine

Les relevés de 41 stations météorologiques réparties sur le territoire métropolitain ont été analysés à l'aide d'un modèle micrométéorologique (Cf. [Bru1996] et [LRS2008]) permettant de calculer les séries horaires des gradients verticaux de vitesse de vent et de température sur une période allant suivant les stations de 17 à 20 ans (1987-2007). Ces gradients météorologiques sont ensuite utilisés pour accéder à une description statistique du gradient vertical de célérité acoustique horaire et de calculer en particulier les valeurs d'occurrence des conditions favorables dans chaque direction pour une période de long terme. Les résultats sont présentés en Annexe B sous trois formes :

- deux séries de tableaux définissant, pour chaque station météorologique, les probabilités d'occurrence (en pourcentages) des conditions favorables à la propagation par secteurs de 20° de direction récepteur-source, et pour différentes périodes (6h-22h, 22h-6h) et (6h-18h, 18h-22h, 22h-6h) ;
- 41 diagrammes polaires (roses d'occurrences) qui représentent pour chaque station météorologique les probabilités d'occurrence des conditions favorables à la propagation en fonction de la direction récepteur-source pour les 4 périodes réglementaires 6h-18h, 18h-22h, 6h-18h, 22h-6h (Cf. Section B.3) ;
- 4 cartes fournissant, pour deux directions récepteur-source (0 et 90°), les lignes "d'iso-occurrence" de conditions favorables pour les périodes 6h-22h et 22h-6h. Ces cartes ont été obtenues par interpolation entre les stations les plus proches. Elles sont données à titre informatif afin d'illustrer la répartition spatiale des occurrences sur le territoire (Cf. Section B.4).

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°, à l'exception des sites où un vent dominant est extrêmement marqué. Les variations en fonction de la direction sont lissées en particulier du fait que l'effet des facteurs thermiques est isotrope.

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.

5.2.3 - Domaine d'utilisation

Ces valeurs ne sont utilisables que pour des sites répondant aux critères d'implantation des stations météorologiques arrêtés par Météo-France ainsi qu'aux hypothèses requises par le modèle micrométéorologique (Cf. [Bru1996]) utilisé pour l'établissement de ces valeurs :

- 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.

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 est déterminante, et que l'on ne peut donc pas se permettre d'extrapoler des valeurs mesurées sur une station météorologique officielle à des sites distants.

5.2.4 - Autres cas

Lorsque qu'un site ne répond pas aux critères définis à la Section 5.2.3, le projeteur peut recourir aux différentes possibilités d'analyse météorologique exposées ci-dessous :

- exploiter des données météorologiques locales recueillies spécialement pour les besoins du projet ;
- exploiter des données météorologiques locales existantes ;
- adopter les valeurs données en Annexe B ;
- adopter des valeurs forfaitaires "par excès".

Ces démarches vont dans un ordre croissant de facilité de mise en œuvre mais décroissant en terme de précision des résultats obtenus.

5.2.4.1 - Exploitation de données météorologiques locales recueillies pour le projet

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

- Mesure locale simultanée des caractéristiques thermiques (température, ensoleillement, couverture nuageuse) et aérodynamiques (vitesse et direction du vent) du site (Cf. [Zou1998] et [prNFS31110]). Cette mesure devrait être idéalement 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.
- Recueil à la station météorologique officielle la plus proche, ou la plus représentative du site étudié, des informations analogues correspondantes :
 - à la même période, d'une part ;
 - à une période de long terme au sens météorologique, d'autre part (soit au moins 10 ans, l'optimum étant 30 ans);
- 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 propres au site étudié ;
- Analyse de ces caractéristiques (Cf. Section D.3.2) afin d'estimer les occurrences de conditions favorables de long terme sur le site étudié ;

Cette démarche est longue et complexe mais est celle parmi les 4 démarches présentées ici qui fournit les résultats les plus précis. Elle ne pourra être effectuée que dans des cas très particuliers. Elle nécessite bien entendu également le concours conjoint de spécialistes de la micro météorologie et de l'acoustique et doit être envisagée très en amont des études du projet routier. Ces derniers devront détailler et justifier les choix pris pour l'analyse météorologique (choix de la station météorologique, durée de la période de mesures des grandeurs météorologiques, durée de la période d'acquisition des données de la station météorologique officielle, méthode de recalage, etc.).

5.2.4.2 - Exploitation de données météorologiques 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. Se baser sur une station éloignée du site étudié constitue une approximation qui n'est pas sans conséquence sur la représentativité spatiale des résultats (Cf. Section D.2.1).

La collecte d'informations micrométéorologiques peut alors permettre d'accéder à un ordre de grandeur des occurrences "favorables" en procédant comme suit :

- Les caractéristiques thermiques (température, ensoleillement, couverture nuageuse) et aérodynamiques (vitesse et direction du vent) sont recueillies auprès d’une station météorologique locale de façon simultanée pour une période de long terme au sens météorologique (soit au moins 10 ans, l’optimum étant 30 ans). Pour cela, il faut avoir recours à des données régionales ou quantitatives, (*e.g.* : celles fournies par Météo-France, Cf. Section D.3.2);
- Calcul des occurrences de conditions favorables (Cf. [Zou1998] et [prNFS31110]).

Cette démarche complexe nécessite le concours de spécialistes de la micrométéorologie et de l’acoustique. Ces derniers devront détailler et justifier les choix pris pour l’analyse météorologique (choix de la station météorologique, durée de la période d’acquisition des données de la station météorologique officielle, *etc.*).

5.2.4.3 - Utilisation des valeurs forfaitaires tabulées

Même lorsqu’un site n’est pas conforme aux critères donnés à la Section 5.2.3, il est possible d’utiliser les valeurs fournies à l’Annexe B. Dans ce cas, la qualité de l’estimation des valeurs forfaitaires d’occurrences de conditions 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 exactement aux conditions “favorables” locales.

5.2.4.4 - Utilisation des valeurs forfaitaires “par excès”

Ce principe consiste à maximiser par précaution la probabilité d’occurrence des conditions favorables, ce qui conduira à surestimer les niveaux de long terme et donc à mieux protéger les riverains, mais aussi à un surdimensionnement des protections au regard des exigences réglementaires.

Valeur forfaitaire métropolitaine : pour une période donnée, on considérera, quel que soit le site (métropole) et la direction, les valeurs données dans le Tableau 5.1 comme valeur forfaitaire.

Période	6h-22h	6h-18h	18h-22h	22h-6h
Occurrence forfaitaire	65	67	82	94

TAB. 5.1 – Valeurs forfaitaires de probabilité d’occurrence de conditions favorables (%).

Valeur forfaitaire régionale : pour un site situé en métropole une approche plus nuancée pourra consister à considérer, pour chaque période et quelle que soit la direction, la valeur maximale d’occurrences de conditions favorables des valeurs fournies à l’Annexe B de la (ou des) station(s) météorologique(s) la(les) plus proche(s) du site.

Exemple 5.1 Application à la ville de Niort

Pour un site situé à proximité de Niort, la valeur forfaitaire régionale est obtenue en prenant le maximum des valeurs des occurrences de toutes les directions des stations de Poitiers et de La Rochelle, c’est à dire $p(6h-22h)=52$ et $p(22h-6h)=71$.

6 - Analyse de la propagation

6.1 - Récepteur

Les points récepteurs ne doivent pas être placés à moins de 2 m au-dessus du sol. Cette hauteur doit être connue au moins à 0.10 m près afin de limiter l'incertitude sur les résultats, en particulier en présence d'une diffraction.

Par défaut, la méthode calcule des niveaux sonores "en champ libre", *i.e.* sans prendre en compte la dernière réflexion pour un récepteur en façade.

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 L_{AeqLT} calculé ;
- soit en réalisant un calcul de réflexion, selon la méthode décrite à la Section 7.6.

6.2 - Trajets de propagation élémentaires

La méthode de calcul exposée ici, comme la norme ISO 9613-2 et la plupart des méthodes officielles en Europe, appartient à la famille des méthodes géométriques [ISO9613p2]. Elles se fondent sur la recherche de trajets de propagation entre la source et le récepteur. Ces trajets représentent les chemins de propagation de l'énergie sonore.

La recherche des trajets de propagation en 3D peut devenir très lourde, notamment lorsque des réflexions se produisent sur des surfaces inclinées quelconques. C'est pourquoi on préférera la plupart du temps appliquer la méthode en mode "2 dimensions et demie" (2D1/2).

L'expression "2D1/2" signifie que la recherche des trajets de propagation existant entre une source ponctuelle et un récepteur se fait dans une projection du site sur un plan horizontal. Une fois que tous les trajets de propagation sont identifiés, chacun est traité en 2 dimensions dans un plan vertical. Dans le cas de trajets comportant des réflexions, les plans verticaux sont mis à plat, à la façon d'un paravent chinois que l'on déplie.

On recherche donc tout d'abord les trajets dans un plan passant par la source et le récepteur. Ce plan est défini par les 2 vecteurs orthogonaux unitaires \mathbf{u} et \mathbf{v} définis par :

$$\begin{cases} \mathbf{u} = \frac{1}{\|\vec{SR}\|} \vec{SR} = (u_x, u_y, u_z) \\ \mathbf{v} = (-u_y, u_x, 0) \end{cases} \quad (6.1)$$

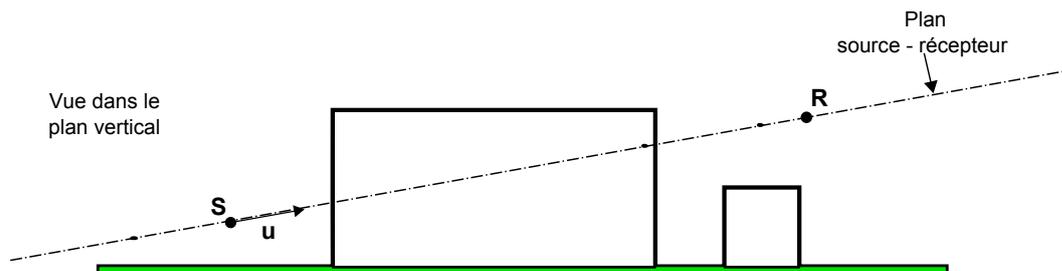


FIG. 6.1 – Construction du plan de coupe contenant la source et le récepteur.

Vue dans le plan
source - récepteur

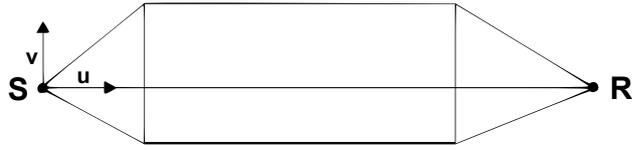


FIG. 6.2 – Aperçu des 3 trajets détectés dans le plan source-récepteur

Dans le cas général, on observe 4 types de trajets qui sont décrits aux paragraphes suivants.

6.2.1- Trajets de type 1

Ce sont des trajets “directs” de la source vers le récepteur, qui sont des trajets rectilignes en vue en plan, et qui peuvent néanmoins comporter des diffractions sur les arêtes horizontales des obstacles (Cf. Figure 6.3). Ce sont les cas les plus simples à traiter.

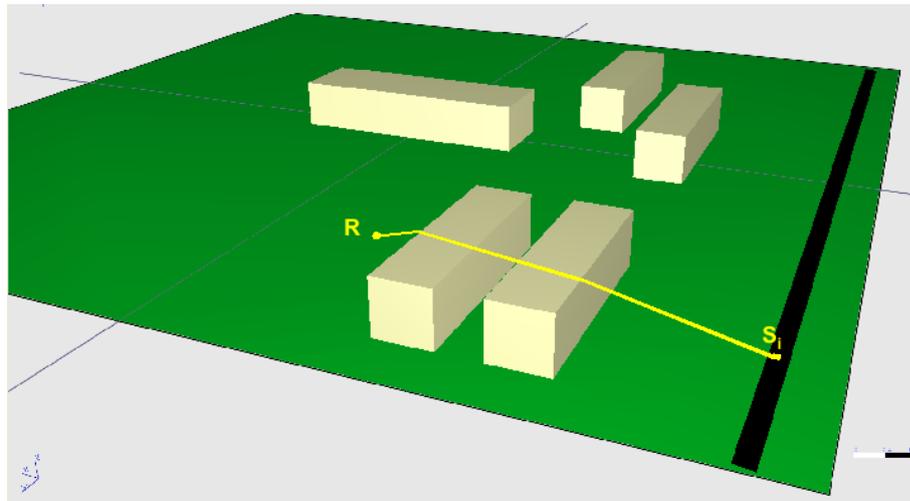


FIG. 6.3 – Trajet de type 1.

On réalise la coupe 2D de la géométrie dans un plan vertical passant par le trajet identifié et on procède au calcul conformément aux indications du Chapitre 7.

6.2.2- Trajets de type 2

Ce sont des trajets réfléchis sur des obstacles verticaux, ou faiblement inclinés ($<15^\circ$), comme sur la Figure 6.4, pouvant aussi comporter des diffractions sur les arêtes horizontales des obstacles (Cf. Figure 6.5).

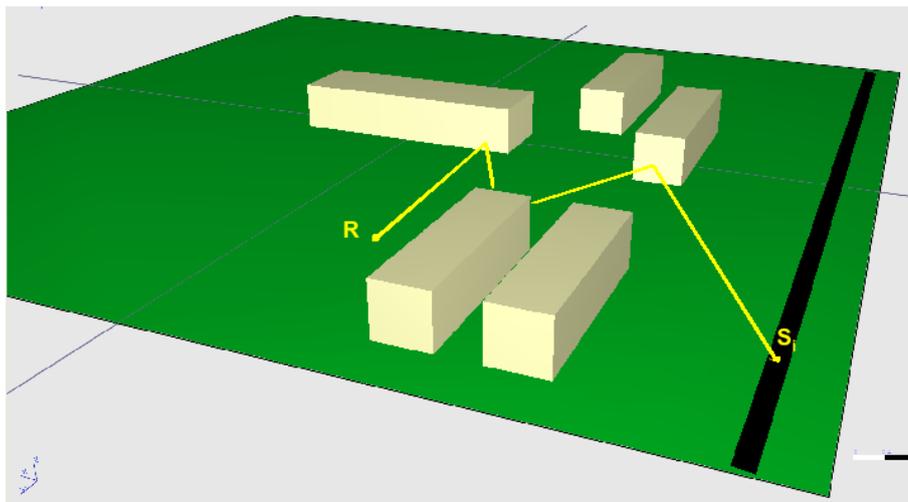


FIG. 6.4 – Trajet de type 2.

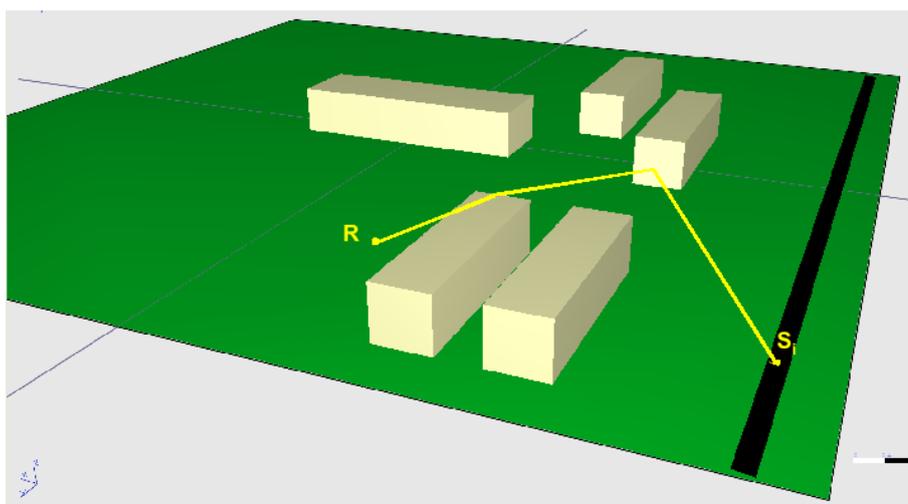


FIG. 6.5 – Trajet de type 2 avec diffraction sur arête horizontale.

Le principe est d'appliquer la méthode des images (Cf. Section 7.6). On réalise une coupe 2D de la géométrie dans une succession de plans verticaux passant par les segments rectilignes situés entre deux réflexions. La coupe est obtenue en dépliant ces plans à la façon d'un paravent chinois et les réflexions sont prises en compte en affectant la puissance acoustique d'un terme qui tient compte du coefficient de réflexion de chaque surface verticale rencontrée. A l'ordre 1, la puissance L'_w à considérer est obtenue conformément à la formule 7.21. A l'ordre 2, la puissance L''_w à considérer est obtenue en appliquant la formule 7.21 dans laquelle on remplace L_w par L'_w et L'_w par L''_w . On procède ainsi de suite jusqu'à l'ordre n que l'on souhaite atteindre. On procède ensuite au calcul dans la coupe 2D verticale conformément aux indications de la Section 7.6.

6.2.3 - Trajets de type 3

Ce sont les trajets diffractés par les arêtes latérales des obstacles (Cf. Figure 6.6).

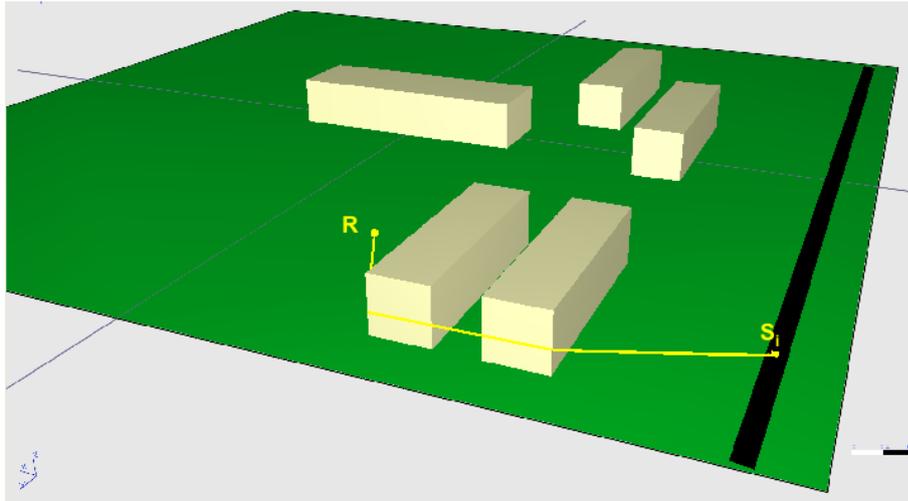


FIG. 6.6 – Trajet de type 3.

Le principe est de déterminer chaque terme de la formule 7.17 :

- Le terme $\Delta_{dif}(S,R)$ est obtenu en calculant la différence de marche δ_F entre le trajet direct et trajet enveloppe convexe des arêtes latérales dans le plan horizontal ;
- Les termes $\Delta_{dif}(S',R)$ et $\Delta_{dif}(S,R')$ sont supposés égaux à $\Delta_{dif}(S,R)$
- Le terme $A_{sol}(S,O)$ est calculé dans un plan vertical entre la source et le premier point O de l'enveloppe convexe des arêtes latérales diffractantes ;
- Le terme $A_{sol}(O,R)$ est calculé dans un plan vertical entre la source et le dernier point O de l'enveloppe convexe des arêtes latérales diffractantes.

6.2.4-Trajets de type 4

Ce sont des trajets mixtes qui sont à la fois diffractés par les arêtes latérales des obstacles et réfléchis par des surfaces verticales, *i.e.* d'inclinaison par rapport à la verticale inférieure à 15° (Cf. Figure 6.7). On procède alors comme pour les trajets de type 3 simplement en corrigeant la puissance de la source comme pour les trajets de type 2.

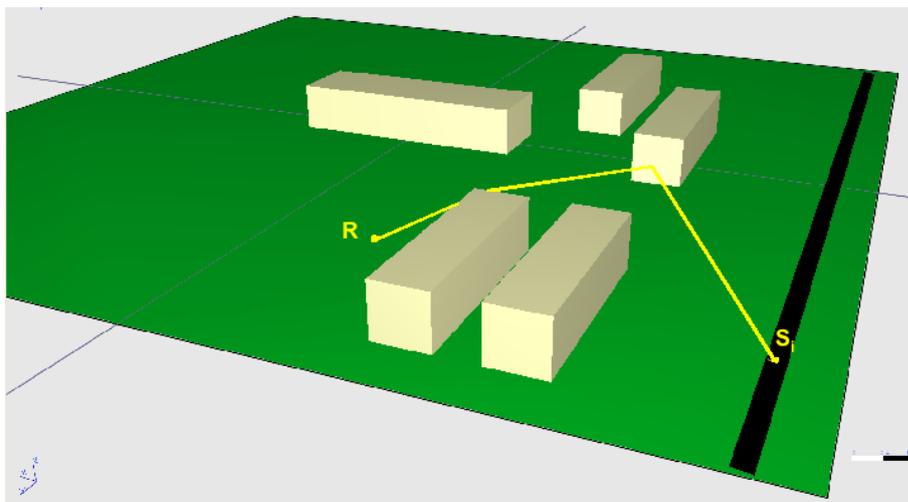


FIG. 6.7 – Trajet de type 4.

6.2.5 - Remarques

- 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 valide seulement jusqu'à une inclinaison de 15° par rapport à la verticale. En revanche, les réflexions sur le sol sont prises en compte dans A_{front} , quelle que soit la pente du terrain.
- La différence essentielle entre les conditions de propagation homogènes et favorables réside dans la courbure des rayons. Ceux-ci sont rectilignes en conditions homogènes et incurvés vers le sol en conditions favorables. Lors de la recherche des chemins de propagation dans cette méthode, notamment lors de la détermination des "points d'impact" sur le sol ou sur des obstacles, on considère, dans tous les cas, que les rayons sont rectilignes. La courbure des rayons est prise en compte dans les formules de calcul de l'effet de sol et de la diffraction. Cette façon de faire est conforme à la norme ISO 9613-2 [ISO9613p2].
- L'ordre de diffraction multiple peut être limité en cohérence avec la limitation de Δ_{dif} à 25 dB pour la diffraction sur les arêtes horizontales et par comparaison entre la différence de marche du trajet latéral et celle du trajet "direct" (type 1) passant au-dessus des obstacles.

Lorsque la méthode de calcul doit être généralisée à des situations complexes, il faut donc préciser :

- Les types de trajets pris en compte et les types de trajets négligés ;
- L'ordre de réflexion pris en compte en fonction du type de trajet et les éventuels critères associés ;
- L'ordre de diffraction en fonction du type de trajet et les éventuels critères associés.

En l'absence de ce type d'information, il est *impossible* de comparer deux résultats de calcul.

7- Calculs sur un trajet élémentaire

Ce chapitre s'applique lorsque la distance euclidienne entre la source et le récepteur n'excède pas 2000 m. Les autres trajets doivent être ignorés.

7.1 - Divergence géométrique

L'atténuation due à la divergence géométrique, A_{div} , prend en compte la diminution du niveau sonore due à la distance de propagation. Pour une source sonore ponctuelle en champ libre, l'atténuation en dB est donnée par :

$$A_{div} = 20 \log_{10} d + 11 \quad (7.1)$$

où d est la distance directe, en mètres, entre la source et le récepteur, c'est-à-dire, la distance en faisant abstraction du terrain et des obstacles éventuels.

7.2 - Absorption atmosphérique

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

$$A_{atm} = \alpha d / 1000 \quad (7.2)$$

où :

- d est la distance directe entre la source et le récepteur, en mètres ;
- α est le coefficient d'atténuation atmosphérique en dB/km à la fréquence médiane nominale de chaque bande de tiers d'octave, conformément au Tableau 7.1.

Fréquence médiane nominale (Hz)	100	125	160	200	250	315
α (dB/km)	0.25	0.38	0.57	0.82	1.13	1.51
Fréquence médiane nominale (Hz)	400	500	630	800	1000	1250
α (dB/km)	1.92	2.36	2.84	3.38	4.08	5.05
Fréquence médiane nominale (Hz)	1600	2000	2500	3150	4000	5000
α (dB/km)	6.51	8.75	12.2	17.7	26.4	39.9

TAB. 7.1 – Coefficient d'absorption atmosphérique par bande de tiers d'octave.

Les valeurs du coefficient α sont données pour une température de 15°C et une humidité relative de 70 %. Elles sont conformes à [ISO9613p1]. Utiliser d'autres valeurs de température et d'humidité sort du cadre de la NMPB-Routes-2008.

7.3 - Effet de sol

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

7.3.1 - 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. On rappelle que $h_s=0.05$ m (Cf. Section 4.1.4). 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 plan fictif représentant le profil moyen du terrain (Cf. Figure 7.1).

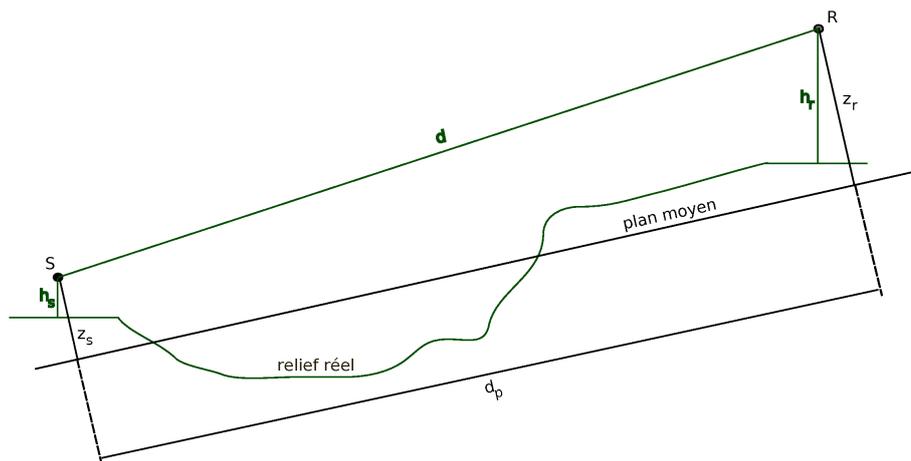


FIG. 7.1 – Hauteurs équivalentes par rapport au sol.

La hauteur équivalente d'un point est sa hauteur orthogonale par rapport à ce plan moyen. Il est ainsi possible de définir la hauteur équivalente z_s et la hauteur équivalente de récepteur z_r . On note d_p la distance entre source et récepteur en projection sur le plan moyen (Cf. Figure 7.1).

Le plan de sol moyen peut être obtenu par une régression selon la méthode des moindres carrés, appliquée au profil de sol compris entre la source et le récepteur.

Si la hauteur équivalente d'un point devient négative, c'est-à-dire si le point est situé en-dessous du plan de sol moyen, on retient une hauteur nulle, et le point équivalent est alors confondu avec son éventuel point image s'il y a diffraction.

7.3.2 - 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.

Type de sol	G (sans dimension)
Pelouse, pré, champ de céréales	1
Sous-bois (résineux ou feuillus)	1
Terre non compactée	0.7
Terre compactée, piste	0.3
Revêtement routier	0
Béton lisse	0

TAB. 7.2 – Valeurs de G pour différents sols.

Pour les besoins opérationnels de calcul, l'absorption acoustique d'un sol est représentée par un coefficient G adimensionnel, compris entre 0 et 1. G est indépendant de la fréquence. Le Tableau 7.2 donne la valeur de G pour les sols de l'environnement.. En général, la moyenne du coefficient G sur un trajet prend des

valeurs intermédiaires entre 0 et 1. Ici le G moyen représente la fraction absorbante le long du trajet. Pour un exemple, voir la Figure 7.2.

On définit G_{trajet} , comme la fraction de sol absorbant présente sur l'ensemble du trajet parcouru.

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. 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_{trajet} de la façon suivante :

$$G'_{trajet} = \begin{cases} \frac{d_p}{30(z_s + z_r)} G_{trajet} & \text{si } d_p \leq 30(z_s + z_r) \\ G_{trajet} & \text{sinon} \end{cases} \quad (7.3)$$

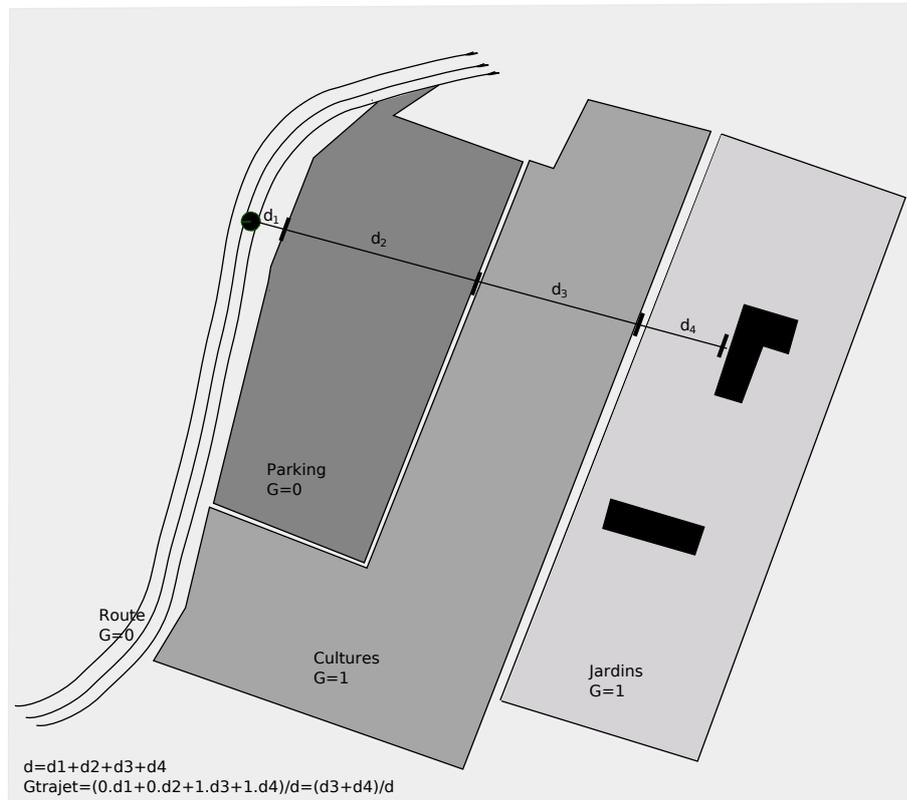


FIG. 7.2 – Détermination du coefficient de sol G_{trajet} sur un trajet de propagation.

7.3.3-Calcul en conditions homogènes

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

– si $G_{trajet} \neq 0$

$$A_{sol,H} = \max \left(-10 \log_{10} \left[4 \frac{k^2}{d_p^2} \left(z_s^2 - \sqrt{\frac{2C_f}{k}} z_s + \frac{C_f}{k} \right) \left(z_r^2 - \sqrt{\frac{2C_f}{k}} z_r + \frac{C_f}{k} \right) \right], A_{sol,H,min} \right) \quad (7.4)$$

où $k = 2\pi f_m / c$, f_m est la fréquence médiane nominale de la bande de tiers d'octave considérée, en Hz, c est la célérité du son dans l'air, prise égale à 340 m/s, et C_f est défini par

$$C_f = d_p \frac{1 + 3wd_p e^{-\sqrt{wd_p}}}{1 + wd_p} \quad (7.5)$$

où les valeurs de w sont données par la formule ci-dessous, en fonction de f_m et de G_{trajet} :

$$w = 0.0185 \frac{f_m^{2.5} G_{trajet}^{2.6}}{f_m^{1.5} G_{trajet}^{2.6} + 1.3 \times 10^3 f_m^{0.75} G_{trajet}^{1.3} + 1.16 \times 10^6} \quad (7.6)$$

$A_{sol,H,min} = -3(1 - G'_{trajet})$ est le minorant¹ de $A_{sol,H}$.

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

7.3.4 - Calcul en conditions favorables

L'effet de sol en conditions favorables (Cf. Annexe C) est calculé avec la formule de $A_{sol,H}$, moyennant les modifications suivantes :

1. Dans la formule de $A_{sol,H}$, les hauteurs z_s et z_r sont remplacées respectivement par $z_s + \delta z_s + \delta z_T$ et $z_r + \delta z_r + \delta z_T$ où

$$- \delta z_s = a_0 \left(\frac{z_s}{z_s + z_r} \right)^2 \frac{d_p^2}{2};$$

$$- \delta z_r = a_0 \left(\frac{z_r}{z_s + z_r} \right)^2 \frac{d_p^2}{2};$$

– $a_0 = 2 \times 10^{-4} m^{-1}$ est l'inverse du rayon de courbure ;

$$- \delta z_T = 6 \times 10^{-3} \frac{d_p}{z_s + z_r}.$$

2. Le minorant de $A_{sol,F}$ dépend de la géométrie du trajet :

$$A_{sol,F,min} = \begin{cases} -3(1 - G'_{trajet}) & \text{si } d_p \leq 30(z_s + z_r) \\ -3(1 - G'_{trajet})(1 + 2(1 - 30(z_s + z_r)/d_p)) & \text{sinon} \end{cases} \quad (7.7)$$

Les correctifs de hauteur δz_s et δz_r traduisent l'effet de la courbure des rayons sonores. δz_T rend compte de l'effet de la turbulence.

7.3.5 - Réflexion sur un talus de déblai

Dans cette partie, on suppose que le plan est orienté dans le sens trigonométrique.

La notion de talus de déblai est limitée ici aux bords de la plateforme routière qui est source de bruit. Ce type de talus donne lieu à un calcul de A_{talus} seulement si :

1. en coupe verticale le talus est un segment de droite. Les profils affines par morceaux ou présentant une courbure non nulle sont donc exclus ;
2. la pente du talus ($\vec{O}_1x, \vec{O}_1\vec{O}_2$) est comprise strictement entre 15 et 45° (Cf. Figure 7.3) ;
3. le pied du talus et le récepteur sont en vue directe ;
4. le pied du talus est à moins de 10 mètres du bord de plateforme le plus proche ;
5. le pied du talus est à une altitude inférieure ou égale à celle du bord de plateforme le plus proche.

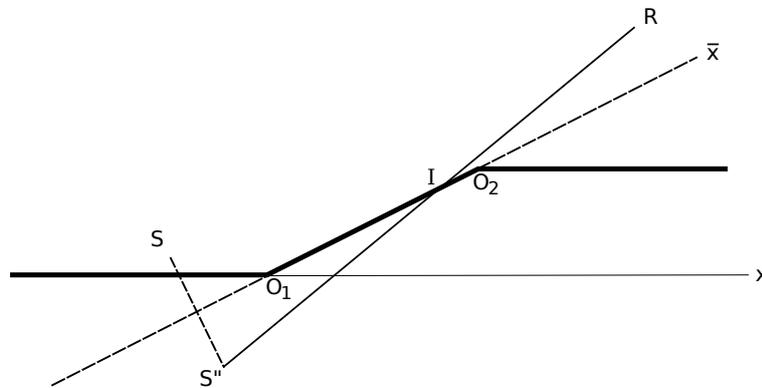


FIG. 7.3 – Notations utilisées pour le calcul de A_{talus} .

¹ Le terme $-3(1 - G'_{trajet})$ 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 les conditions précédentes sont satisfaites, A_{talus} se calcule comme suit, dans le plan vertical contenant la source et le récepteur (Cf. Figure 7.3):

1. recherche de la source image S'' par rapport à la tangente au talus ;
2. recherche du point d'intersection I du trajet (S'', R) avec la tangente au talus ;
3. calcul de la demi-longueur e de l'intersection de l'ellipsoïde de Fresnel (Cf. Section E.2) avec la tangente au talus :

$$e = \frac{1}{\cos\theta} \sqrt{\frac{\lambda S''I \times IR}{2 S''I + IR} + \frac{\lambda^2}{16}} \quad (7.8)$$

où $\theta = (\vec{O}_1x, \vec{O}_1\vec{O}_2) + (\vec{O}_1x, S''R)$;

4. calcul de l'abscisse de I sur le talus : si l'angle $(\vec{O}_1\vec{O}_2, \vec{O}_1I)$ est nul, alors $\bar{x}_I = O_1I$, sinon $\bar{x}_I = -O_1I$;
5. calcul de ϵ , proportion de l'intersection de l'ellipsoïde qui coïncide matériellement avec le talus :

$$\epsilon = \begin{cases} 0 & \text{si } \bar{x}_I \leq -e \\ \min\left(\frac{l_T}{2e}, \frac{\bar{x}_I + e}{2e}\right) - \max\left(0, \frac{\bar{x}_I - e}{2e}\right) & \text{si } -e < \bar{x}_I < l_T + e \\ 0 & \text{si } l_T + e \leq \bar{x}_I \end{cases} \quad (7.9)$$

où $l_T = O_1O_2$;

6. on en déduit

$$A_{talus} = -1.5\epsilon(2 - G_{talus}) \quad (7.10)$$

où G_{talus} est le facteur de sol du talus (Cf. Section 7.3.2).

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 chemin passe "suffisamment haut" au dessus de l'arête de diffraction, on peut poser $A_{dif} = 0$ et effectuer un calcul en vue directe en évaluant notamment A_{sol} (Cf. Section 7.3).

Dans la pratique, pour *chaque fréquence médiane nominale* de tiers d'octave, on compare la différence de marche δ à la quantité $-\lambda/20$. Si la différence de marche δ est inférieure à $-\lambda/20$, il n'y a pas lieu de calculer A_{dif} pour le tiers d'octave considéré. En d'autres termes, $A_{dif} = 0$ dans ce cas. Dans le cas contraire, on calcule A_{dif} comme décrit dans la suite de cette partie. Cette règle s'applique en conditions homogènes et en conditions favorables, pour la diffraction simple comme pour la diffraction multiple.



AVERTISSEMENT

Lorsque, pour un tiers d'octave donné, un calcul est conduit selon la procédure décrite dans le présent chapitre, A_{sol} est posé égal à 0 dB dans le calcul de l'atténuation totale. L'effet de sol est 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 terre (naturelles ou artificielles), ainsi que par les bords de remblais, de déblais et de viaducs.

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 à la Section 7.4.3².

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

² 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.

7.4.1 - Principes généraux

La Figure 7.4 illustre la méthode générale de calcul de l'atténuation due à la diffraction. Cette méthode est fondée sur la décomposition du trajet de propagation en deux parties : le trajet "côté source", situé entre la source et le point de diffraction, et le trajet "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 : $\Delta_{dif(S',R)}$;
 - entre S et le récepteur image R' : $\Delta_{dif(S,R')}$;

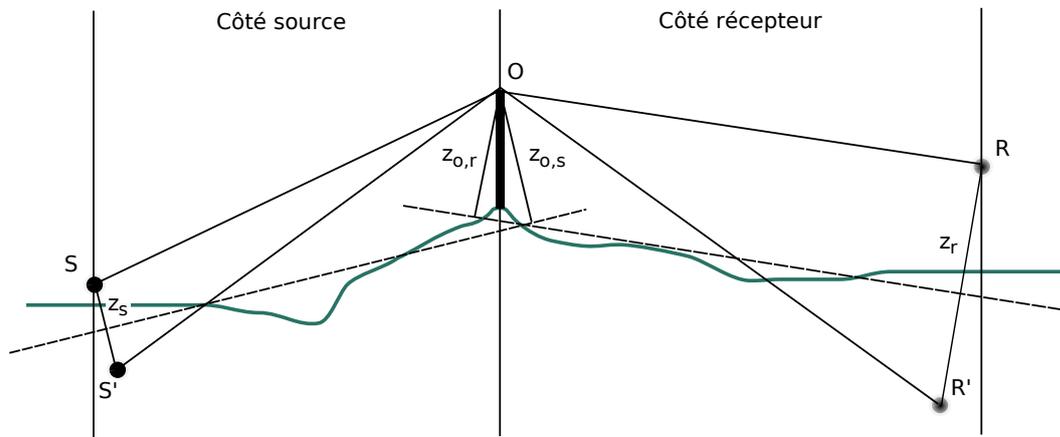


FIG. 7.4 – Géométrie d'un calcul de l'atténuation due à la diffraction.

où

- 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 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 moyen côté récepteur ;
- $z_{o,r}$: hauteur équivalente du point de diffraction O par rapport au plan de sol moyen côté récepteur.

L'irrégularité 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 au plan de sol moyen, côté source d'une part, et côté récepteur d'autre part (deux plans de sol moyen), selon la méthode décrite à la Section 7.3.1

7.4.2 - Diffraction pure

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

$$\Delta_{dif} = \begin{cases} 10C_h \log_{10}(3 + \frac{40}{\lambda} C'' \delta) & \text{si } \frac{40}{\lambda} C'' \delta \geq -2 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (7.11)$$

où

- quand l'arête de diffraction est un élément de terrain naturel : $C_h = 1$, quand l'arête de diffraction est un écran : $C_h = \min\left(\frac{f_m h_0}{250}, 1\right)$ où
 - f_m est la fréquence médiane nominale d'une bande de tiers d'octave;
 - h_0 est la plus grande des deux hauteurs de l'arête de diffraction par rapport à chacun des deux plans de sol moyen côté source et côté récepteur;
- λ est la longueur d'onde à la fréquence médiane nominale de la bande de tiers d'octave considérée;
- δ est la différence de marche entre le trajet diffracté et le trajet direct (Cf. Section 7.4.3);
- C'' est un coefficient qui permet la prise en compte des diffractions multiples :
 - $C'' = 1$ pour une diffraction simple;
 - pour une diffraction multiple, si e est la distance totale entre la diffraction la plus proche de la source et la diffraction la plus proche du récepteur (Cf. Figure 7.5 et Figure 7.7), ce coefficient est défini par :

$$C'' = \frac{1 + (5\lambda/e)^2}{1/3 + (5\lambda/e)^2} \quad (7.12)$$

Les valeurs de Δ_{dif} doivent être bornées :

- si $\Delta_{dif} < 0$: $\Delta_{dif} = 0$ dB;
- si $\Delta_{dif} > 25$: $\Delta_{dif} = 25$ dB pour une diffraction sur une arête horizontale et uniquement sur le terme Δ_{dif} qui figure dans le calcul de A_{dif} . Ce majorant ne doit pas être appliqué dans les termes Δ_{dif} qui interviennent dans le calcul de Δ_{sol} ou Δ_{talus} , ni pour une diffraction sur une arête verticale (diffraction latérale).

7.4.3 - Calcul de la différence de marche

La différence de marche δ se calcule dans un plan vertical contenant la source et le récepteur. Ceci est une approximation par rapport au principe de Fermat (Cf. Section E.1). L'approximation reste applicable ici (lignes-source). La différence de marche δ se calcule comme sur la Figure 7.5 et la Figure 7.6, en fonction des situations rencontrées :

7.4.3.1 - Conditions homogènes

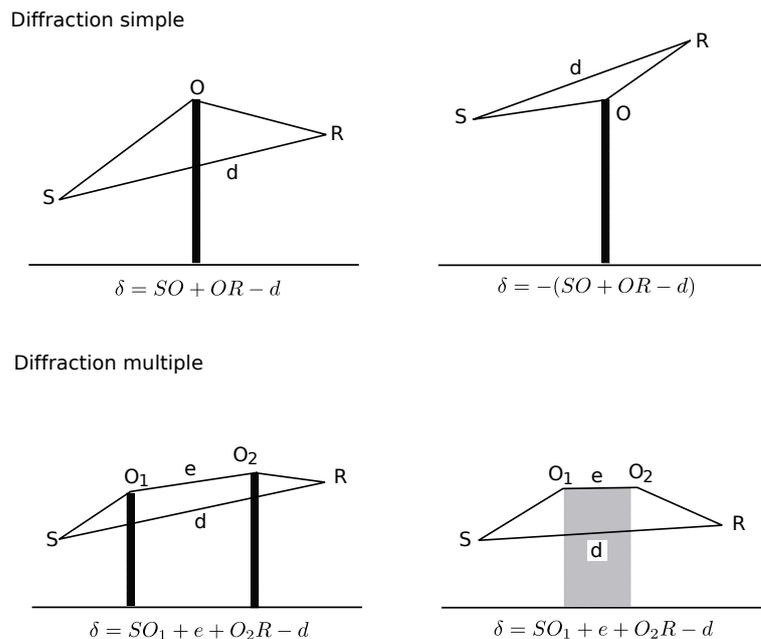


FIG. 7.5 – Calcul de la différence de marche en conditions homogènes. O , O_1 et O_2 sont les points de diffraction. Pour chaque configuration l'expression de δ est donnée.

7.4.3.2 - Conditions favorables

En conditions favorables (Cf. Annexe C), on considère que les trois rayons sonores courbes SO , OR , et SR ont un rayon de courbure identique Γ défini par

$$\Gamma = \max(1000, 8d) \quad (7.13)$$

où d est la longueur du segment de droite SR .

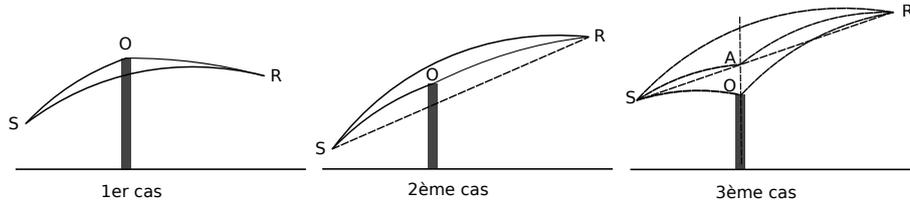


FIG. 7.6 – Calcul de la différence de marche en conditions favorables (diffraction simple).

On note \widehat{MN} la longueur d'un rayon sonore courbe MN en conditions favorables. Cette longueur est égale à :

$$\widehat{MN} = 2\Gamma \arcsin\left(\frac{MN}{2\Gamma}\right) \quad (7.14)$$

Trois cas sont *a priori* à considérer dans le calcul de la différence de marche en conditions favorables δ_F (Cf. Figure 7.6). En pratique deux formules suffisent à les traiter :

- si le rayon sonore rectiligne SR est masqué par l'obstacle (1^{er} et 2^{ème} cas de la Figure 7.6) : $\delta_F = \widehat{SO} + \widehat{OR} - \widehat{SR}$;
- si le rayon sonore rectiligne SR n'est pas masqué par l'obstacle (3^{ème} cas de la Figure 7.6) : $\delta_F = 2\widehat{SA} + 2\widehat{AR} - \widehat{SO} - \widehat{OR} - \widehat{SR}$

où A est l'intersection du rayon sonore rectiligne SR et du prolongement de l'obstacle diffractant.

Pour les diffractions multiples en conditions favorables :

- déterminer l'enveloppe convexe définie par les différentes arêtes de diffraction potentielles ;
- éliminer les arêtes de diffraction qui ne sont pas sur la frontière de l'enveloppe convexe ;
- calculer δ_F sur la base des longueurs de rayons sonores courbes, en décomposant le trajet diffracté en autant de segments courbes que nécessaire (Cf. Figure 7.7) :

$$\delta_F = \widehat{SO}_1 + \sum_{i=1}^{i=n-1} O_i \widehat{O}_{i+1} + O_n \widehat{R} - \widehat{SR} \quad (7.15)$$

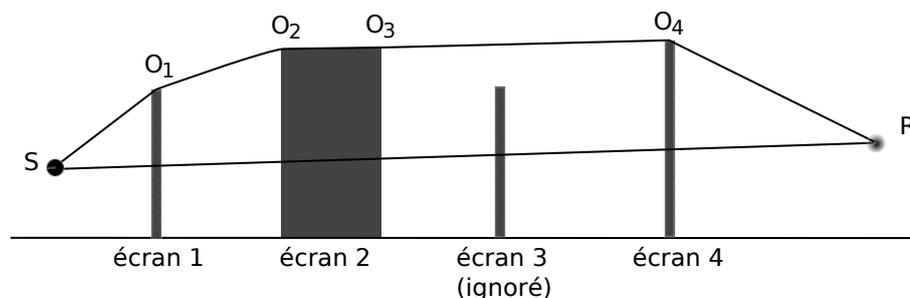


FIG. 7.7 – Exemple de calcul de la différence de marche en conditions favorables, dans le cas de diffractions multiples.

Dans le cas présenté sur la Figure 7.7, la différence de marche est :

$$\delta_F = \widehat{SO} + O_1\widehat{O_2} + O_2\widehat{O_3} + O_3\widehat{O_4} + \widehat{O_4R} - \widehat{SR} \quad (7.16)$$

7.4.4 - Calcul de l'atténuation A_{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 :

$$A_{dif} = \Delta_{dif(S,R)} + \Delta_{sol(S,O)} + \Delta_{talus(S,O)} + \Delta_{sol(O,R)} \quad (7.17)$$

où :

- $\Delta_{dif(S,R)}$ est l'atténuation due à la diffraction entre la source S et le récepteur R ;
- $\Delta_{sol(S,O)}$ est l'atténuation due à l'effet de sol côté source, pondérée par la diffraction côté source (Cf. Section 7.4.4.1) ;
- $\Delta_{talus(S,O)}$ est l'atténuation due à l'éventuel talus côté source ;
- $\Delta_{sol(O,R)}$ est l'atténuation due à l'effet de sol côté récepteur, pondérée par la diffraction côté récepteur (Cf. Section 7.4.4.3).

7.4.4.1 - Calcul du terme $\Delta_{sol(S,O)}$

$$\Delta_{sol(S,O)} = -20 \log_{10} \left(1 + (10^{-A_{sol(S,O)}/20} - 1) 10^{-(\Delta_{dif(S',R)} - \Delta_{dif(S,R)})/20} \right) \quad (7.18)$$

où :

- $A_{sol(S,O)}$ est l'atténuation due à l'effet de sol entre la source S et le point de diffraction O . Ce terme se calcule comme indiqué à la Section 7.3.3 en conditions homogènes et à la Section 7.3.4 en conditions favorables, avec les hypothèses suivantes :
 - $z_r = z_{o,s}$;
 - En conditions homogènes, G_{trajet} est remplacé par G'_{trajet} dans l'équation 7.6 ;
- $\Delta_{dif(S',R)}$ est l'atténuation due à la diffraction entre la source-image S' et R , calculée comme à la Section 7.4.2 ;
- $\Delta_{dif(S,R)}$ est l'atténuation due à la diffraction entre S et R , calculée comme à la Section 7.4.2.

7.4.4.2 - Calcul du terme $\Delta_{talus(S,O)}$

$$\Delta_{talus(S,O)} = -20 \log_{10} \left(1 + (10^{-A_{talus(S,O)}/20} - 1) 10^{-(\Delta_{dif(S'',R)} - \Delta_{dif(S,R)})/20} \right) \quad (7.19)$$

où

- $A_{talus(S,O)}$ est l'atténuation due à un talus éventuel en bordure de plateforme entre la source S et le point de diffraction O . Ce terme se calcule comme indiqué à la Section 7.3.5 ;
- $\Delta_{dif(S'',R)}$ est l'atténuation due à la diffraction entre la source-image S'' relative au plan du talus et R , calculée comme à la Section 7.4.2 ;
- $\Delta_{dif(S,R)}$ est l'atténuation due à la diffraction entre S et R , calculée comme à la Section 7.4.2.

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

$$\Delta_{sol(O,R)} = -20 \log_{10} \left(1 + (10^{-A_{sol(O,R)}/20} - 1) 10^{-(\Delta_{dif(S,R')} - \Delta_{dif(S,R)})/20} \right) \quad (7.20)$$

où :

- $A_{sol(O,R)}$ est l'atténuation due à l'effet de sol entre le point de diffraction O et le récepteur R . Ce terme se calcule comme indiqué à la Section 7.3.3 en conditions homogènes et à la Section 7.3.4 en conditions favorables, avec les hypothèses suivantes :
 - $z_s = z_{o,r}$;
 - G_{trajet} est utilisé dans l'équation 7.6 ;



AVERTISSEMENT

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 qui devient $-3(1-G_{trajet})$.

- $\Delta_{dif(S,R')}$ est l'atténuation due à la diffraction entre S et le récepteur-image R' , calculée comme à la Section 7.4.2 ;
- $\Delta_{dif(S,R)}$ est l'atténuation due à la diffraction entre S et R , calculée comme à la Section 7.4.2.

7.5 - Cas des arêtes verticales

L'équation 7.11 peut être utilisée pour calculer les 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 l'équation 3.4 et l'équation 3.2. De plus A_{atm} et A_{sol} seront calculés à partir de la longueur *totale* du trajet de propagation. A_{div} reste calculé à partir de la distance directe d .

7.6 - Réflexions sur les obstacles verticaux

Les réflexions sur des obstacles verticaux sont traitées par le biais de sources images (Cf. Figure 7.8). Sont ainsi traitées les réflexions sur les façades des bâtiments et les écrans anti-bruit.

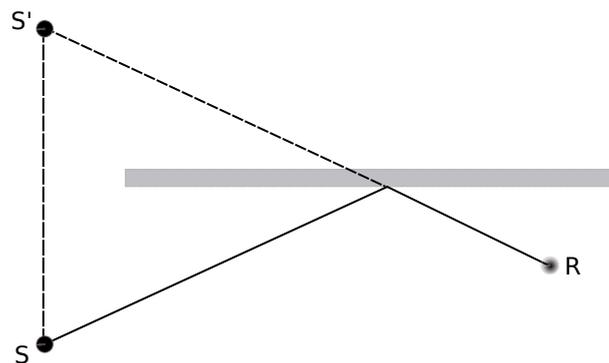


FIG. 7.8 – Réflexion spéculaire sur un obstacle traitée par la méthode des sources images (S : source, S' : source-image, R : récepteur).

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 la méthode en 3D.

Les obstacles dont au moins une dimension est inférieure à 0.5 m doivent être négligés dans le calcul de réflexion, sauf configuration particulière³.

On rappelle que les réflexions sur le sol ne sont pas traitées ici. Elle sont prises en compte dans les calculs d'atténuation due à la frontière (sol, diffraction, talus).

Si L_w est le niveau de puissance de la source S et α_r le coefficient d'absorption de la surface de l'obstacle, le niveau de puissance de la source image S' est égal à :

$$L_{w'} = L_w + 10 \log_{10}(1 - \alpha_r) \quad (7.21)$$

avec $0 \leq \alpha_r < 1$.

On applique ensuite les atténuations de propagation décrites plus haut (Cf. Section 7.1 à Section 7.4) à ce trajet (source-image,récepteur), comme pour un trajet direct.

7.7- Eléments particuliers

Les tranchées, tunnels et couvertures partielles sont traités par le biais de sources équivalentes comme décrit à l'Annexe F (Cf. [GdB1980]).

³ Un réseau de petits obstacles inscrits dans un plan et régulièrement espacés constitue un exemple de configuration particulière.

8- Bibliographie

8.1- Articles

- [Bru1996] Y. Brunet, J.P. Lagouarde, et V. Zouboff, "Estimating long-term microclimatic conditions for long-range sound propagation studies".
7th Long Range Sound Propagation Symp., Lyon, France, 1996.
- [Def1999] Jérôme Defrance et Yannick Gabillet, "A new analytical method for the calculation of outdoor noise propagation", 57, 109-127.
Applied Acoustics, Copyright © 1999 Elsevier.
- [Emb1997] T.F.W. Embleton, "Tutorial on sound propagation outdoors", 100, 31-48.
Journal of the Acoustical Society of America, Copyright © 1996 ASA.
- [Kel1962] J.B. Keller, "Geometrical Theory of Diffraction", 52, 116-130.
Journal of the Optical Society of America, Copyright © 1962 OSA.

8.2- Normes

- [EN1793p3] *NF EN 1793-3 Dispositifs de réduction du bruit du trafic routier - Méthode d'essai pour la détermination de la performance acoustique -- Partie 3 : spectre sonore normalisé de la circulation.*, Copyright © 1997 AFNOR.
- [ISO9613p1] *ISO 9613-1 Acoustique - Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre -- Partie 1 : Calcul de l'absorption atmosphérique*, Copyright © 1993 ISO.
- [ISO9613p2] *ISO 9613-2 Acoustique - Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre -- Partie 2 : Méthode générale de calcul*, Copyright © 1996 ISO.
- [NFS31085] *NF S 31-085, Acoustique - Caractérisation et mesurage du bruit dû au trafic routier -- Spécifications générales de mesurage*, Copyright © 2002 AFNOR.
- [NFS31133] *NF S 31-133 Acoustique - Bruit des infrastructures de transports terrestres -- Calcul de l'atténuation du son lors de sa propagation en milieu extérieur, incluant les effets météorologiques*, Copyright © 2007 AFNOR.
- [prNFS31110] *NF S 31-110 Acoustique - Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement -- Grandeurs fondamentales et méthodes générales d'évaluation*, révision en cours, AFNOR S30M/S30J.

8.3- Notes

- [Gau2009] B. Gauvreau, D. Ecotière, H. Lefèvre, et B. Bonhomme, "Propagation acoustique en milieu extérieur complexe - Caractérisation expérimentale *in situ* des conditions micrométéorologiques - Eléments méthodologiques et métrologiques", EG21, 68p.
Collection Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Copyright © 2009 LCPC.
- [SETRA04] Francis Besnard, *Evolution de la NMPB-Routes-96 - Calcul de la différence de marche en conditions favorables : proposition de nouvelle formule*, Copyright © 2004 SETRA.
- [SETRA07] Francis Besnard, *Liste des modifications actées pour l'évolution de la NMPB*, Copyright © 2007 SETRA.
- [Zou1998] V. Zouboff, J.C. Laporte, et Y. Brunet, "Effets des conditions météorologiques sur la propagation du bruit", Prise en compte pratique, 51.
Collection Techniques et Méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Copyright © 1998 LCPC.

8.4 - Ouvrages

- [Abq2008] *Prévision du bruit routier - Tome 1 : Calcul des émissions sonores dues au trafic routier*, Copyright © 2008 SETRA, 2008.
- [GdB1980] *Guide du bruit des transports terrestres - Prévision des niveaux sonores*, Copyright © 1980 CERTU, 317p, 2-11-083290-8.
- [Guyot1999] Gérard Guyot, *Climatologie de l'environnement*, Copyright © 1999 Dunod, 548p, 978-2-10-004441-2.
- [NMPB96] *Bruit des infrastructures routières - Méthode incluant les effets météorologiques - version expérimentale - NMPB-Routes-96*, Copyright © 1997 CERTU,CSTB,LCPC,SETRA, 98p, 2-11-089201-3.
- [Oke1987] Timothy R. Oke, *Boundary layer climates*, Copyright © 1987 Routledge, 464p, 978-0415043199.
- [Prj2001] *Bruit et études routières - Manuel du chef de projet*, Copyright © 2001 SETRA,CERTU, 236p, 2-11-090879-3.
- [Stu1988] Roland B. Stull, *An introduction to boundary layer meteorology*, Copyright © 1988 Springer, 680p, 978-9027727695.

8.5 - Rapports

- [CSTB2002] Jérôme Defrance, *Evolution de la méthode de prévision du bruit routier "NMPB-Routes-96" - Rapport final*, Copyright © 2002 CSTB.
- [CSTB2007] François Aballéa, Marine Baulac, et Jérôme Defrance, *Evolution de la méthode de prévision du bruit routier NMPB-Routes-96 - Rapport final*, Copyright © 2007 CSTB.
- [HRM2005] Paul de Vos, Margreet Beuving, et Edwin Verheijen, *Harmonised Accurate and Reliable Methods for the EU Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise - Final Technical Report*, Copyright © 2005 Consortium Harmonoise.
- [IMA2006] Margreet Beuving et Brian Hemsworth, *IMAGINE - Improved Methods for the Assessment of Generic Impact of Noise in the Environment - Final Synthesis Report*, Copyright © 2006 Consortium Imagine.
- [LRA1995] D. Delaunay et V. Zouboff, *Nouvelle méthode de prévision du bruit routier*, Copyright © 1995 Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers, Caractérisation météorologique d'un site.
- [LRS2001] Vincent Steimer, *Validation de la NMPB Routes 96 - Calculs NMPBLRS sur sites simplifiés*, Copyright © 2001 LRPC de Strasbourg.
- [LRS2003a] Guillaume Dutilleux, *NMPBLRS2 - Une programmation simplifiée de la NMPB Routes 1996 en langage Scilab*, Copyright © 2003 LRPC de Strasbourg.
- [LRS2003b] Guillaume Dutilleux, *Révision de la NMPB Routes 96 - Test de nouvelles formules avec NMPBLRS2*, Copyright © 2003 LRPC de Strasbourg.
- [LRS2004] Guillaume Dutilleux, *Révision de la NMPB-Routes-96 - Complément à l'étude 02 76 056*, Copyright © 2004 LRPC de Strasbourg.
- [LRS2005] Guillaume Dutilleux, *Révision de la NMPB-Routes-96 - Tests selon le cahier des charges du 16 août 2004 - Calculs de moyen terme*, Copyright © 2005 LRPC de Strasbourg.
- [LRS2007] Guillaume Dutilleux, *Révision de la NMPB-Routes-96 - Formules définitives et calculs de moyen terme*, Copyright © 2007 LRPC de Strasbourg.
- [LRS2008] David Ecotière, *Révision de la NMPB-Routes-96 - Calcul des occurrences météorologiques favorables à la propagation*, Copyright © 2008 LRPC de Strasbourg.
- [MEDD2006] Fabrice Junker, Benoît Gauvreau, Cora Cremezi, et Philippe Blanc-Benon, *Classification de l'influence relative des paramètres physiques affectant les conditions de propagation à grande distance - Rapport final du projet MEDD/PREDIT (2004-2006)*, Copyright © 2006 MEDD.

8.6 - Thèses

- [Def1996] Jérôme Defrance, *Méthode analytique pour le calcul de propagation de bruit extérieur*, Thèse de doctorat en acoustique, Copyright © 1996 Université du Maine, 196p.
- [Gaulin2000] David Gaulin, *Caractérisation physique des sources sonores en milieu urbain*, Thèse de doctorat en acoustique, Copyright © 2000 Université du Maine, 203p.

Annexes

A-Organigramme de la méthode de calcul

On trouvera à la Figure A.1 l'organigramme général de la méthode de calcul présentée dans ce document, pour un ensemble de routes et un récepteur. Dans cet organigramme, l'étape du calcul de l'atténuation due à la frontière que constituent le sol et les obstacles est décomposée à la Figure A.2.

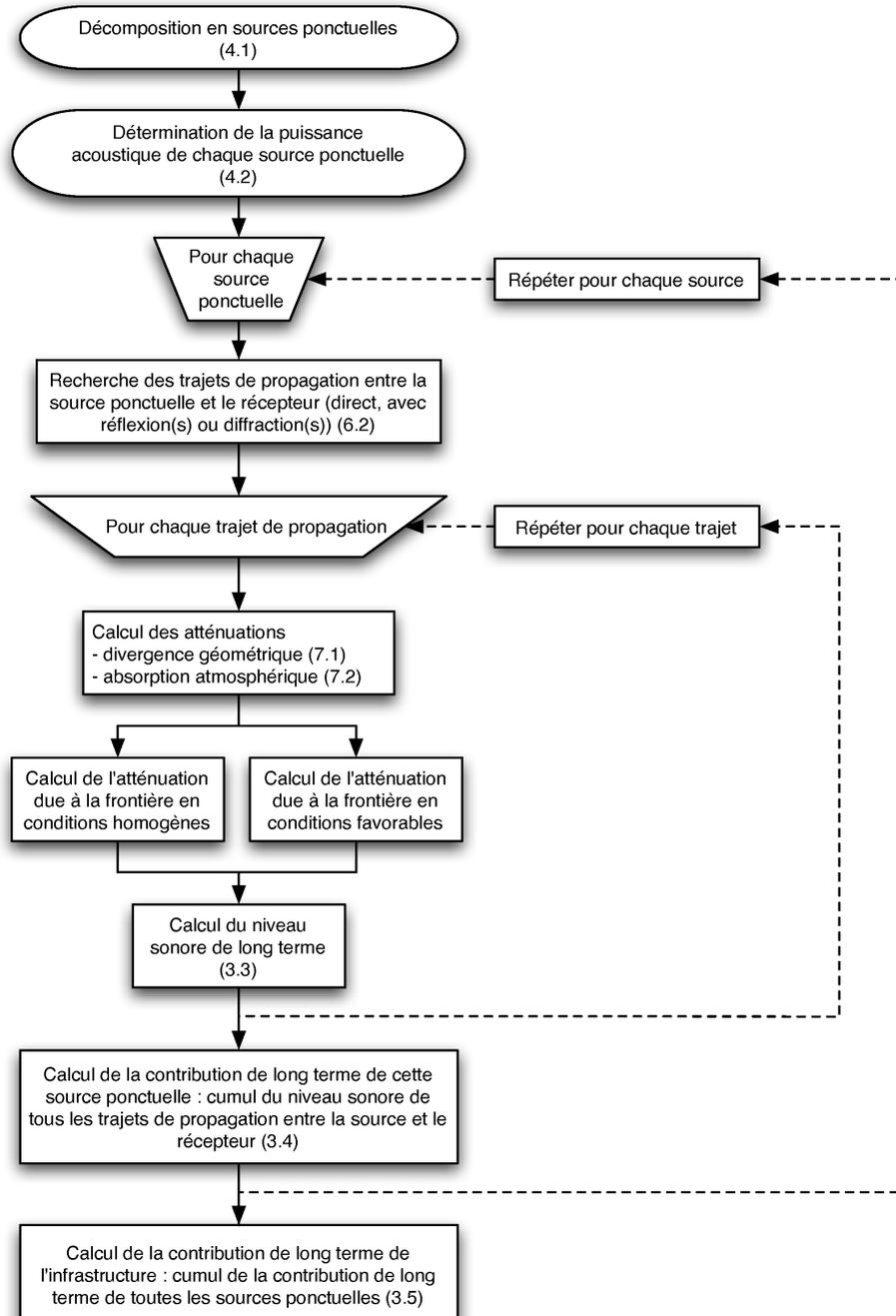


FIG. A.1 – Organigramme général de la NMPB-Routes-2008, pour un ensemble de routes et un récepteur.

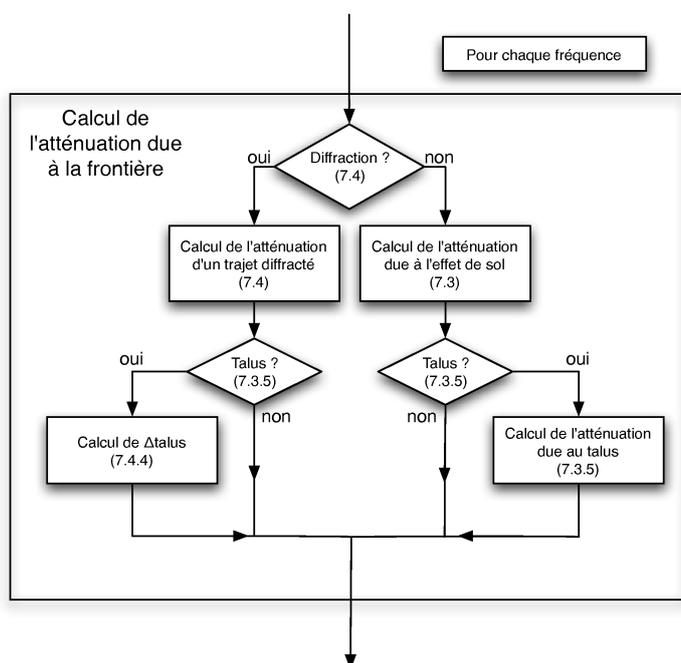


FIG. A.2 – Calcul de l'atténuation due à la frontière du domaine fluide dans la NMPB-Routes-2008. Valable en conditions homogènes et en conditions favorables.

B-Valeurs et cartes d'occurrences de conditions favorables pour la France métropolitaine

Cette annexe présente des occurrences calculées pour la France métropolitaine sous trois formes :

- deux séries de tableaux définissant, pour chaque station météorologique, les probabilités d'occurrence (en pourcentages) des conditions favorables à la propagation par secteurs de 20° de direction récepteur-source, et pour différentes périodes (6h-22h, 22h-6h) et (6h-18h, 18h-22h, 22h-6h) ;
- 41 diagrammes polaires (roses d'occurrences) qui représentent pour chaque station météorologique les probabilités d'occurrence des conditions favorables à la propagation en fonction de la direction récepteur-source pour les 4 périodes réglementaires 6h-18h, 18h-22h, 6h-18h, 22h-6h (Cf. Section B.3) ;
- 4 cartes fournissant, pour deux directions récepteur-source (0 et 90°), les lignes "d'iso-occurrence" de conditions favorables pour les périodes 6h-22h et 22h-6h. Ces cartes ont été obtenues par interpolation entre les stations les plus proches. Elles sont données à titre informatif afin d'illustrer la répartition spatiale des occurrences sur le territoire (Cf. Section B.4).

Les probabilités d'occurrence de conditions favorables fournies dans cette annexe sont exprimées en pourcentages.

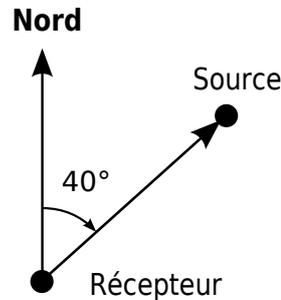


FIG. B.1 – Définition de l'angle (\vec{N}, \vec{RS}) exprimant la direction récepteur-source, exemple pour un angle de 40° .

L'angle (\vec{N}, \vec{RS}) exprimant la direction récepteur-source est noté comme pour les roses des vents : en considérant le récepteur au centre de la rose, c'est l'angle entre le vecteur récepteur-source et le nord, compté dans le sens des aiguilles d'une montre (Cf. Figure B.1). Exemples :

- la source est au nord : direction 0°
- la source est à l'est : direction 90°
- la source est au sud-ouest : direction 225°

Pour la bonne lecture des tableaux figurant dans cette annexe, il est nécessaire de préciser l'intervalle de direction récepteur-source associé à chacune des 18 classes de direction. La colonne 20° correspond à une orientation récepteur-source par rapport au nord dans l'intervalle $]10^\circ, 30^\circ]$, la colonne 40° à l'intervalle $]30^\circ, 50^\circ]$, et ainsi de suite jusqu'à la colonne 360° qui correspond à la réunion des intervalles $]0^\circ, 10^\circ]$ et $]350^\circ, 360^\circ]$.

Mathématiquement, on passe d'une direction récepteur-source ψ exprimée en degrés à la classe associée Ψ par la formule :

$$\Psi = \begin{cases} 360 & 0 < \psi \leq 10 \\ 20 h(\frac{\psi-10}{20}) & 10 < \psi \leq 360 \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

avec

$$h(x) = \begin{cases} \lfloor x \rfloor + 1 & x > \lfloor x \rfloor \\ \lfloor x \rfloor & x = \lfloor x \rfloor \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

où [] désigne la partie entière.

La valeur d'une probabilité d'occurrence pour une direction donnée correspond ainsi au pourcentage de temps pendant lequel la propagation a lieu en conditions favorables pour un bruit provenant de cette direction.

Note

Les occurrences calculées pour la période 22h-6h peuvent différer sensiblement de celles établies pour la NMPB-Routes-96. Cette différence est due au modèle de calcul utilisé qui permet en particulier de mieux prendre en compte l'influence du vent au cours de cette période. Ces résultats sont en accord avec de nombreuses observations expérimentales.

Les zones d'altitude supérieure à 500 mètres sont représentées sur les cartes en fond grisé. *Dans ces zones, les lignes d'iso-valeurs n'ont aucune validité sur le plan météorologique. Il est expressément déconseillé d'extrapoler des valeurs de probabilité d'occurrence de conditions favorables à l'intérieur de ces zones à partir de ces cartes.*

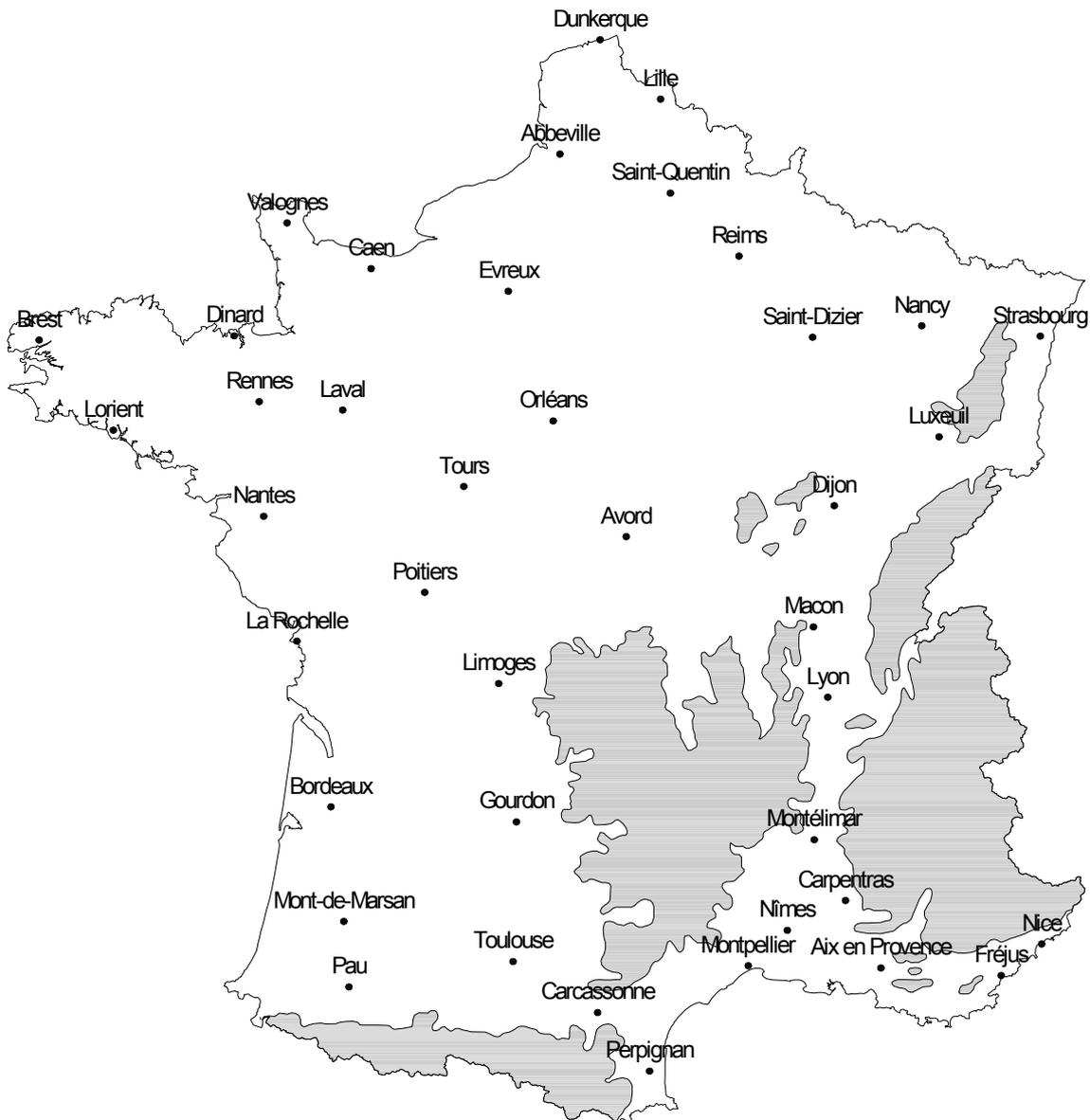


FIG. B.2 – Localités pour lesquelles les occurrences sont tabulées.

B.1- Occurrences sur 2 périodes

Direction (°)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
Abbeville	41	35	33	33	35	38	40	43	45	48	54	57	57	56	54	51	48	45
Aix-en-Provence	39	39	37	32	28	27	28	28	30	31	30	30	35	40	42	42	41	39
Avord	34	32	31	31	31	31	31	32	33	34	36	37	37	38	38	38	37	36
Bordeaux	41	38	38	38	38	37	36	36	39	43	47	48	47	47	48	49	48	45
Brest	43	40	36	34	34	34	36	40	43	47	50	53	55	55	53	50	48	46
Caen	39	34	34	34	34	34	36	40	44	50	55	56	56	56	55	54	50	45
Carcassonne	55	41	33	32	32	33	33	33	31	27	41	54	59	60	60	59	58	56
Carpentras	43	41	39	32	25	24	25	27	28	29	29	29	35	44	47	46	45	44
Dijon	43	42	40	38	35	33	34	37	39	41	42	43	45	47	47	44	43	43
Dinard	43	42	40	36	34	35	38	42	46	48	48	50	53	55	53	51	48	44
Dunkerque	38	36	34	34	35	38	41	46	49	51	54	56	56	54	50	47	44	41
Evreux	40	36	34	32	33	34	38	42	44	47	50	54	56	55	53	49	45	43
Fréjus	49	44	38	34	32	33	34	35	33	30	32	36	39	43	45	46	47	48
Gourdon	32	29	28	30	31	33	35	37	40	44	47	48	46	45	43	41	38	35
La Rochelle	47	45	41	38	37	38	36	33	32	34	38	42	46	48	47	48	49	49
Laval	38	38	37	36	35	34	35	39	43	45	47	48	49	50	51	49	46	41
Lille	37	33	31	31	32	36	41	43	47	53	57	59	59	58	55	49	46	42
Limoges	40	39	39	39	40	42	42	42	41	42	45	46	46	45	43	42	41	41
Lorient	44	41	39	38	37	36	35	35	36	42	48	51	52	53	53	53	51	48
Luxeuil	29	29	31	33	34	35	38	43	47	49	49	48	46	45	45	42	36	31
Lyon	47	47	47	44	37	36	37	37	37	36	35	35	35	40	43	43	45	46
Mâcon	45	43	38	32	30	31	32	33	33	34	36	39	45	46	45	45	46	46
Mont-de-Marsan	36	35	34	34	34	33	34	36	38	40	41	42	43	44	45	44	41	38
Montélimar	66	67	67	66	64	55	31	21	21	21	22	21	21	22	27	44	60	65
Montpellier	53	49	44	41	39	36	32	30	31	32	35	38	39	41	44	50	53	54
Nancy	38	36	34	34	36	40	44	44	45	46	48	51	51	50	46	41	39	39
Nantes	40	37	35	36	37	38	39	39	39	43	48	50	50	49	48	46	44	43
Nice	50	53	53	46	32	30	32	33	33	28	24	24	33	45	48	48	47	47
Nîmes	57	57	56	52	46	38	32	28	26	25	25	25	27	32	39	47	52	55
Orléans	40	38	38	38	37	38	40	42	44	47	50	51	52	51	50	46	43	42
Pau	38	34	33	33	32	32	31	32	35	39	43	44	44	45	46	47	46	43
Perpignan	59	58	46	32	28	27	26	24	23	23	23	32	47	55	58	59	60	60
Poitiers	39	37	35	33	32	33	36	38	41	45	48	50	51	52	50	46	44	41
Reims	35	33	32	30	30	32	34	40	47	51	52	54	56	55	54	52	46	38
Rennes	37	36	36	35	35	35	37	42	45	47	48	49	50	50	50	48	43	39
Saint Dizier	33	35	36	36	37	39	43	48	52	52	51	51	52	51	49	44	38	33
Saint Quentin	38	36	35	36	37	38	39	41	45	49	52	53	53	52	51	48	46	42
Strasbourg	38	35	32	29	28	32	35	38	41	45	47	49	51	51	47	44	43	41
Toulouse	41	29	25	28	30	31	32	33	35	41	50	54	52	52	52	51	50	48
Tours	39	38	38	38	38	39	41	42	43	45	47	49	49	49	48	44	42	40
Valognes	43	40	37	35	34	33	34	36	38	40	44	48	51	52	53	51	48	45

TAB. B.1 – 2 périodes - Jour (6h-22h).

Direction (°)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
Abbeville	43	40	40	42	44	48	52	56	58	61	64	64	61	59	55	52	48	46
Aix-en-Provence	64	72	69	62	53	47	46	44	43	42	36	33	38	42	45	48	51	56
Avord	48	46	46	46	46	46	47	49	51	52	52	51	50	50	51	51	51	50
Bordeaux	49	45	44	44	43	42	42	43	48	55	59	61	60	60	62	63	61	55
Brest	49	45	43	42	42	43	46	49	51	54	56	59	60	60	59	57	55	52
Caen	39	33	33	33	34	37	42	49	55	63	69	71	70	68	66	60	54	47
Carcassonne	67	44	34	34	36	38	39	41	47	58	69	69	68	68	66	64	63	64
Carpentras	54	65	72	68	60	58	58	57	54	49	41	34	36	39	39	39	40	45
Dijon	60	58	56	52	44	36	32	35	37	39	41	44	50	60	70	70	65	62
Dinard	42	42	41	39	38	41	48	55	60	61	60	61	63	64	61	54	48	43
Dunkerque	39	39	39	40	44	49	55	60	63	63	63	63	62	59	53	48	42	40
Evreux	49	45	42	40	40	41	46	49	51	54	58	62	64	65	63	59	55	53
Fréjus	94	89	74	56	36	22	17	15	14	15	30	52	72	84	87	88	90	92
Gourdon	36	38	46	53	56	58	61	64	67	72	75	72	60	52	47	43	40	38
La Rochelle	71	68	63	59	57	54	48	43	39	37	40	44	48	51	54	61	67	71
Laval	53	52	51	48	45	39	38	41	46	49	51	52	55	61	67	67	63	58
Lille	45	41	39	40	42	45	49	51	55	59	63	65	64	63	60	58	56	51
Limoges	64	60	58	58	58	57	55	53	48	45	47	48	48	48	50	54	60	64
Lorient	64	57	51	48	46	43	41	38	36	38	44	49	52	55	58	61	64	67
Luxeuil	51	56	59	61	61	61	63	66	65	58	50	44	40	39	40	39	40	45
Lyon	53	55	57	57	49	49	50	50	51	51	51	52	57	70	68	59	55	53
Mâcon	69	67	60	42	32	31	31	31	32	35	42	59	78	83	79	73	71	70
Mont-de-Marsan	48	46	44	42	41	41	42	46	50	52	50	51	52	53	54	53	51	49
Montélimar	79	79	79	80	83	79	54	31	24	22	22	22	23	27	44	71	80	80
Montpellier	82	77	69	61	54	47	35	26	23	27	36	45	52	59	69	79	84	84
Nancy	44	44	44	46	50	55	60	58	56	55	56	56	54	51	46	42	44	45
Nantes	55	51	48	47	47	49	49	49	47	49	52	55	56	56	56	59	60	59
Nice	92	92	90	79	31	18	15	13	13	11	12	18	54	82	86	88	89	90
Nîmes	87	88	87	84	73	52	35	27	23	20	21	25	38	56	73	80	83	86
Orléans	49	47	46	47	47	47	50	51	50	52	54	55	54	54	55	54	52	51
Pau	38	40	45	48	49	50	53	57	65	72	74	69	60	54	51	49	46	41
Perpignan	77	69	53	30	21	18	18	20	26	33	41	63	79	84	86	87	87	83
Poitiers	47	45	42	38	37	37	40	42	46	50	53	55	59	61	61	59	56	52
Reims	42	40	38	35	35	38	42	50	58	61	62	64	67	69	66	62	54	46
Rennes	48	45	43	42	40	40	43	47	51	54	56	57	59	61	62	60	55	51
Saint Dizier	42	49	51	51	53	58	64	70	73	70	61	55	53	51	48	43	37	36
Saint Quentin	49	48	48	48	48	48	47	48	51	53	55	55	54	54	53	55	55	52
Strasbourg	47	43	39	36	35	40	45	49	53	57	61	66	73	77	73	64	58	51
Toulouse	44	30	27	32	34	39	43	46	49	60	75	82	77	72	67	61	57	53
Tours	52	50	50	49	47	47	49	50	49	50	51	52	53	55	55	54	54	54
Valognes	58	52	47	43	40	38	39	42	44	47	51	55	59	63	66	65	63	61

TAB. B.2 – 2 périodes - Nuit (22h-6h).

B.2 - Occurrences sur 3 périodes

Direction (°)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
Abbeville	34	30	28	30	33	36	39	43	45	48	52	55	54	53	51	47	42	39
Aix-en-Provence	32	33	31	28	26	26	26	26	26	25	22	22	26	31	33	34	33	32
Avord	25	25	25	26	26	26	27	28	29	30	31	32	32	32	31	30	28	27
Bordeaux	33	31	32	35	35	35	34	35	39	43	45	44	43	42	42	42	40	37
Brest	39	36	33	31	31	32	35	38	42	46	49	52	53	52	49	46	42	41
Caen	33	29	28	29	29	31	34	39	45	50	55	56	55	54	52	49	44	39
Carcassonne	47	34	30	30	31	31	31	30	27	21	36	51	57	58	58	57	55	52
Carpentras	36	34	32	26	22	22	22	23	23	23	23	22	26	34	38	39	38	37
Dijon	38	37	36	33	29	26	28	32	35	37	39	40	41	42	41	37	37	38
Dinard	37	36	34	31	30	32	35	41	46	49	49	51	53	53	51	47	42	38
Dunkerque	34	32	30	30	32	35	39	44	47	50	53	54	55	52	48	43	39	37
Evreux	34	31	29	28	29	31	35	39	42	45	49	52	53	52	50	44	40	37
Fréjus	47	41	34	28	25	25	27	27	25	21	23	28	33	39	43	45	46	46
Gourdon	23	20	20	23	26	29	32	35	38	41	42	42	39	37	35	32	30	26
La Rochelle	40	39	37	36	37	37	35	33	31	33	36	39	41	41	40	40	41	41
Laval	33	33	33	32	32	31	32	36	40	43	44	45	46	46	46	44	40	36
Lille	32	29	27	27	29	33	38	41	45	51	55	58	58	56	51	44	40	36
Limoges	34	34	35	36	37	39	40	40	40	40	42	42	41	39	36	34	33	34
Lorient	41	39	38	37	36	35	34	34	34	38	44	47	48	49	49	47	45	43
Luxeuil	23	22	24	26	28	29	33	39	43	44	44	42	41	40	39	36	30	25
Lyon	41	41	40	36	28	29	32	34	34	34	33	32	31	34	35	36	38	40
Mâcon	39	36	30	24	22	26	30	31	32	32	33	35	39	39	37	38	40	40
Mont-de-Marsan	27	28	29	30	31	31	31	33	35	36	36	37	38	39	39	37	33	29
Montélimar	64	65	64	63	60	48	25	17	17	18	19	18	17	16	18	34	54	62
Montpellier	52	47	43	40	37	32	26	24	24	25	27	30	31	33	37	45	50	53
Nancy	31	30	29	29	30	35	39	40	41	44	46	48	48	46	41	35	33	32
Nantes	35	34	33	33	35	37	37	37	37	40	44	46	46	44	42	40	37	37
Nice	48	50	50	40	25	24	25	26	25	22	18	17	26	42	45	46	46	46
Nîmes	54	55	53	49	42	32	26	22	20	19	18	17	19	23	31	40	47	52
Orléans	35	34	34	34	34	34	36	38	41	45	48	49	49	48	46	41	37	36
Pau	28	26	27	28	29	29	28	29	31	35	38	38	38	39	39	39	38	34
Perpignan	54	51	39	26	24	23	22	20	20	19	20	28	43	51	55	56	56	55
Poitiers	34	33	31	29	28	30	33	35	39	43	46	47	49	49	46	41	38	35
Reims	29	28	27	25	25	28	30	36	43	48	50	52	53	52	50	48	41	33
Rennes	32	31	31	30	30	31	35	39	43	45	47	48	48	48	46	42	38	34
Saint Dizier	26	29	30	31	32	35	39	44	49	49	48	48	48	47	44	38	31	26
Saint Quentin	32	31	31	32	33	35	36	39	44	48	50	50	50	49	47	44	41	36
Strasbourg	31	29	26	23	22	25	30	34	39	42	45	46	47	45	40	36	35	34
Toulouse	34	22	17	22	26	28	31	32	33	38	46	49	47	48	47	46	45	42
Tours	34	34	34	34	35	37	39	39	40	43	45	46	46	46	43	39	35	34
Valognes	37	35	33	32	30	30	31	33	35	38	41	45	48	49	49	46	42	39

TAB. B.3 – 3 périodes - Jour (6h-18h).

Direction (°)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
Abbeville	60	51	46	44	43	43	44	43	44	49	58	64	65	64	63	64	64	64
Aix-en-Provence	64	63	57	46	37	33	34	38	45	53	57	59	68	72	72	70	68	65
Avord	63	58	54	51	49	47	46	46	47	49	52	55	57	60	63	66	68	67
Bordeaux	65	60	54	49	46	43	39	37	40	46	53	58	60	62	66	71	72	70
Brest	57	52	47	44	42	41	42	43	45	49	53	57	61	64	66	65	65	63
Caen	58	51	50	49	47	44	42	41	44	50	56	57	58	62	64	68	68	64
Carcassonne	82	62	44	38	37	37	38	40	43	45	56	63	65	65	65	65	66	71
Carpentras	67	67	64	54	36	33	36	40	44	47	50	53	66	77	77	73	70	68
Dijon	57	55	53	52	51	53	53	51	50	50	52	55	58	62	66	65	62	59
Dinard	61	60	58	52	46	44	44	45	46	45	46	48	53	59	62	63	64	62
Dunkerque	51	48	46	45	46	48	48	52	54	55	57	59	59	59	59	59	57	54
Evreux	57	53	48	46	44	45	48	49	49	51	55	59	63	65	65	62	60	59
Fréjus	58	57	53	55	58	60	62	62	61	60	65	66	62	57	52	50	50	54
Gourdon	61	57	55	53	49	45	45	46	49	56	63	69	71	70	70	68	66	64
La Rochelle	69	62	53	43	39	38	37	35	34	37	43	51	63	68	69	71	73	74
Laval	54	53	50	47	44	44	44	48	52	53	54	56	60	63	66	66	63	57
Lille	52	47	45	45	44	45	48	49	51	58	61	63	64	66	66	63	63	60
Limoges	61	55	52	51	50	50	48	46	46	49	54	57	60	63	65	67	68	66
Lorient	53	45	41	39	37	36	36	38	41	53	62	65	67	67	68	69	68	64
Luxeuil	54	54	56	56	54	54	56	60	63	66	68	67	64	63	64	63	59	55
Lyon	65	66	68	69	64	58	51	46	44	43	43	44	47	60	66	64	63	64
Mâcon	68	68	67	62	57	49	43	40	39	40	45	55	65	72	73	70	69	69
Mont-de-Marsan	64	59	51	46	43	43	43	46	50	55	59	60	61	62	64	67	68	67
Montélimar	74	73	73	74	78	76	51	35	32	31	31	32	34	40	57	77	79	75
Montpellier	56	52	48	46	46	47	48	51	53	55	60	65	65	65	66	66	62	59
Nancy	59	56	53	51	52	56	59	59	56	54	57	60	62	63	62	60	60	61
Nantes	56	47	43	42	41	42	43	45	46	52	58	62	64	65	66	67	66	64
Nice	56	61	62	62	52	49	52	55	56	51	44	45	54	56	55	53	50	50
Nîmes	64	63	63	63	62	58	52	48	47	47	48	51	54	59	66	70	69	66
Orléans	55	51	49	48	48	49	52	53	52	53	56	57	59	61	62	61	60	59
Pau	71	62	54	48	45	43	43	45	48	54	60	64	65	66	68	71	74	74
Perpignan	76	77	70	51	43	40	39	37	35	33	33	46	60	65	67	69	71	74
Poitiers	54	50	47	46	45	45	45	45	49	52	54	57	59	61	62	64	64	61
Reims	51	49	47	46	46	44	46	50	56	59	60	61	64	66	66	66	61	55
Rennes	53	53	52	51	48	45	45	49	52	53	53	53	55	59	64	66	60	55
Saint Dizier	55	53	53	52	51	52	56	59	62	61	61	62	64	65	66	64	59	56
Saint Quentin	54	51	49	48	47	48	48	48	49	53	57	60	61	61	61	62	61	58
Strasbourg	58	54	51	49	50	53	52	48	49	52	56	60	65	70	71	70	67	63
Toulouse	63	52	48	49	43	39	38	38	40	49	61	69	68	67	67	68	67	67
Tours	56	52	50	48	46	47	49	50	51	53	55	58	60	61	62	62	62	59
Valognes	61	54	49	45	44	43	44	45	46	48	53	58	61	64	65	65	65	64

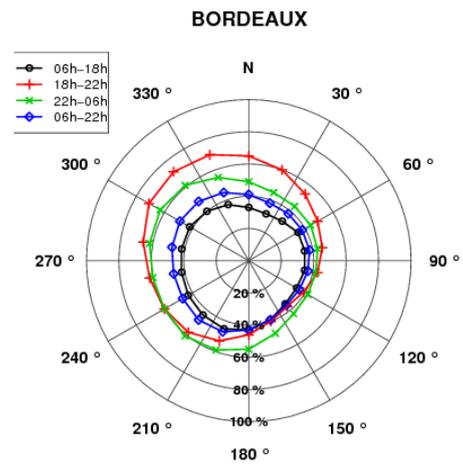
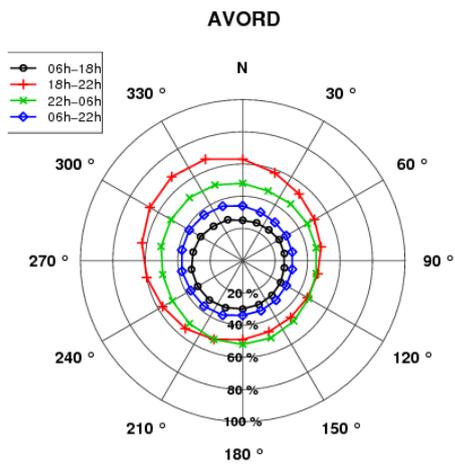
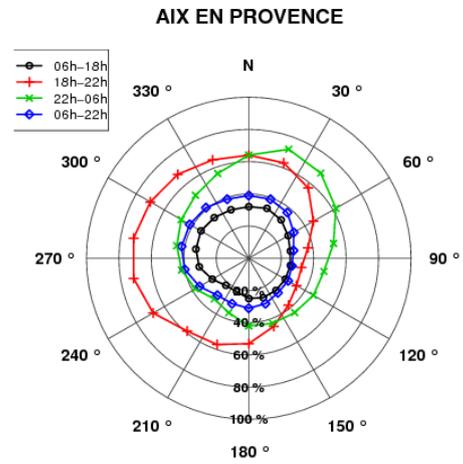
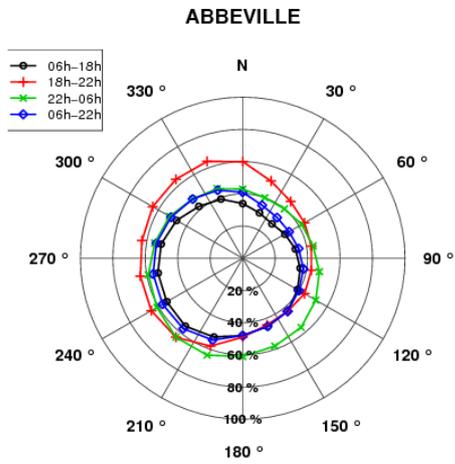
TAB. B.4 – 3 périodes - Soir (18h-22h).

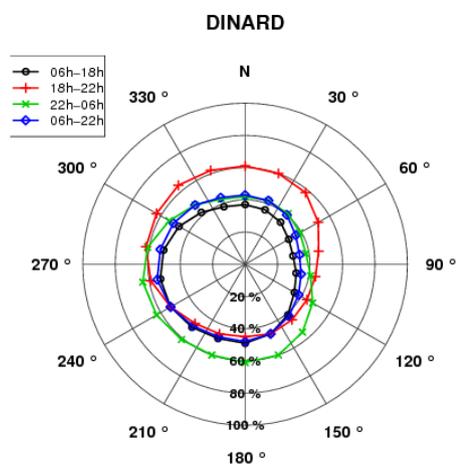
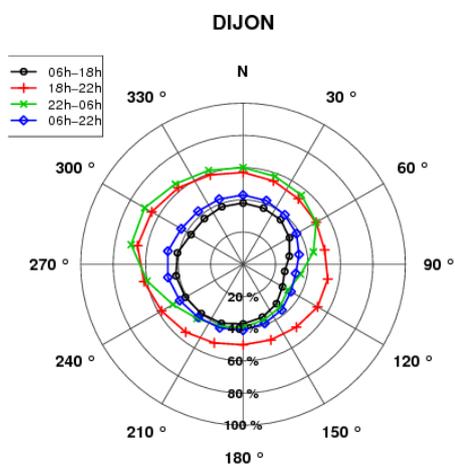
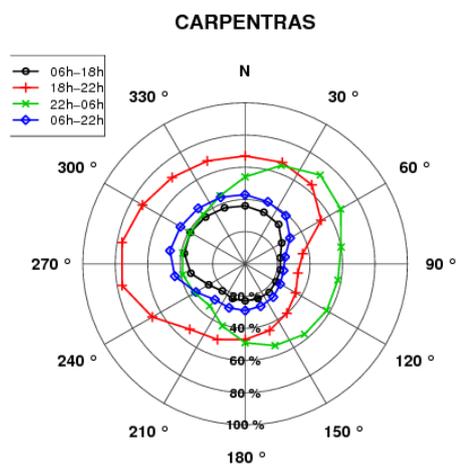
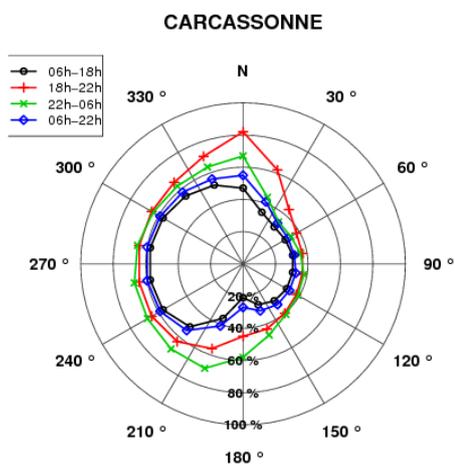
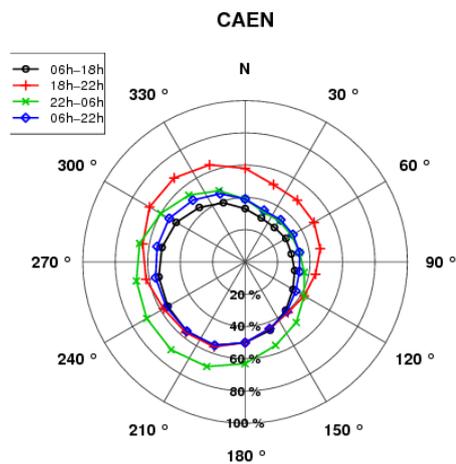
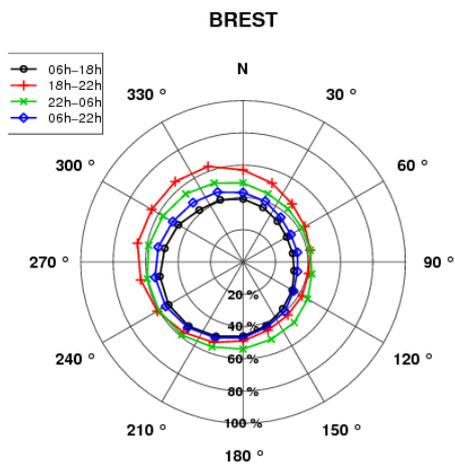
Direction (°)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
Abbeville	43	40	40	42	44	48	52	56	58	61	64	64	61	59	55	52	48	46
Aix-en-Provence	64	72	69	62	53	47	46	44	43	42	36	33	38	42	45	48	51	56
Avord	48	46	46	46	46	46	47	49	51	52	52	51	50	50	51	51	51	50
Bordeaux	49	45	44	44	43	42	42	43	48	55	59	61	60	60	62	63	61	55
Brest	49	45	43	42	42	43	46	49	51	54	56	59	60	60	59	57	55	52
Caen	39	33	33	33	34	37	42	49	55	63	69	71	70	68	66	60	54	47
Carcassonne	67	44	34	34	36	38	39	41	47	58	69	69	68	68	66	64	63	64
Carpentras	54	65	72	68	60	58	58	57	54	49	41	34	36	39	39	39	40	45
Dijon	60	58	56	52	44	36	32	35	37	39	41	44	50	60	70	70	65	62
Dinard	42	42	41	39	38	41	48	55	60	61	60	61	63	64	61	54	48	43
Dunkerque	39	39	39	40	44	49	55	60	63	63	63	63	62	59	53	48	42	40
Evreux	49	45	42	40	40	41	46	49	51	54	58	62	64	65	63	59	55	53
Fréjus	94	89	74	56	36	22	17	15	14	15	30	52	72	84	87	88	90	92
Gourdon	36	38	46	53	56	58	61	64	67	72	75	72	60	52	47	43	40	38
La Rochelle	71	68	63	59	57	54	48	43	39	37	40	44	48	51	54	61	67	71
Laval	53	52	51	48	45	39	38	41	46	49	51	52	55	61	67	67	63	58
Lille	45	41	39	40	42	45	49	51	55	59	63	65	64	63	60	58	56	51
Limoges	64	60	58	58	58	57	55	53	48	45	47	48	48	48	50	54	60	64
Lorient	64	57	51	48	46	43	41	38	36	38	44	49	52	55	58	61	64	67
Luxeuil	51	56	59	61	61	61	63	66	65	58	50	44	40	39	40	39	40	45
Lyon	53	55	57	57	49	49	50	50	51	51	51	52	57	70	68	59	55	53
Mâcon	69	67	60	42	32	31	31	31	32	35	42	59	78	83	79	73	71	70
Mont-de-Marsan	48	46	44	42	41	41	42	46	50	52	50	51	52	53	54	53	51	49
Montélimar	79	79	79	80	83	79	54	31	24	22	22	22	23	27	44	71	80	80
Montpellier	82	77	69	61	54	47	35	26	23	27	36	45	52	59	69	79	84	84
Nancy	44	44	44	46	50	55	60	58	56	55	56	56	54	51	46	42	44	45
Nantes	55	51	48	47	47	49	49	49	47	49	52	55	56	56	56	59	60	59
Nice	92	92	90	79	31	18	15	13	13	11	12	18	54	82	86	88	89	90
Nîmes	87	88	87	84	73	52	35	27	23	20	21	25	38	56	73	80	83	86
Orléans	49	47	46	47	47	47	50	51	50	52	54	55	54	54	55	54	52	51
Pau	38	40	45	48	49	50	53	57	65	72	74	69	60	54	51	49	46	41
Perpignan	77	69	53	30	21	18	18	20	26	33	41	63	79	84	86	87	87	83
Poitiers	47	45	42	38	37	37	40	42	46	50	53	55	59	61	61	59	56	52
Reims	42	40	38	35	35	38	42	50	58	61	62	64	67	69	66	62	54	46
Rennes	48	45	43	42	40	40	43	47	51	54	56	57	59	61	62	60	55	51
Saint Dizier	42	49	51	51	53	58	64	70	73	70	61	55	53	51	48	43	37	36
Saint Quentin	49	48	48	48	48	48	47	48	51	53	55	55	54	54	53	55	55	52
Strasbourg	47	43	39	36	35	40	45	49	53	57	61	66	73	77	73	64	58	51
Toulouse	44	30	27	32	34	39	43	46	49	60	75	82	77	72	67	61	57	53
Tours	52	50	50	49	47	47	49	50	49	50	51	52	53	55	55	54	54	54
Valognes	58	52	47	43	40	38	39	42	44	47	51	55	59	63	66	65	63	61

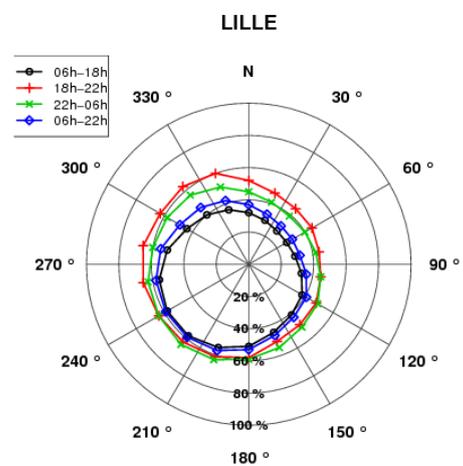
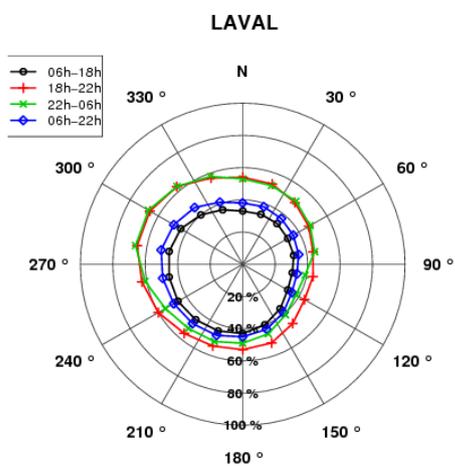
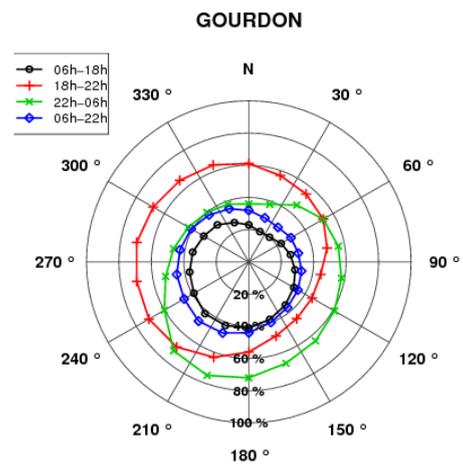
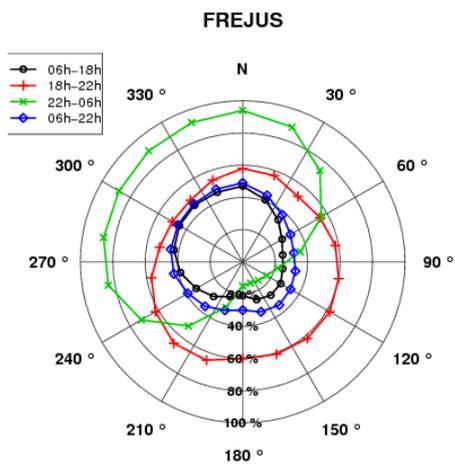
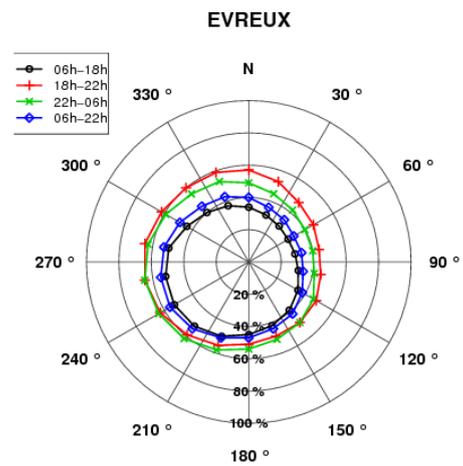
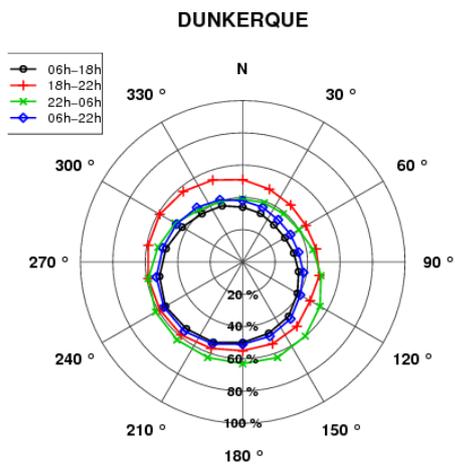
TAB. B.5 – 3 périodes - Nuit (22h-6h)¹.

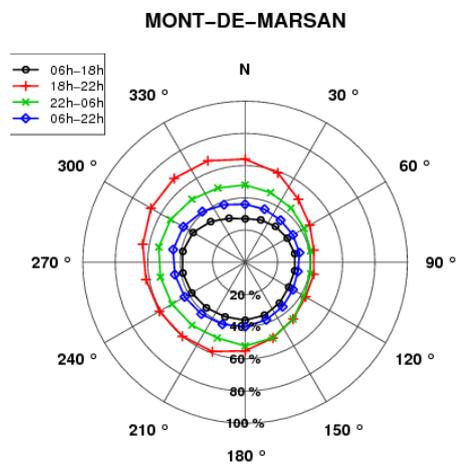
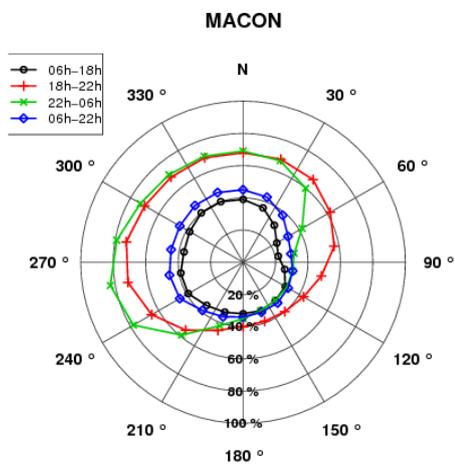
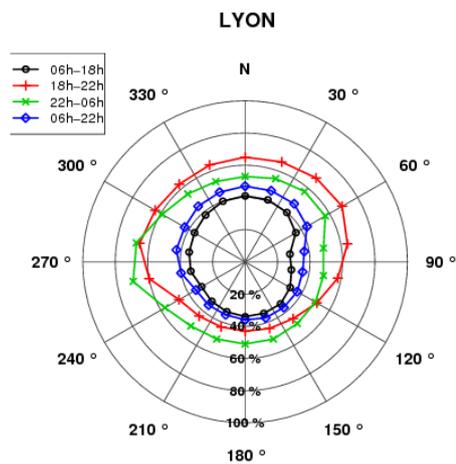
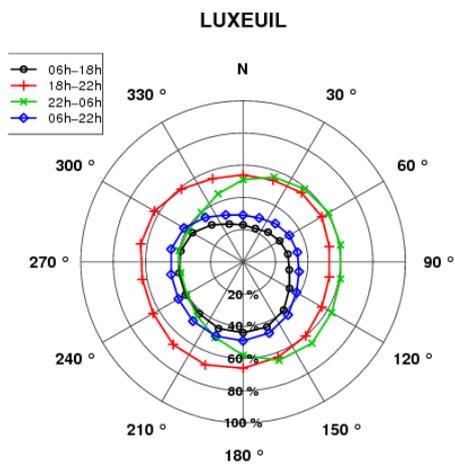
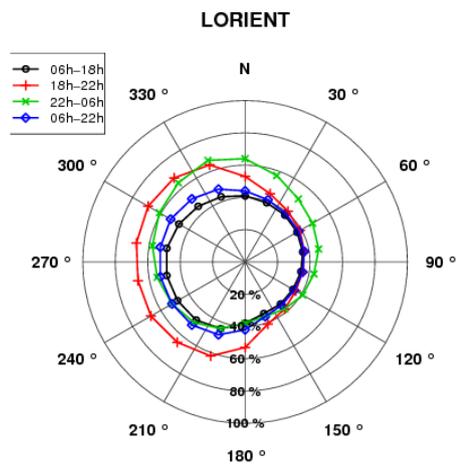
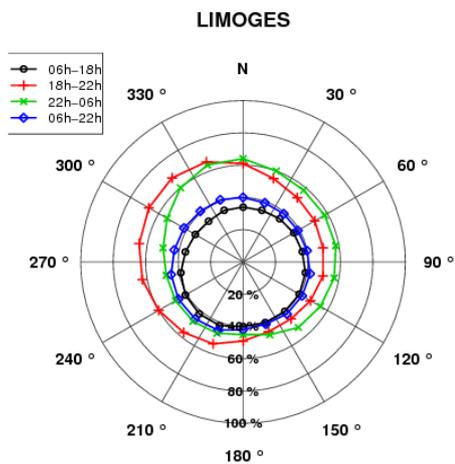
¹ Le Tableau B.5 est strictement identique au Tableau B.2. Il est reproduit ici pour la commodité de la lecture.

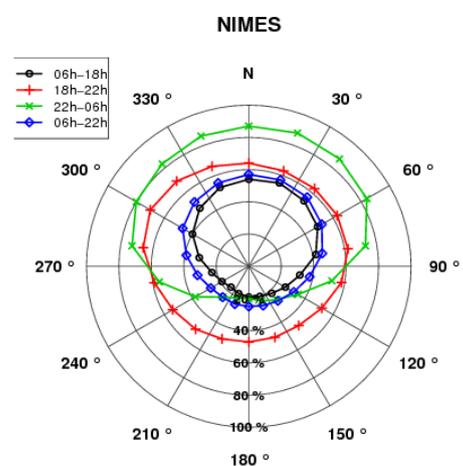
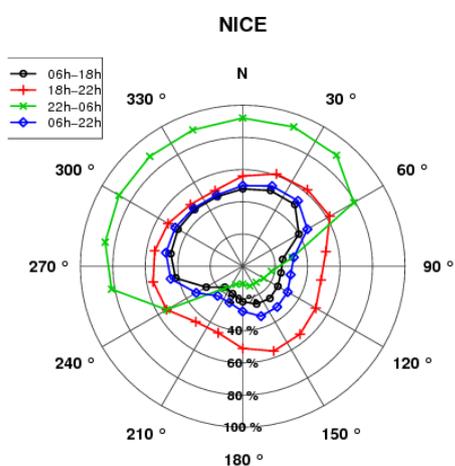
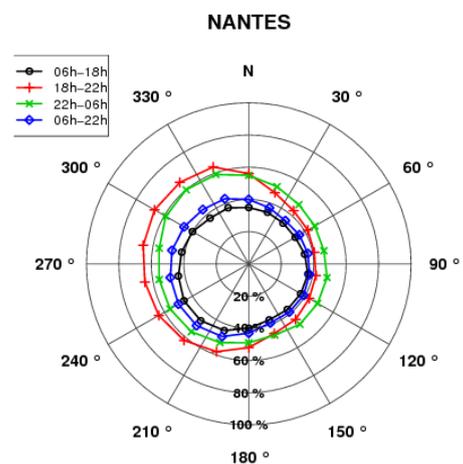
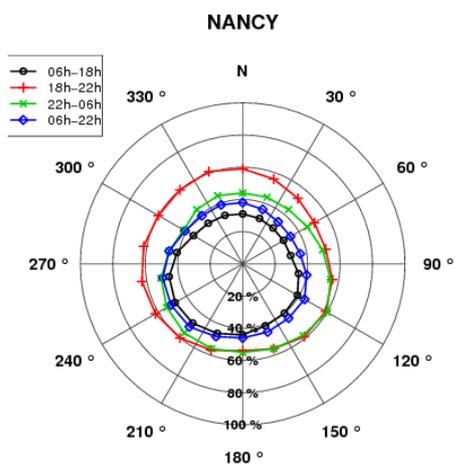
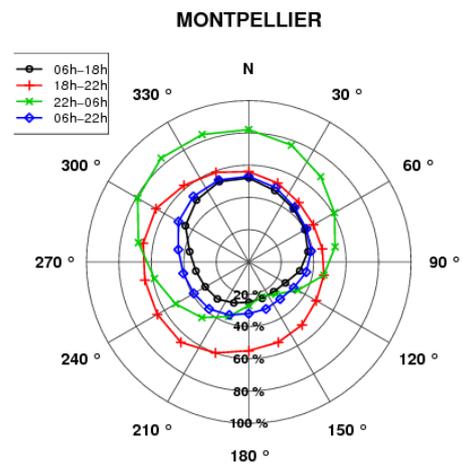
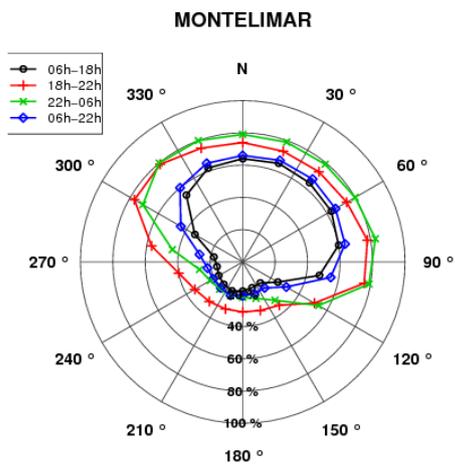
B.3 - Roses des occurrences

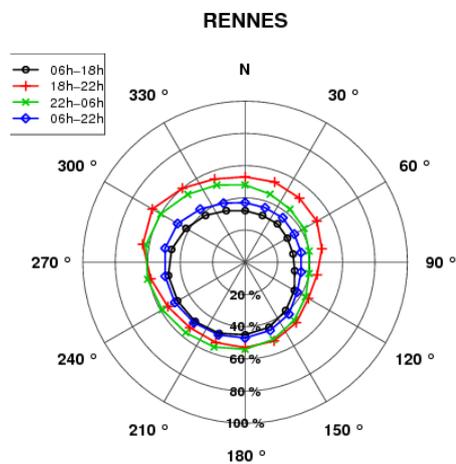
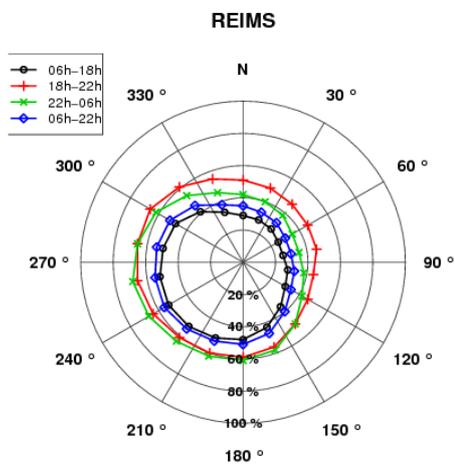
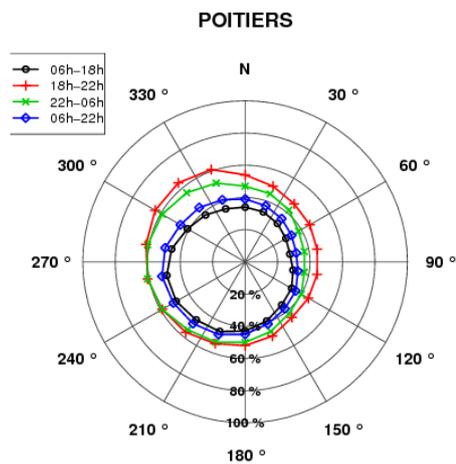
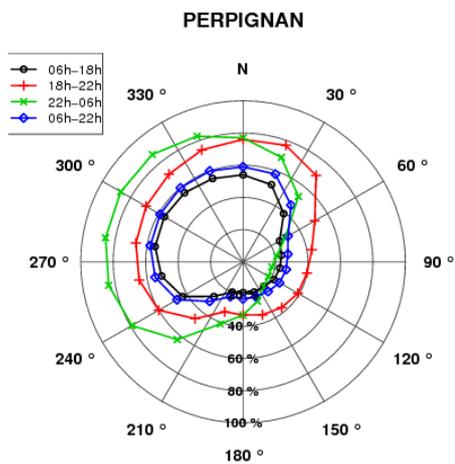
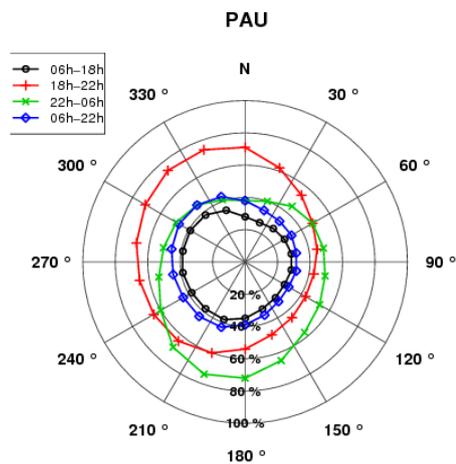
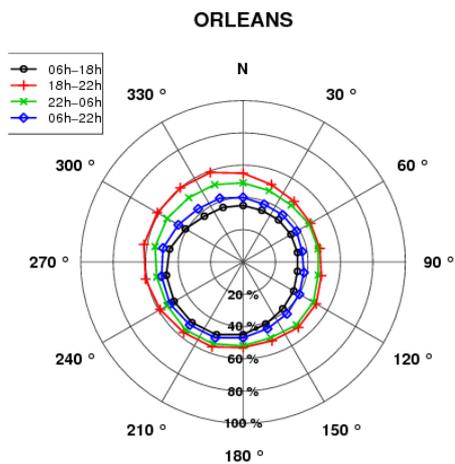


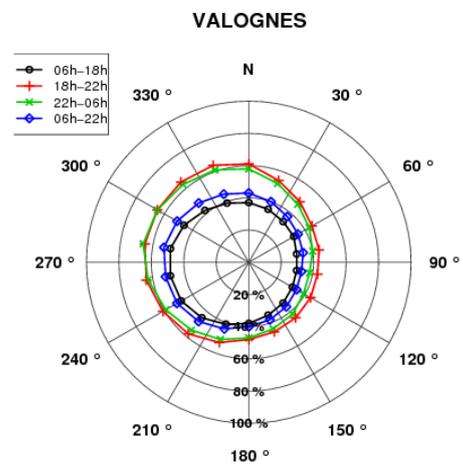
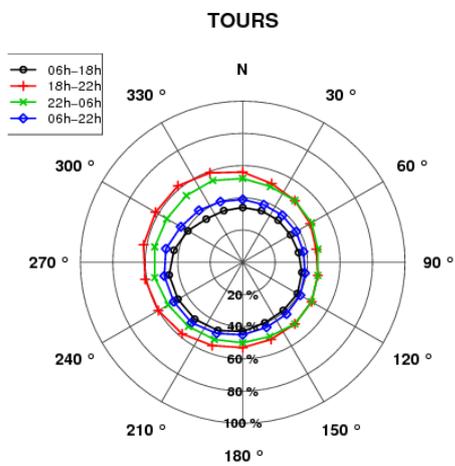
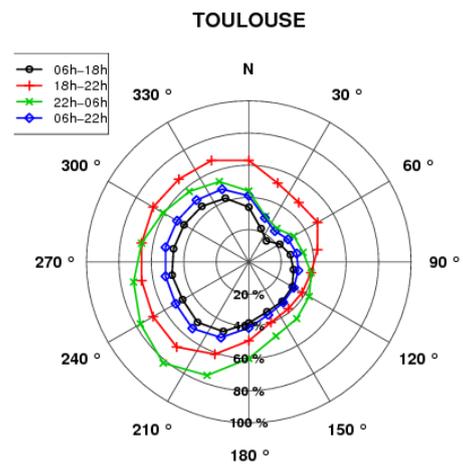
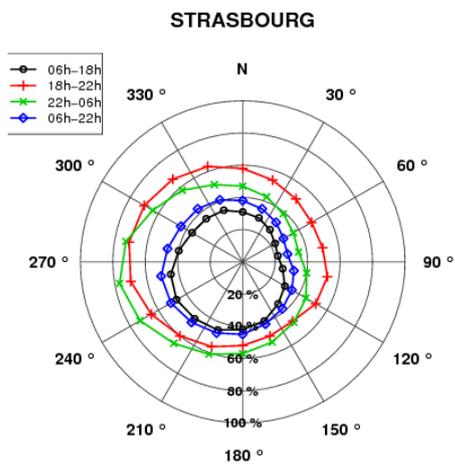
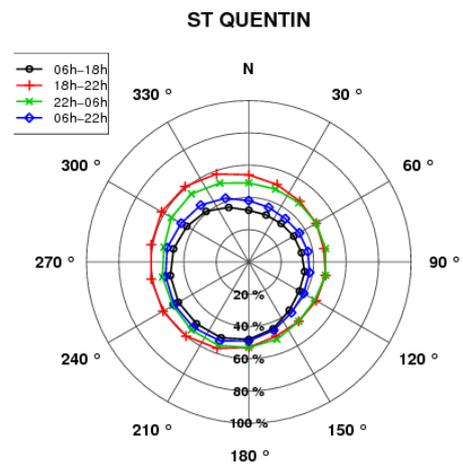
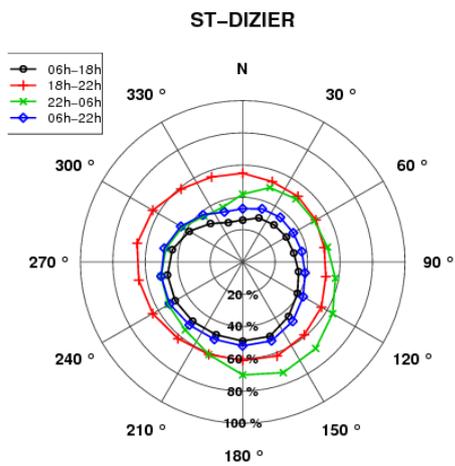












B.4 - Cartes

Les cartes présentées dans cette partie ont été obtenues par krigeage en supposant un modèle de variogramme linéaire.

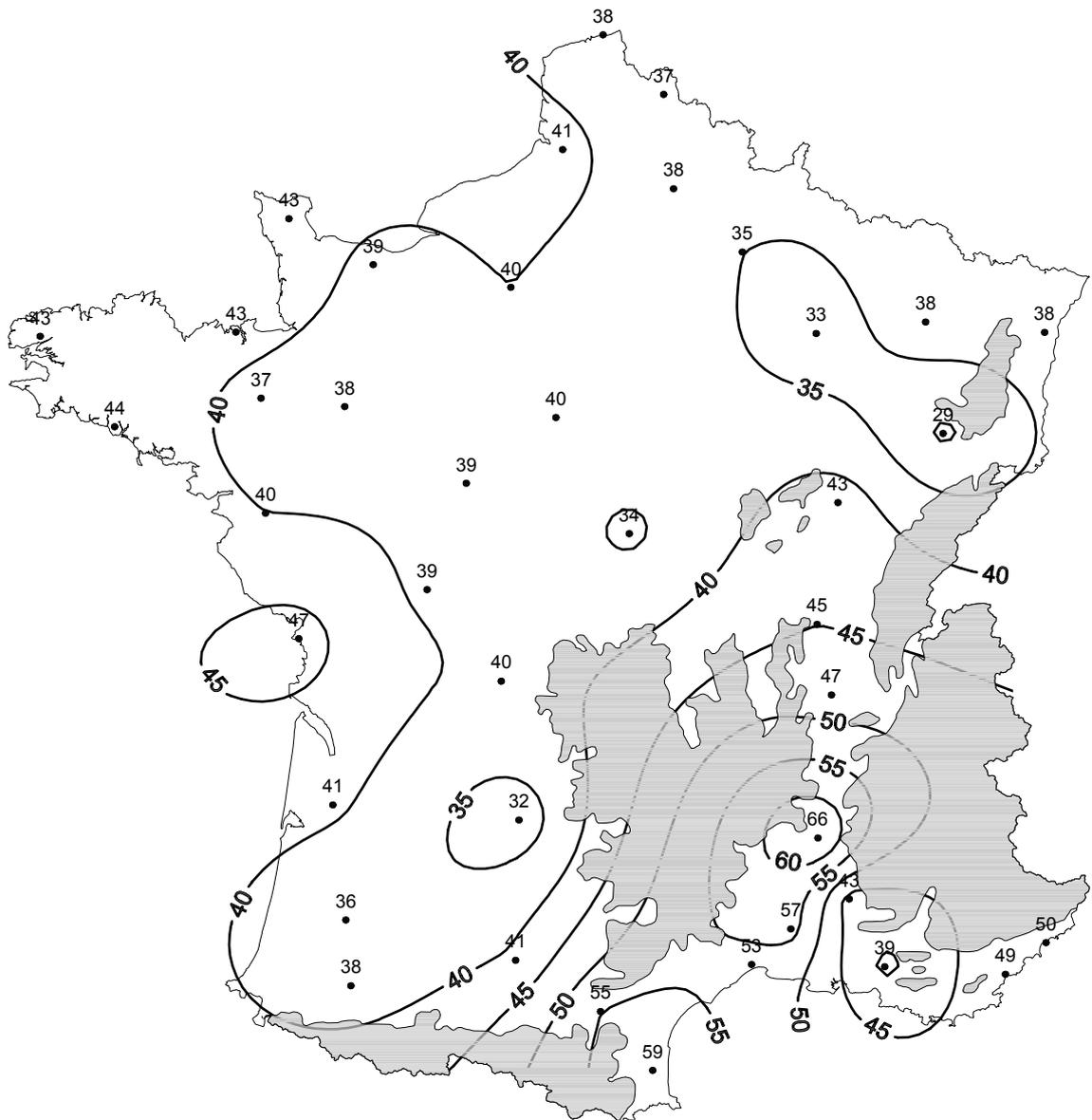


FIG. B.3 – Occurrences pour la période 6h-22h dans la direction 0°.

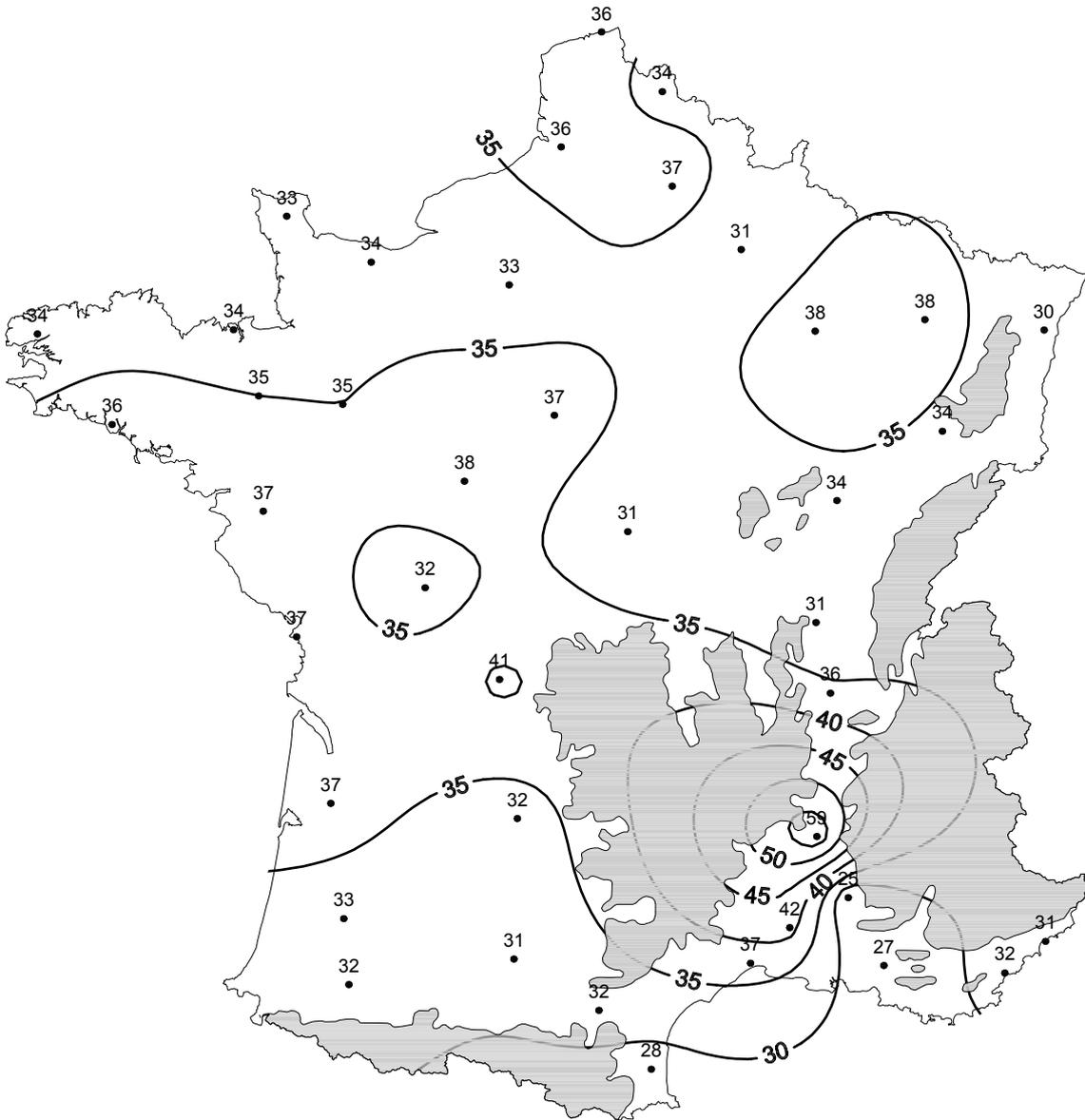


FIG. B.4 – Occurrences pour la période 6h-22h dans la direction 90°.

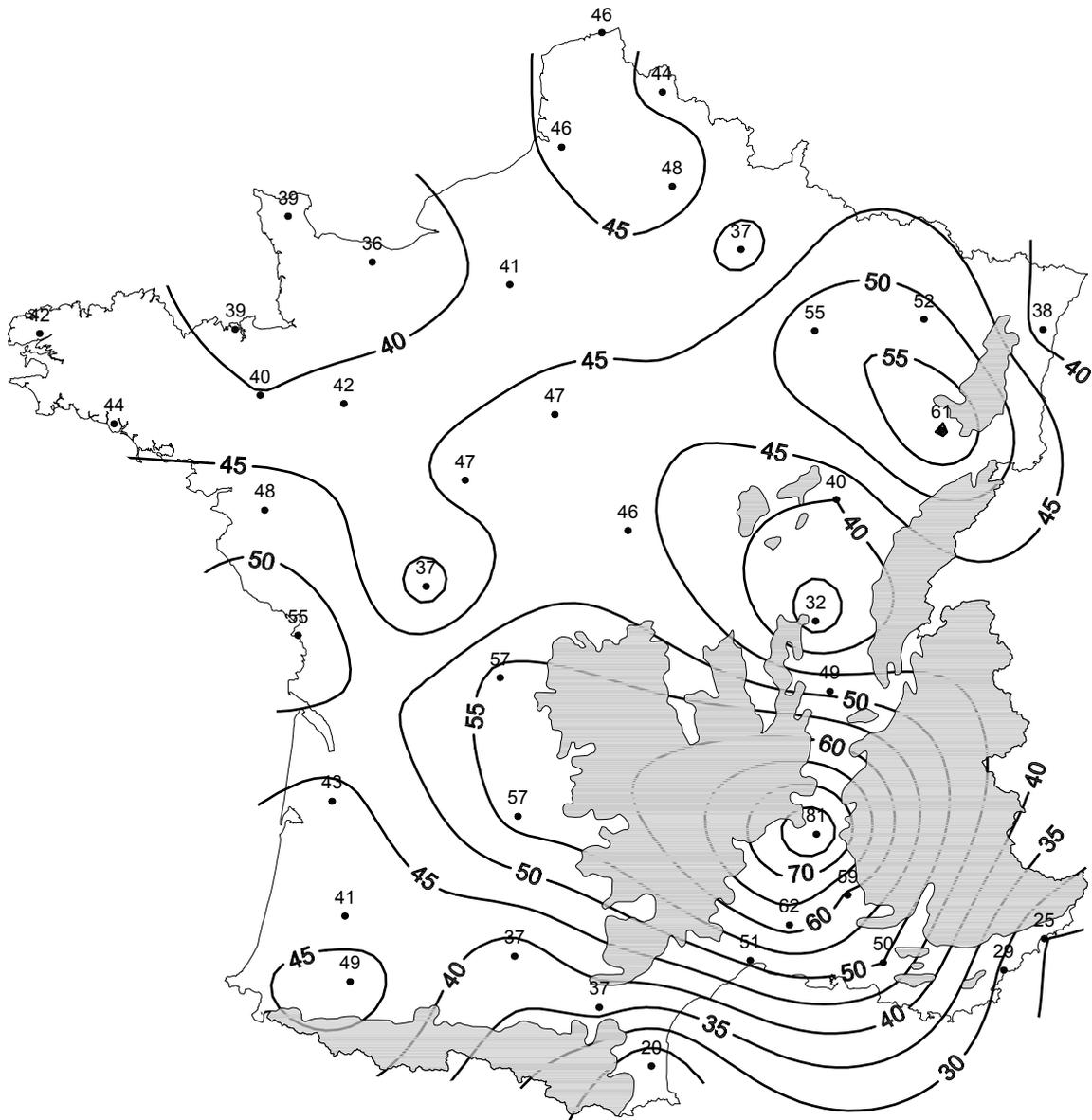


FIG. B.6 – Occurrences pour la période 22h-6h dans la direction 90°.

C-Météorologie et propagation du son

L'objet de cette annexe est de présenter brièvement les phénomènes micrométéorologiques ayant des effets sur la propagation acoustique en milieu extérieur hétérogène. Le lecteur trouvera un exposé plus détaillé dans [MEDD2006].

C.1-Absorption atmosphérique

L'atténuation des ondes sonores peut résulter de divers processus liés aux caractéristiques des fluides dans lesquels elles se propagent. Ces processus dissipatifs apparaissent le plus souvent dans les fluides complexes, non homogènes ou polyphasiques, mais également dans les fluides simples, en particulier dans les gaz. Leur importance a été définitivement établie dans de nombreuses situations réelles. Dans le cas des fluides "simples" qui ne sont pas le siège de phénomènes particuliers tels que la cavitation, la dissipation de l'énergie acoustique résulte essentiellement de trois processus, respectivement liés à la viscosité, la conduction thermique et la relaxation moléculaire. Dans la propagation en milieu atmosphérique, le phénomène de relaxation moléculaire est prépondérant. Il s'agit du retard à l'établissement d'un équilibre, dû à une sollicitation extérieure (physique, thermique, chimique...) et qui n'apparaît pas instantanément. Ce phénomène, peut être important dans l'air lors de la propagation à longue distance ou dans certaines circonstances. Les retards sont affectés de manière significative par la concentration en molécules polyatomiques, en particulier en molécules de vapeur d'eau, ou en termes plus communs par l'humidité relative. Cet effet est directement proportionnel à la pression atmosphérique et à l'hygrométrie. La norme ISO 9613-1 donne une méthode de calcul qui permet de quantifier ces effets. L'atténuation provoquée par l'absorption atmosphérique est une fonction de deux fréquences de relaxation f_{rO} et f_{rN} , respectivement celle de l'oxygène et de l'azote. Les valeurs de f_{rO} et f_{rN} (en Hz) dépendent de la pression atmosphérique, de la température et de l'hygrométrie ambiante ; elles conduisent à la valeur du coefficient d'atténuation α , exprimé en dB/m pour chaque fréquence [ISO9613p1].

Certains auteurs ont montré qu'au-delà de 500 Hz environ, la conversion d'une fraction de l'énergie sonore en modes internes de vibration et de rotation (absorption moléculaire) était essentiellement déterminée par la relaxation des molécules d'oxygène de l'air humide. Quantitativement, cet effet s'élève selon eux à au moins 2 dB de perte par kilomètre et croît très rapidement avec la fréquence ; il peut être ainsi un facteur non négligeable lors de la propagation sonore en milieu extérieur. Au-dessous de 500 Hz, le mécanisme prépondérant de l'absorption moléculaire est la relaxation des molécules d'azote de l'air humide. L'absorption énergétique est considérablement moindre que celle engendrée par la relaxation des molécules d'oxygène.

L'absorption atmosphérique doit donc être prise en compte lors de la propagation des ondes sonores. Cependant, cette prise en compte peut être implicite en considérant les niveaux de pression sonore *relatifs* au champ libre, ou *atténuation excédentaire*.

C.2-Effets de vent et de température

La propagation d'une onde acoustique est également sensiblement affectée par les caractéristiques du milieu : les conditions atmosphériques (vent, température, hygrométrie). Considérant les échelles spatio-temporelles mises en jeu dans le domaine de l'acoustique environnementale (*i.e.* en milieu extérieur), il convient d'appréhender ces phénomènes physiques à travers les théories de la micrométéorologie plutôt que celle de la météorologie à l'échelle régionale. On se place ainsi dans le cadre des lois thermiques (transfert de chaleur) et aérodynamiques (profils de vent) telles qu'elles se décrivent à très basse altitude (moins de 100m). Les phénomènes qui apparaissent à cette altitude présentent donc une interaction très forte avec le sol (topographie, température de surface et de sous-sol, hygrométrie, cultures, forêts, obstacles, bâti, *etc.*). De plus, ils évoluent rapidement dans le temps et dans l'espace, ce qui rend leur description analytique et leur modélisation numérique complexe.

Les facteurs thermiques et aérodynamiques qui influent sur la propagation sont les suivants :

- **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.

Par analogie avec les lois de l'optique, l'effet des conditions atmosphériques sur la propagation acoustique peut être décrit à travers l'expression de l'indice acoustique n du milieu de propagation. Si l'on se place dans une coupe verticale, cet indice est supposé varier avec l'altitude z et avec la distance source-récepteur r , tel que :

$$n(r, z) = \frac{c(r, z)}{c_0} = \langle n(r, z) \rangle + \mu(r, z) \quad (\text{C.1})$$

où c est la célérité effective de l'onde sonore dans le milieu traversé et c_0 la vitesse de référence, qui vaut typiquement 340 m/s.

Ainsi, on peut distinguer deux phénomènes influant sur la propagation acoustique : (i) la réfraction et (ii) la turbulence atmosphérique. Ces phénomènes sont respectivement liés aux parties (i) déterministe $\langle n \rangle$ et (ii) stochastique μ de l'indice du milieu de propagation. En pratique, ces phénomènes de réfraction et de turbulence successivement décrits *infra* co-existent et interagissent, ce qui conduit à des conditions de propagation complexes, ainsi qu'à une très large *dispersion* des niveaux sonores rencontrés *in situ*, tous paramètres identiques par ailleurs (topographie, nature de sol, géométrie source-récepteur, etc.).

C.2.1 - Réfraction

La partie *moyenne* $\langle n \rangle$ de l'indice du milieu rend compte de la *réfraction* des ondes sonores, induite par la *stratification horizontale* de l'atmosphère. Les profils moyens de célérité du son sont calculés à partir des valeurs moyennes des variables micrométéorologiques. Les échelles de temps impliquées sont de l'ordre de la minute, voire de l'heure. Ces données sont acquises *in situ* via des mâts équipés de capteurs à plusieurs hauteurs, où à l'aide d'instrumentation spécifique à une seule hauteur, laquelle nécessite un traitement des données adapté qui est fondé sur la théorie de la similitude de Monin-Obukhov. Ces méthodes sont décrites dans [Gau2009].

Typiquement, on calcule la moyenne des valeurs des profils de célérité du son sur des échantillons temporels de l'ordre de 10 minutes, pendant lesquels les profils moyens de vent et de température sont supposés relativement constants, ou "stationnaires". Cependant, cette hypothèse de stationnarité est rarement vérifiée. Les valeurs des paramètres micrométéorologiques, en particulier celles du vent - vitesse et direction -, fluctuent de manière significative pendant cette période en raison de phénomènes de circulation à grande échelle dans la troposphère. Ce phénomène, appelé "intermittence", peut conduire à des "événements aérodynamiques" (*e.g.* bourrasques de vent) qui ne sont pas représentatifs de la moyenne de l'échantillon considéré, et par suite à des modifications sensibles des niveaux sonores pendant ces événements intermittents. Eu égard aux échelles de temps et d'espace concernées, cette "intermittence" (ou "turbulence" au sens du météorologue), ne doit pas être confondue avec la "turbulence atmosphérique", au sens de l'acousticien, dont les effets sont décrits à la Section C.2.2.

A chaque "strate" correspondent donc des conditions "moyennes" (vent, température, hygrométrie), qui conduisent à autant de valeurs respectives pour la célérité effective moyenne du son, dont on donne ci-après son expression $c(z)$, dans le cas où l'on considère un terrain plan et dégagé, conduisant à négliger son évolution avec la distance (dépendance en r) :

$$\langle c(z) \rangle = \sqrt{\gamma R T(z)} + \langle u(z) \rangle \cos \theta = c_0 \sqrt{\frac{\langle T(z) \rangle}{T_0}} + \langle u(z) \rangle \cos \theta \quad (\text{C.2})$$

où $\gamma = \frac{C_p}{C_v} \simeq 1.4$ est le rapport adimensionnel des chaleurs spécifiques, R est la constante spécifique de l'air sec ($R=287 \text{ J}/(\text{kg K})$), $c_0 = \sqrt{\gamma R T_0}$ la valeur de référence de la célérité du son dans ces mêmes conditions, sans vent. T_0 est la température moyenne de l'air pour l'échantillon temporel considéré (en Kelvin). Les grandeurs $\langle T(z) \rangle$ et $\langle u(z) \rangle$ sont respectivement la température moyenne (en K) et le vent moyen à l'altitude z , et $\cos \theta$ est la projection de la direction du vent sur la direction de propagation acoustique.

Le gradient vertical moyen de la célérité effective du son $Grad_c$ s'exprime alors par :

$$Grad_c = \frac{\partial \langle c(z) \rangle}{\partial z} = \frac{K}{\sqrt{T(z)}} \frac{\partial \langle T(z) \rangle}{\partial z} + \frac{\partial \langle u(z) \rangle}{\partial z} \cos \theta \quad (C.3)$$

où la constante K peut s'exprimer par :

$$K = \frac{1}{2} \frac{c_0}{\sqrt{T_0}} = \frac{1}{2} \sqrt{\gamma R} \simeq 10 \text{ m.s}^{-1} . K^{-1/2} \quad (C.4)$$

On peut linéariser l'expression de $\langle c(z) \rangle$, par un développement limité au premier ordre, qui s'écrit alors :

$$\langle c(z) \rangle \simeq c_0 + \frac{1}{2} \frac{\gamma R}{c_0} (T(z) - T_0) + \langle u(z) \rangle \cos \theta \quad (C.5)$$

On obtient alors une expression plus simple :

$$Grad_c = \frac{\partial \langle c(z) \rangle}{\partial z} \simeq \frac{1}{2} \frac{\gamma R}{c_0} \frac{\partial \langle T(z) \rangle}{\partial z} + \frac{\partial \langle u(z) \rangle}{\partial z} \cos \theta \quad (C.6)$$

Le profil moyen de célérité du son dépend ainsi des profils moyens de vent et de température. Ce profil de célérité peut être décrit de manière analytique, selon qu'il suit une loi linéaire ("lin"), logarithmique ("log"), hybrides ("log-lin") ou autre. La Figure C.1 montre les différences qui peuvent exister entre de tels profils de célérité.

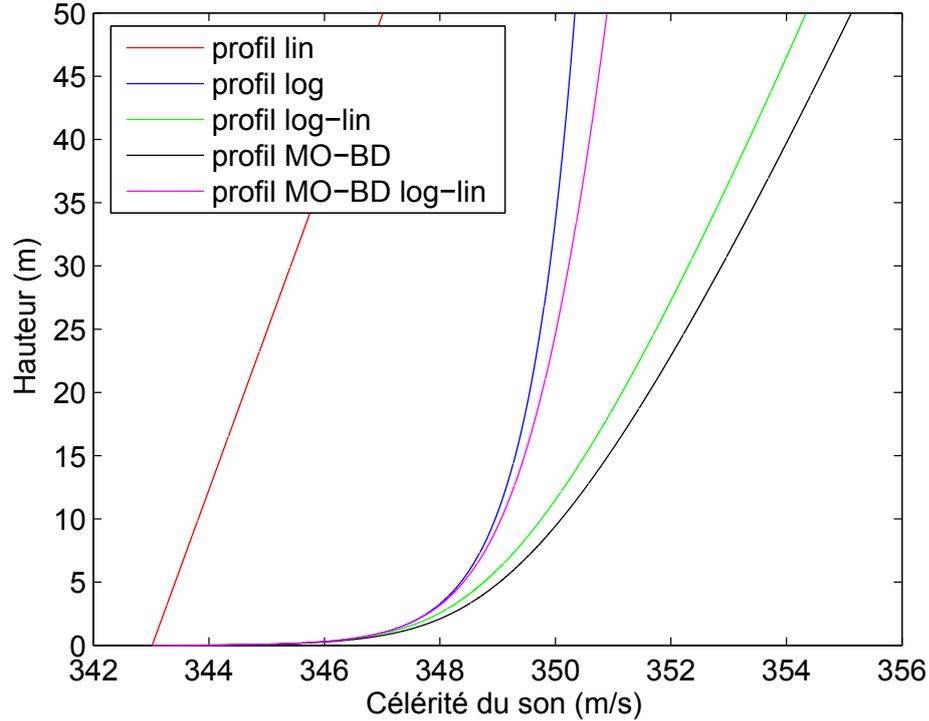


FIG. C.1 – comparaison des profils de célérité du son du type "log", "lin", "log-lin", Monin-Obukhov (Businger-Dyer) et Monin-Obukhov "log-lin" (Businger-Dyer) [Stu1988] en conditions très favorables U4T5, *i.e.* vent moyen portant Et atmosphère très stable (*Cf.* Section D.3.2.1).

Les profils "log" présentent ainsi l'avantage de traduire le très fort gradient vertical de célérité du son au voisinage immédiat du sol, mais ne rendent pas bien compte de l'évolution plus modérée avec l'altitude au-delà d'une certaine hauteur. A l'inverse, les profils "lin" minimisent les effets au voisinage du sol et ne sont donc pas représentatifs de la réalité lorsque l'on se place à très basse altitude.

Un bon compromis consiste donc à utiliser des profils hybrides du type “log-lin”, exprimés à travers les paramètres a_{log} et b_{lin} qui apparaissent dans l’expression analytique du profil vertical de la célérité effective du son :

$$\langle c(z) \rangle = c_0 + a_{log} \ln \left(1 + \frac{z}{z_0} \right) + b_{lin} z \quad (\text{C.7})$$

où z_0 est le paramètre de rugosité. La valeur de ce paramètre est de l’ordre du 10^{ième} de la hauteur moyenne des éléments de rugosité. Les valeurs typiques de z_0 s’étendent de 0.01 m pour de l’herbe rase à plusieurs mètres en milieu urbain (Cf. Tableau C.1).

Type de sol	z_0 (m)
Eau libre	0.002-0.006
Sol nu	0.005-0.02
Gazon ras	0.001
Gazon dense	0.02
Blé (1 m de haut)	0.1-0.16
Habitat épars (fermes, villages, arbres, haies)	0.2-0.6
Périurbain peu dense (zones résidentielles, jardins)	0.4-1.2
Périurbain dense	0.8-1.8
Urbain dense	1.5 - 10

TAB. C.1 – Valeurs typiques du paramètre de rugosité z_0 (d’après [Guyot1999] et [Oke1987]).

Le gradient vertical s’exprime alors en dérivant suivant la variable z :

$$\frac{\partial \langle c(z) \rangle}{\partial z} = \frac{a_{log}}{z} + b_{lin} \quad (\text{C.8})$$

Les profils réels sont en réalité plus complexes et une description plus fine fait appel à des modèles de profils de vent et de températures plus sophistiqués (Cf. Figure C.1, profil Monin-Obukhov) [Stu1988].

La propagation dans un milieu à célérité variable a pour principal effet d’incurver les rayons sonores vers le bas ou vers le haut suivant que le gradient vertical de célérité du son soit respectivement positif (*conditions favorables* à la propagation) ou négatif (*conditions défavorables* à la propagation). L’état transitoire - et souvent très bref - entre ces 2 états représente des *conditions homogènes* de propagation.

Schématiquement, on peut donc considérer qu’il existe 3 types principaux de propagation dépendant de la forme du profil vertical de vitesse du son. Ces trois types sont détaillés dans les paragraphes suivants.

C.2.1.1 - Propagation du son en présence d’un gradient vertical du son 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’ensuit 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 la Figure C.2.

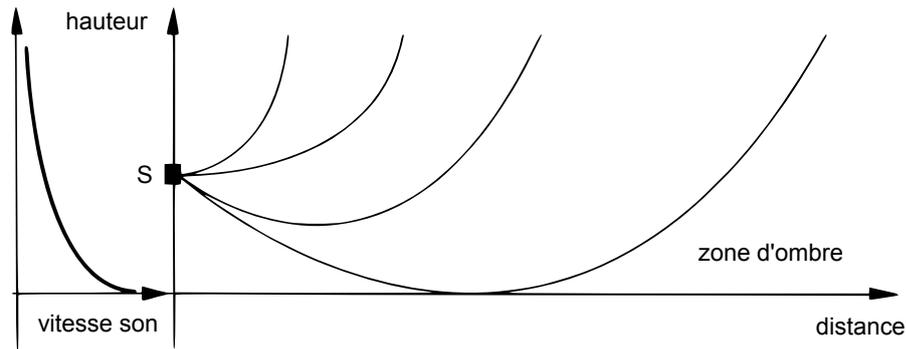


FIG. C.2 – Propagation acoustique en conditions défavorables.

Les rayons acoustiques sont remontants. Dans ces conditions, le niveau sonore à grande distance est plus faible qu'en l'absence d'effets météorologiques. En théorie, il existe même une "zone d'ombre" dans laquelle aucun rayon acoustique direct ne pénètre, et où le niveau sonore, très faible, résulte en réalité des phénomènes de diffraction et de turbulence. Ce type de conditions est donc défavorable à la propagation du son. Dans le présent document il est qualifié de conditions "défavorables".

C.2.1.2 - Propagation du son en présence d'un gradient vertical du son 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 appelée "inversion de température". Elle correspond 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 est représenté à la Figure C.3.

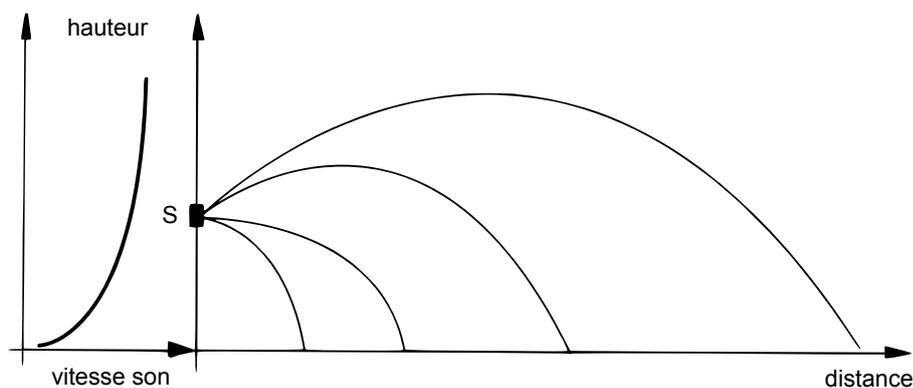


FIG. C.3 – Propagation acoustique en conditions favorables.

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 le présent document elle est appelée 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.2.1.3 - Propagation du son en présence d'un gradient vertical du 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 deux phénomènes sont donc relativement rares, et la propagation du son en l'absence de gradient vertical de vitesse du son doit davantage être considérée comme une frontière entre les deux modes de propagation précédents que comme un mode de propagation à part entière. Dans ce document, cette situation est qualifiée d'"homogène", en sous-entendant qu'il s'agit de conditions de propagation dans un milieu homogène. Ces conditions conduisent à une propagation sonore en rayons rectilignes (Cf. Figure C.4).

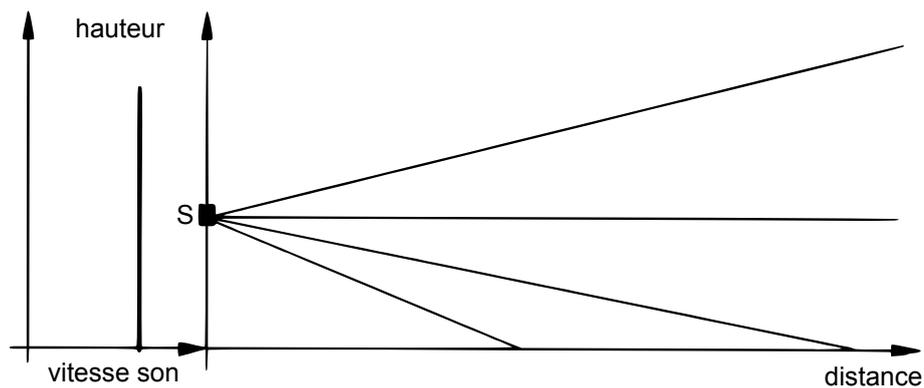


FIG. C.4 – Propagation acoustique en conditions homogènes.

Les effets de réfraction sont illustrés au Tableau C.2 sur des cartographies de niveaux sonores dans le cas de propagation au-dessus d'un sol d'abord parfaitement réfléchissant (jusqu'à 10 m de la source) puis d'un sol qui absorbe partiellement les ondes sonores. Sur cette figure, on observe ainsi la modification de la répartition spatiale (courbure) des zones de concentration de l'énergie sonore (lobes). Les effets de sol (atténuation de l'énergie acoustique par absorption - lire *supra*) s'en trouvent plus (conditions favorables) ou moins (conditions défavorables) renforcés. En l'absence de turbulence, la "zone d'ombre" due aux effets de sol peut ainsi être significativement renforcée en conditions défavorables par rapport au cas de propagation en conditions homogènes ($a_{log}=0$ m/s - Cf. Tableau C.3 - cas 1). Il convient de noter que ces effets de réfraction ne dépendent pas de la fréquence considérée.

Il est important de préciser que les différences de niveaux sonores observées dans les zones "favorables" et "défavorables" (par rapport au cas homogène) ne sont pas égales en valeur absolue. En pratique, les diminutions des niveaux sonores sont beaucoup plus importantes que les augmentations. De plus, la dispersion des niveaux sonores est beaucoup plus faible dans le cas d'une propagation en situation "favorable" qu'en situation "défavorable". La Figure C.5 illustre ce phénomène en fournissant, suivant le signe du gradient vertical de célérité 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.

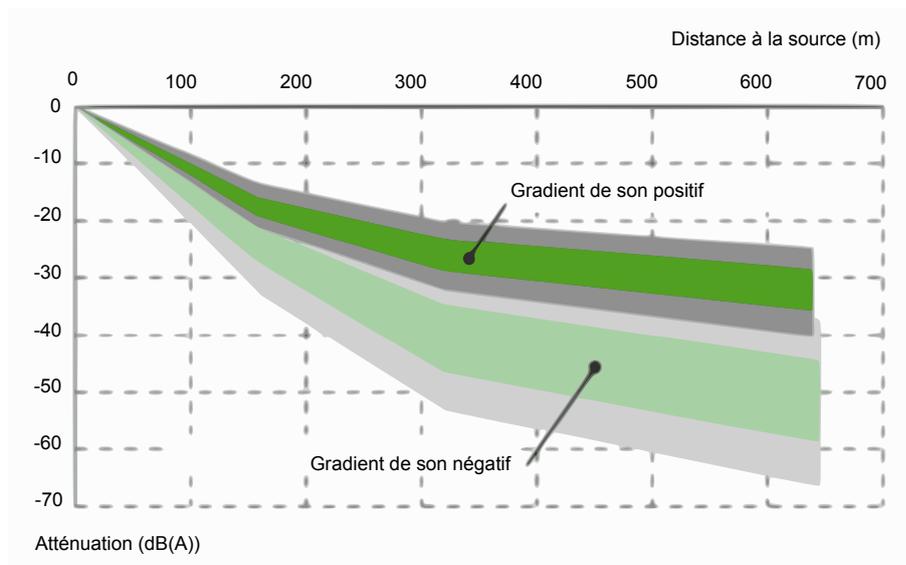


FIG. C.5 – Atténuation et dispersion des niveaux sonores en fonction de la distance à la source pour des conditions de propagation favorables (gradient positif) et défavorables (gradient négatif) [Zou1998].

C.2.2 - Turbulence atmosphérique

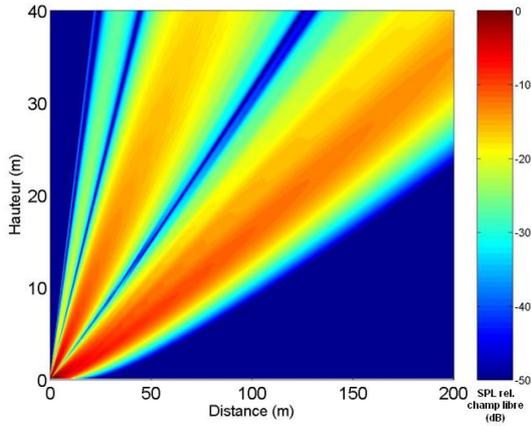
La partie fluctuante (ou stochastique) μ de l'indice du milieu traduit les effets de la turbulence atmosphérique sur la propagation acoustique, causée par les fluctuations aléatoires des grandeurs micrométéorologiques. L'échelle de temps considérée ici est inférieure à la seconde (de 0.02 à 0.1 s). C'est l'échelle de variation temporelle dont les effets sont les plus significatifs sur la propagation acoustique à grande distance. La difficulté réside alors dans la caractérisation expérimentale de cette turbulence, dont les paramètres caractéristiques peuvent être évalués à l'aide d'équipements autorisant une acquisition à fréquence élevée, du type anémomètre tridimensionnel à ultra-sons ou anémomètre à fil chaud. En théorie, cette turbulence atmosphérique est essentiellement décrite par son (ou ses) échelle(s) et par la variance de l'indice de réfraction $\langle \mu^2 \rangle$. Cette variance est souvent appelée improprement "intensité de la turbulence". En première approche, la partie fluctuante est liée aux fluctuations des variables micrométéorologiques par l'approximation suivante :

$$\mu(r, z) = -\frac{T'(r, z)}{2T_0} - \frac{u'(r, z)}{c_0} \quad (\text{C.9})$$

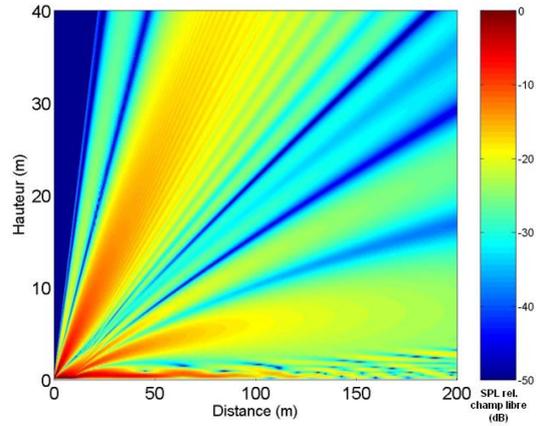
où T' et u' représentent respectivement les parties stochastiques de la température T et de la composante longitudinale du vent u , alignée avec la direction de propagation. T_0 et c_0 sont des valeurs de référence (constantes) pour la température et la célérité du son (typiquement $T_0=288$ K et $c_0=340$ m/s).

Si on fait l'hypothèse de la "turbulence gelée", alors on peut considérer les caractéristiques de la turbulence comme invariantes pendant le temps de traversée de l'onde sonore. Une hypothèse supplémentaire d'isotropie et d'homogénéité nous permet de modéliser numériquement ses effets sur la propagation acoustique. Ces effets dépendent sensiblement de la fréquence et sont présentés au Tableau C.3 (calcul monochromatique à 4 kHz). La turbulence atmosphérique homogénéise les niveaux sonores dans l'espace. Ainsi, les figures d'interférences destructives ("lignes" de moindre énergie sonore) qui apparaissent avec un calcul déterministe, *i.e.* sans turbulence, se trouvent "lissées" en présence de turbulence. De même, l'énergie sonore présente à la limite de la zone d'ombre qui apparaît dans le cas déterministe (effet de sol + éventuellement conditions défavorables) est diffusée dans cette zone en présence de turbulence, où les niveaux sonores calculés retrouvent alors des valeurs réalistes.

Cas 1 : conditions défavorables avec $a_{log}=-2$ m/s

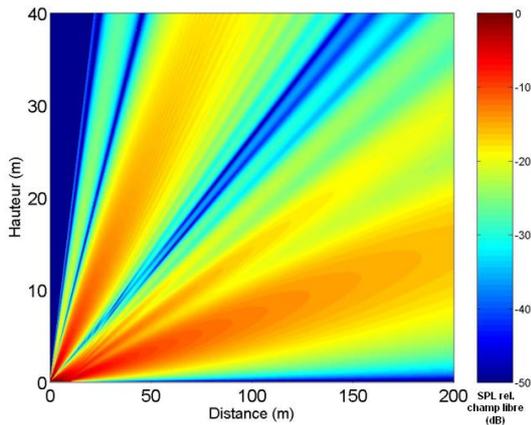


Cas 2 : conditions favorables avec $a_{log}=+2$ m/s

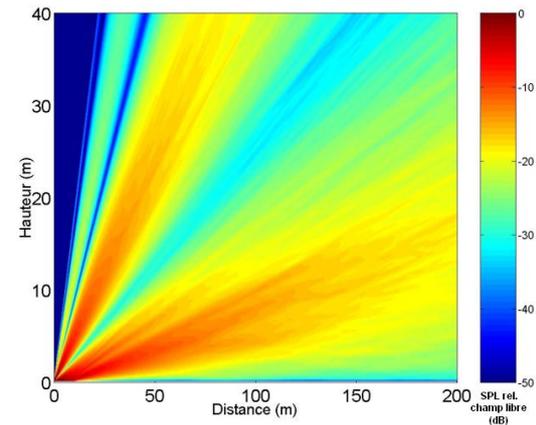


TAB. C.2 – Illustration de l’effet de la stratification horizontale de l’atmosphère sur la propagation acoustique (réfraction); $f=4$ kHz, $h_s=0.1$ m, $\sigma_1=100000$ kNsm⁻⁴, $\sigma_2=1000$ kNsm⁻⁴, $D_{rupture-impédance}=10$ m, profil “log” [MEDD2006]. σ est la résistance au passage de l’air.

Cas 1 : atmosphère homogène (calcul déterministe)



Cas 2 : atmosphère turbulente ($\langle \mu^2 \rangle = 8.10^{-6}$)



TAB. C.3 – Illustration des effets des variations stochastiques de l’indice du milieu (turbulence atmosphérique) $f=4$ kHz, $h_s=0.1$ m, $\sigma_1=100000$ kNsm⁻⁴, $\sigma_2=1000$ kNsm⁻⁴, $D_{rupture-impédance}=10$ m, profil “log” [MEDD2006].

D-Analyse météorologique d'une situation acoustique

D.1- Propos liminaires

L'influence des effets micrométéorologiques sur la propagation acoustique est un phénomène très important à moyenne et grande distance d'une source sonore quelconque (bruit routier, ferroviaire, industriel, *etc.*). La compréhension de ces phénomènes physiques, qui sont une des causes des fluctuations acoustiques, est donc importante pour analyser correctement les résultats de niveaux sonores mesurés ou calculés. Selon la configuration envisagée (géométrie, topographie, caractéristiques de sol, *etc.*), ces effets peuvent même être significatifs à partir de quelques dizaines de mètres de distance à la source. Au niveau national, du point de vue strictement réglementaire, ces effets doivent être pris en compte seulement à partir de 250 m, comme le prescrit l'arrêté du 5 mai 1995, relatif au bruit des infrastructures routières. Du point de vue normatif, la limite de distance est fixée à 100 m pour le bruit routier [NFS31085]. De même, ces documents officiels ne considèrent que les effets météorologiques "moyens" sur la propagation acoustique, c'est-à-dire les effets *déterministes* relatifs aux échelles de temps de l'ordre de la minute ou de l'heure - voire de la journée - qui traduisent le phénomène de *réfraction moyenne* du champ sonore (conditions favorables ou défavorables à la propagation). Cependant, d'autres phénomènes physiques, non plus déterministes mais *stochastiques*, tels que l'*intermittence* ou la *turbulence atmosphérique* peuvent également avoir une influence significative sur les niveaux sonores dans certains cas, en particulier aux plus hautes fréquences et grandes distances pour la turbulence.

Ces effets micrométéorologiques sur la propagation acoustique sont brièvement présentés à l'Annexe C du présent document. Dans la NMPB-Routes-2008, la prise en compte de la réfraction et de la turbulence intervient dès les premiers mètres de propagation.

Cette partie (incluant l'Annexe C) a été légèrement enrichie par rapport à la NMPB-Routes-96 [NMPB96], de manière à introduire quelques résultats des récents travaux sur ce sujet [MEDD2006]. Ces résultats sont présentés de manière synthétique et, nous l'espérons, pédagogique, dans le souci d'harmoniser les notations, les critères, les grandeurs, les valeurs limites et les pratiques rencontrées dans la communauté des acousticiens européens, que ce soit dans le domaine scientifique et technique (techniciens, ingénieurs d'étude, scientifiques, développeurs, *etc.*) ou dans le domaine réglementaire et normatif (maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, *etc.*).

Cette partie s'attache plus précisément à décrire la méthode d'analyse météorologique d'une situation acoustique, *i.e.* la caractérisation *in situ* des conditions de propagation au sens de la réfraction moyenne. L'analyse météorologique d'une situation acoustique doit permettre de rendre compte de la manière la plus complète et précise possible des *conditions de propagation représentatives* de celles existantes entre source(s) et récepteur(s) pendant une (ou plusieurs) période(s) fixée(s). Il s'agit donc d'en apprécier rigoureusement les *caractéristiques moyennées dans l'espace et dans le temps*.

Cette partie s'attache donc d'abord à préciser ces termes dans notre cadre d'étude (*Cf.* Section D.2), puis à décrire les méthodes d'analyse météorologique d'une situation acoustique, afin d'être en mesure d'en déterminer les conditions de propagation à court, moyen et long termes (*Cf.* Section D.3).

D.2-Moyennes et échelles spatio-temporelles

D.2.1 - Représentativité spatiale

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

Dans la pratique, ces conditions ne se retrouvent, en première approximation, que dans le cas d'un site supposé "idéal", correspondant aux caractéristiques suivantes :

- site plat et horizontal ;
- site démuné d'obstacles ;
- sol et végétation homogènes ;

- absence de grandes masses d'eau à proximité (lacs, rivières) ;
- site dégagé et homogène bien au-delà de la zone concernée par la propagation du son.

Dans ces conditions, les profils verticaux de vitesse de vent et de température peuvent effectivement être considérés, en première approximation, comme indépendants des coordonnées horizontales (distance à la source). Ainsi, sous certaines conditions, les profils verticaux peuvent être modélisés à partir des informations météorologiques régionales, issues de stations régionales officielles de Météo-France par exemple, ou reconstitués théoriquement à partir d'informations sur le vent et la température (Cf. Section D.3.2).

Cependant, ces conditions idéales se rencontrent très rarement : en réalité, les profils verticaux de température et de vitesse de vent dépendent de plusieurs facteurs locaux qui sont liés à la topographie, la nature du sol, le couvert végétal, *etc.* En raison de ces facteurs, les hypothèses de site idéal ne sont pas toujours valables et il arrive ainsi fréquemment que l'on ne puisse plus considérer qu'il existe une corrélation systématique entre les données météorologiques régionales et les caractéristiques micrométéorologiques sur un site précis (échelle locale), même si ce dernier est situé très près d'une station météorologique officielle ("effet de site"). En outre, les profils verticaux dépendent alors souvent de la distance (à la source et/ou à un obstacle) et ne suivent donc plus les mêmes lois théoriques.

La détermination des conditions micrométéorologiques caractéristiques d'un site peut donc se révéler très complexe, en particulier en raison des hétérogénéités spatiales qui peuvent exister entre la source et le récepteur. Leur estimation peut même parfois nécessiter l'utilisation d'outils (géo)statistiques évolués. Ces considérations valent pour une source ponctuelle, et *a fortiori* pour une source linéique (bruit routier) ou surfacique (bruit industriel), et *a fortiori* encore en milieu urbain dense. Il relève donc de la personne en charge de l'étude d'estimer des *profils verticaux moyens qu'elle jugera représentatifs de la configuration spatiale étudiée* (nature de sol, topographie, bâti, végétation, obstacles divers, *etc.*), de manière à pouvoir se ramener au cas de *profils verticaux homogènes spatialement suivant la (les) coupe(s) verticale(s) entre source(s) et récepteur(s)*.

D.2.2 - Représentativité temporelle

Les profils verticaux de vitesse de vent et de température varient significativement dans le temps en raison des fluctuations des conditions météorologiques. Ces fluctuations aléatoires peuvent se produire sur des échelles de temps très différentes, allant de quelques fractions de seconde à plusieurs heures, voire à des durées plus importantes correspondant à des rythmes journalier, saisonnier, annuel ou même de tendances à plus "long terme" (Cf. Section C.2.2). Par conséquent, comme toute variable aléatoire, la caractérisation du milieu atmosphérique traversé par l'onde acoustique est, toutes choses égales par ailleurs, essentiellement liée à sa durée d'observation.

Ainsi, le niveau sonore à grande distance est constitué par la superposition de fluctuations de très courte durée et de phénomènes cycliques d'amplitude aléatoire relatifs aux rythmes horaires, journaliers et saisonniers.

Compte tenu des phénomènes mis en jeu et de la finalité des résultats acoustiques, il convient donc de considérer la prise en compte des effets météorologiques dans la propagation du bruit à grande distance sur trois échelles de temps différentes :

- échelle de "court terme"
- échelle de "moyen terme"
- échelle de "long terme"

D.2.2.1 - Echelle de court terme

Cette échelle correspond à une période pendant laquelle les caractéristiques statistiques des conditions météorologiques peuvent être considérées comme stationnaires. On peut accéder expérimentalement à ce type d'information en effectuant des mesures météorologiques et acoustiques sur des *durées synchrones de l'ordre de 10 minutes à 2 heures* et en calculant la moyenne des variables météorologiques mesurées sur cette période, ou "intervalle de base" en termes normatifs [NFS31085]. En effet, dans cet intervalle, les conditions météorologiques peuvent être considérées comme localement stationnaires, c'est-à-dire que leurs caractéristiques statistiques sont relativement constantes dans l'intervalle considéré. Cette approximation revient à négliger les phénomènes d'intermittence et de turbulence, et leurs effets (Cf. Annexe C) pendant la période considérée.

Les phénomènes acoustiques observés sur cette échelle de temps peuvent, en général, être correctement modélisés par les modèles de propagation actuels, à condition de pouvoir disposer d'un profil de vitesse du son représentatif comme donnée d'entrée du modèle.

D.2.2.2 - Echelle de moyen terme

Cette échelle de temps est fondamentale, puisqu'elle correspond aux durées des *périodes réglementaires de référence* (ou "intervalle de référence" en termes normatifs [NFS31085]), ainsi donc qu'aux *durées minimales de mesure* (ou "intervalle de mesurage" en termes normatifs [NFS31085]):

- Au niveau national (bruit routier et ferroviaire)
 - Jour : 6h-22h
 - Nuit : 22h-6h
- Au niveau de la directive européenne 2002/49/CE en France
 - Jour : 6h-18h
 - Soir : 18h-22h
 - Nuit : 22h-6h

Lors de mesures, cette échelle de temps permet de caractériser les fluctuations acoustiques et micrométéorologiques entre plusieurs échantillons de court terme. On peut ainsi interpréter, *a posteriori*, une mesure effectuée sur une période de référence donnée. Il est en effet toujours possible de connaître les conditions météorologiques durant des mesures particulières, à condition de prendre les précautions d'usage. Utilisée dans les calculs, cette échelle de temps peut soit utiliser des informations météorologiques *a posteriori* pour comparer les résultats de calcul avec une mesure réalisée dans des conditions particulières, soit employer des valeurs *a priori* constituant les hypothèses pour calculer un niveau sonore dans des états atmosphériques donnés. Dans les deux cas, les niveaux sonores peuvent être calculés par une composition des situations de "court terme" pondérées par une répartition des conditions de propagation observées, ou définies par hypothèse.

D.2.2.3 - Echelle de long terme

Si l'on souhaite donner au calcul une *valeur représentative d'une moyenne sur une longue période*, il est nécessaire de définir les conditions météorologiques en les analysant sur une échelle de "long terme". Cette approche est très différente des précédentes, car elle fait appel à une connaissance statistique du phénomène. Elle correspond à la répartition statistiques des données de "court terme" sur une durée suffisamment représentative pour que cette estimation statistique ait un sens et fournisse des résultats robustes.

Pour être représentatives des conditions de long terme, les météorologues considèrent que les durées d'observation doivent être de l'ordre de trente ans. Cette durée permet de couvrir la quasi totalité des situations météorologiques d'un site. Des moyennes effectuées sur des périodes plus courtes deviennent trop sensibles aux années exceptionnelles. C'est sur cette durée que sont réalisés, en particulier, les calculs correspondant aux "normales saisonnières" bien connues en météorologie.

Les résultats de calcul de "long terme" doivent donc fournir une information qui, pour être représentative, doit intégrer des données météorologiques correspondant à l'ordre de grandeur de cette durée pour minimiser l'imprécision apportée par les fluctuations météorologiques. Théoriquement, le niveau sonore de "long terme" devrait donc se présenter sous forme statistique, en fournissant, par exemple, la fonction de répartition du L_{Aeq} sur une période de l'ordre de trente ans. Il est clair que cette caractéristique statistique ne peut être mesurée directement et reste donc, à première vue, inaccessible.

Toutefois, la nécessité d'une telle représentation apparaît clairement dès que l'on se pose les questions élémentaires suivantes :

- comment comparer un résultat de calcul avec une mesure ?
- quelle précision associer à une mesure lorsque que l'on doit la comparer à une valeur réglementaire ?
- peut-on admettre qu'une mesure puisse parfois dépasser un niveau sonore calculé ? Si la réponse est oui, quel est le pourcentage de risque de dépassement ?

La difficulté de fournir des réponses à ces questions est liée au fait que les niveaux sonores à grande distance résultent de phénomènes physiques complexes et pas toujours indépendants (*Cf.* Annexe C). De plus, ces

niveaux sont fréquemment considérés comme des variables déterministes alors qu'ils présentent en réalité une certaine dispersion. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire d'utiliser une méthode d'estimation du niveau sonore représentatif des conditions météorologiques de "long terme", (Cf. Section 5.1).

D.3-Analyse météorologique d'une situation acoustique

D.3.1 - Classification des régimes des propagation

Les échelles de temps considérées ici ont été rappelées à la Section D.2.2 : en supposant l'atmosphère comme "gelée" pendant la traversée de l'onde sonore, on peut considérer - en première approximation, *i.e.* en négligeant les phénomènes d'intermittence et de turbulence atmosphérique (Cf. Annexe C) - que l'échelle de court terme permet de caractériser correctement un état représentatif du milieu de propagation, c'est-à-dire une période pendant laquelle les champs moyens de vent et de température peuvent être considérés comme "stationnaires".

En pratique, les conditions de propagation acoustique sont caractérisées sur une période totale de mesure dont l'échelle temporelle est de l'ordre du "moyen terme" (Cf. Section D.2.2), et souvent appelée "intervalle de mesurage" dans le domaine normatif. Cette période est donc discrétisée temporellement par les échantillons de court terme sus-mentionnés (ou "intervalles de base" en termes normatifs). Cet échantillonnage est fixé par l'opérateur ; typiquement, il peut s'étendre de 10 minutes à 2 heures suivant les conditions de stabilité de l'atmosphère.

Ceci permet alors d'associer des conditions de propagation à chacun des échantillons de mesures acoustiques pendant chacun des intervalles de base.

Pour cela, on considère la grandeur caractéristique pour le phénomène de réfraction, *i.e.* la valeur moyenne¹ du gradient vertical de célérité effective du son $Grad_c$, exprimée en fonction du gradient vertical de température $Grad_T$ et du gradient vertical de vitesse de vent projeté sur l'axe de propagation $Grad_{VV}$ (Cf. Annexe C) :

$$Grad_c = \frac{\partial c_{eff}}{\partial z} = \frac{K}{\sqrt{T}} Grad_T + Grad_V \cdot \cos\theta \simeq \frac{1}{2} \frac{\gamma R}{c_0} Grad_T + Grad_{VV} \quad (D.1)$$

où θ est l'angle entre la direction de propagation et la direction du vent, $\gamma = \frac{C_p}{C_v} \simeq 1.4$ est le rapport adimensionnel des chaleurs spécifiques, R est la constante spécifique de l'air sec ($R=287$ J/(kg K)), $c_0 = \sqrt{\gamma RT_0}$ la valeur de référence de la célérité du son dans ces mêmes conditions, sans vent, et T_0 est la température moyenne de l'air pour l'échantillon temporel considéré (en Kelvin).

Ainsi, pour chacun de ces échantillons bruit/météo synchrones, on définit 5 classes moyennes¹ de propagation (Cf. Tableau D.1).

¹ "moyenne" temporelle et spatiale, le cas échéant, *i.e.* moyenne sur chaque intervalle de base, et en plusieurs points de l'espace si nécessaire (Cf. Section D.2.2).

Classe nationale	Classe "européenne"	Conditions de propagation	Grad _c	Effets sur les niveaux sonores
- -	M0	Très défavorables	$Grad_c \ll 0$	Atténuation et dispersion très importantes
-	M1	Défavorables	$Grad_c < 0$	Atténuation et dispersion importantes
Z	M2	Homogènes	$Grad_c = 0$	Propagation et dispersion "normales"
+	M3	Favorables	$Grad_c > 0$	Augmentation importante et dispersion modérée
+ +	M4	Très Favorables	$Grad_c \gg 0$	Augmentation très importante et dispersion très modérée

TAB. D.1 – Définition *qualitative* des classes moyennes de propagation acoustique - conventions de notation française et "européenne".

Il convient d'associer à ce tableau les remarques suivantes :

- en réalité, les conditions parfaitement homogènes sont relativement rares et éphémères. De plus, ces conditions sont très délicates à caractériser expérimentalement pour des raisons à la fois méthodologiques (intermittence) et métrologiques (précision). La classe de propagation M2 doit donc se comprendre comme un état transitoire de passage des classes M1 à M3 ou M3 à M1 ;
- afin de limiter la dispersion des niveaux sonores pendant la mesure, indépendamment des incertitudes expérimentales, les documents normatifs de référence préconisent de réaliser des mesures acoustiques pendant une période "suffisamment longue" en regard de l'évolution des conditions de propagation, et de ne retenir que les échantillons de classe M3 ou M4 (Cf. Annexe C). Ceci conduit également à surestimer le niveau sonore, garantissant ainsi une meilleure protection du riverain ;
- cette classification vaut pour des échantillons temporels de "court terme", pendant lesquels les conditions de propagation sont supposées relativement stationnaires, ou en tous cas moyennées dans le temps (typiquement de 10 minutes à 2 heures), ce qui revient à négliger les phénomènes d'intermittence (Cf. Section D.2 et Annexe C) ;
- pour caractériser une situation sur le "long terme", il faut moyenner sur plusieurs dizaines d'années les périodes réglementaires de référence (Cf. Section D.2.2.2) de la station Météo-France la plus proche ou la plus représentative du site étudié. Ces aspects sont détaillés à la Section 5.2 ;
- le nombre de classes de propagation dépend de la distance à la source de bruit. Ainsi, à courte distance, *i.e.* jusqu'à quelques dizaines de mètres, on peut négliger les effets micrométéorologiques sur la propagation acoustique et donc ignorer cette classification. A l'inverse, à grande distance de la source, *i.e.* au delà de 500 m voire 1 km, il peut parfois être utile à l'analyse de raffiner cette grille en ajoutant d'autres classes intermédiaires, en particulier pour les conditions favorables à la propagation entre M2 et M3. Cette classification est donc un compromis, pouvant cependant se justifier dans un grand nombre de situation de propagation ;
- cette classification n'est valable que pour une source ponctuelle. Dans le cas d'une source linéique, *e.g.* une voie routière, certains "tronçons" (Cf. Section 4.1.1) peuvent se trouver dans une classe et d'autres dans une autre classe.

D.3.2 - Méthodes d'analyse d'une situation météorologique

Le problème revient donc à déterminer à quelle classe de propagation appartient chacun des échantillons acoustiques de court terme (intervalles de base). Ces conditions de propagation peuvent être déterminées soit de manière *qualitative* (*i.e.* approchées par des observations plus ou moins locales), soit de manière *quantitative* (*i.e.* mesurées directement sur site), soit par une approche hybride. L'approche qualitative, la plus simple mais aussi la moins précise, permet de réaliser les études les plus courantes. L'approche quantitative peut être nécessaire dans le cas d'études plus complexes ou délicates : "expertise" (voire contre-expertise) au sens normatif.

D.3.2.1 - Méthodes qualitatives et grille UiTi

Les méthodes “qualitatives” sont basées sur la collecte d’informations, soit recueillies directement sur site (échelle locale), soit fournies par des stations météorologiques régionales, telles que les stations météorologiques officielles de Météo France, ou les réseaux particuliers (par exemple, le réseau de l’Institut National de la Recherche Agronomique - INRA)).

Ces stations obéissent à un cahier des charges très précis et sont situées en général sur des terrains plats et dégagés (Cf. Section D.2.1). Elles ne fournissent pas d’informations sur les profils verticaux de vent et de température, mais des données aérodynamiques (vitesse et direction du vent à 10 m de hauteur) et thermiques (température, durée d’insolation, couverture nuageuse et parfois ensoleillement exprimé en W/m^2).

Il existe essentiellement deux méthodes d’analyse qualitative d’une situation météorologique. La première est basée sur la grille UiTi (méthode française normalisée [NFS31085]), la seconde sur la grille WiSi, issue des travaux de recherche menés dans le cadre des projets européens Harmonoise et Imagine [HRM2005][IMA2006]. Il convient de noter que ces deux méthodes présentent des similitudes d’approche et des résultats convergents. Au niveau national, des travaux sont actuellement en cours pour enrichir et homogénéiser les documents normatifs afférents [prNFS31110].

A titre d’information, on rappelle ci-après le principe d’analyse actuellement utilisé au niveau national : puisque les effets de réfraction d’origine thermique et aérodynamique co-existent en pratique, nous donnons sur le Tableau D.2 une grille à double entrée qui permet de connaître la variation qualitative du niveau sonore obtenu à grande distance, en fonction des “observables” météorologiques. Les colonnes U1 à U5 correspondent aux caractéristiques aérodynamiques de l’atmosphère, et les lignes T1 à T5 aux caractéristiques thermiques.

	U1	U2	U3	U4	U5
T1		M0	M1		
T2	M0	M1		M2	M3
T3	M1		M2	M3	
T4	M1	M2	M3		M4
T5		M3		M4	

TAB. D.2 – Grille UiTi pour l’analyse météorologique qualitative d’une situation acoustique (observations météo locales et/ou données régionales).

Cette grille UiTi reprend les mêmes notations que le Tableau D.1. Les remarques faites pour le Tableau D.1 s’appliquent donc également pour celui-ci. Les cases vides correspondent à des cas météorologiques impossibles.

La détermination des conditions aérodynamiques (U_i) et thermiques (T_i) peut être réalisée, soit à partir d’observations (ou de mesures simples) locales directement sur site, soit à partir d’informations obtenues à la station météorologique la plus proche. Si la distance à cette station régionale est importante (supérieure à 10 km), il est alors souhaitable de compléter ces informations par des observations locales purement visuelles ou en utilisant un matériel de mesure simple.

En toute rigueur, ce type de méthode (Cf. Section D.2.1) ne devrait être utilisé que sur terrain plat, homogène et dégagé afin de garantir une bonne corrélation entre les informations régionales et les valeurs locales (sur site) des gradients verticaux de vent et de température. Dans la pratique, cette méthode est parfois employée même si le terrain n’est pas totalement conforme aux conditions du site “idéal”. Sa pertinence et sa validité doivent être justifiées par l’expert en charge de l’étude. Ce type de méthode a donc l’avantage de ne pas nécessiter de matériel de mesure complexe (contrairement aux méthodes évoquées à la Section), sauf si on se trouve éloigné d’une station météorologique officielle et que le site est très différent du site “idéal”.

Les critères d’entrée de la grille UiTi (informations régionales) sont indiqués dans le Tableau D.3. Ils correspondent à des valeurs moyennes des conditions météorologiques observées sur une période de “court terme” (Cf. Section D.2.2). Dans ce tableau, la définition des classes aérodynamiques (U_i , $i=1$ à 5) et thermiques (T_i , $i=1$ à 5) est donnée en termes d’observations et de gradients verticaux.

A titre d’information, on indique également dans ce tableau les ordres de grandeur des gradients verticaux

de vent et de température associés à chacun des critères (Cf. Section D.3.1).

Classe	Observations/données régionales	Gradients verticaux
U	U1	Vent fort contraire $Grad_{VV} < -0.13 s^{-1}$
	U2	[Vent faible contraire] OU [Vent fort peu contraire] $-0.13 s^{-1} \leq Grad_{VV} < -0.05 s^{-1}$
	U3	[Vent nul] OU [Vent quelconque de travers] $-0.05 s^{-1} \leq Grad_{VV} < 0.05 s^{-1}$
	U4	[Vent faible portant] OU [Vent fort peu portant] $0.05 s^{-1} \leq Grad_{VV} < 0.13 s^{-1}$
	U5	Vent fort portant $Grad_{VV} \geq 0.13 s^{-1}$
T	T1	Jour ET fort rayonnement ET surface sèche ET vent faible ou nul $Grad_T < -0.04 K.m^{-1}$
	T2	Jour ET [rayonnement moyen OU surface humide OU vent fort] $-0.04 K.m^{-1} \leq Grad_T < -0.02 K.m^{-1}$
	T3	[Durée horaire incluant le lever ou le coucher du soleil] OU [temps couvert et vent faible et surface non sèche] $-0.02 K.m^{-1} \leq Grad_T < 0.01 K.m^{-1}$
	T4	Nuit ET [nuageux ou vent non nul] $0.01 K.m^{-1} \leq Grad_T < 0.15 K.m^{-1}$
	T5	Nuit ET ciel dégagé ET vent faible ou nul $Grad_T \geq 0.15 K.m^{-1}$

TAB. D.3 – Critères d’entrée de la grille UiTi et valeurs associées pour les gradients verticaux de vent et de température définis à 6 m de hauteur, en supposant un profil du type “logarithmique” de célérité du son. Si toutes les conditions sont réunies en T2, on passe en T3.

Les termes “Jour” et “Nuit” qui apparaissent dans le Tableau D.3 doivent être compris sous le sens commun, *e.g.* Jour signifie entre le lever et le coucher du soleil.

Dans le Tableau D.3, on écarte les conditions aérodynamiques extrêmes pouvant parasiter la mesure des niveaux sonores. On considère alors comme :

- “vent fort” un vent dont la valeur moyenne mesurée à 6 m de hauteur pour un échantillon de base (échelle de court terme - Cf. Section D.2.2) s’étend de 3 à 5 m/s;
- “vent faible” un vent dont la valeur moyenne mesurée à 6 m de hauteur pour un échantillon de base (échelle de court terme - Cf. Section D.2.2) s’étend de 1 à 3 m/s.

Si la vitesse du vent est connue à l’altitude $z(V_{zm})$, on peut alors “remonter” à sa valeur approximative à 10 m (V_{10m}) en supposant un profil aérodynamique du type logarithmique avec un paramètre de rugosité z_0 (Cf. Annexe C). On a alors la relation de passage suivante :

$$V_{10m} = V_{zm} \frac{\ln(1 + 10/z_0)}{\ln(1 + z/z_0)} \quad (D.2)$$

En ce qui concerne la *direction du vent*, sa caractérisation se fait à partir des définitions fournies sur la Figure D.1. Dans le cas d’une voie routière, par convention, la direction de la source correspond à la perpendiculaire à la voie passant par l’émetteur. Cette discrétisation des différentes directions du vent en “secteurs angulaires” a fait l’objet d’une validation [Zou1998].

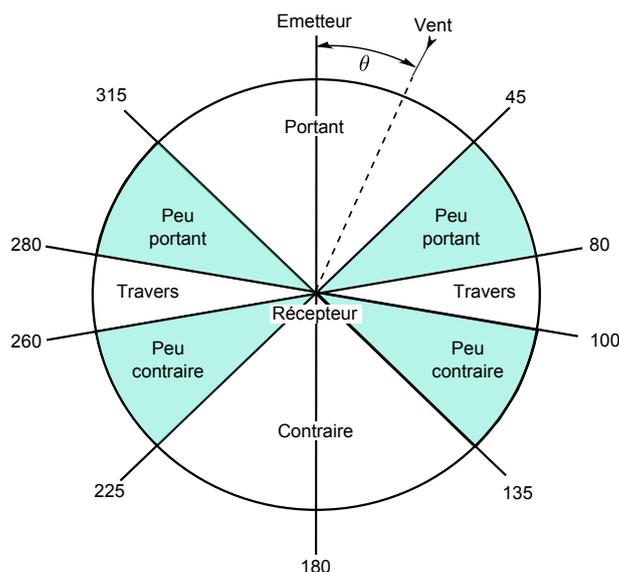


FIG. D.1 – Définition des secteurs angulaires de vent entre émetteur et récepteur.

Pour les données régionales sur la *température*, il convient d'apporter quelques précisions sur la couverture nuageuse et sur le rayonnement :

- la couverture nuageuse représente le pourcentage de surface du ciel occupée par la couche nuageuse. Les stations météorologiques fournissent cette information en octas : 0/8 octas correspond à un ciel totalement dégagé, et 8/8 octas à un ciel totalement couvert. Dans ces conditions, les définitions prises pour caractériser l'état de la couverture nuageuse sont les suivantes :
 - temps couvert : 8/8 octas ;
 - temps nuageux : supérieur à 4/8 octas ;
 - ciel dégagé : inférieur ou égal à 4/8 octas.
- le rayonnement quantifie l'énergie solaire arrivant sur le sol et s'exprime en W/m^2 . On admet les valeurs conventionnelles suivantes :
 - *fort rayonnement* : rayonnement supérieur à $400 W/m^2$;
 - *rayonnement moyen* : rayonnement dans l'intervalle $]40 W/m^2, 400 W/m^2]$.



AVERTISSEMENT

L'état des connaissances à la date de rédaction de la présente méthode ne permet pas de proposer une grille UiTi complète. Par exemple, il n'est pas possible d'associer une classe de propagation acoustique aux conditions Nuit et Ciel dégagé et Vent fort contraire ou portant.

D.3.2.2 - Méthodes quantitatives et hybrides

Les classes de propagation présentées à la Section D.3.1 peuvent également être déterminées à partir de mesures micrométéorologiques adaptées, réalisées *in situ* suivant des protocoles expérimentaux spécifiques et du matériel de mesure particulier : mât équipé de capteurs conventionnels, anémomètre tridimensionnel à ultra-sons, *etc.*

On parle de méthodes hybrides lorsque les valeurs des observables influentes (gradient vertical de température de vent et de température, u^* , T^* , L_{MO} par exemple [Stu1988]) sont déterminées de manière approximative *via* des observations locales, sans réelles mesures au sens rigoureux du terme comme mentionné à la Section D.3.2.1.

Pour davantage de détails sur ces méthodes, le lecteur pourra se reporter à [Gau2009], [MEDD2006] ou [IMA2006].

E - Aspects géométriques

E.1 - Principe de Fermat

Le principe de Fermat indique qu'un rayon suit toujours le parcours le plus rapide entre la source et le récepteur. En appliquant ce principe, on retrouve que les rayons se propagent en ligne droite dans un milieu d'indice de réfraction constant. On explique aussi la courbure des rayons acoustiques dans les milieux à indice variable. Keller à proposé une extension du principe de Fermat dit "Principe de Fermat généralisé" qui permet de retrouver l'ensemble des rayons possibles dans une géométrie donnée et notamment les rayons diffractés [Kel1962]. Ainsi, on montre que dans un milieu d'indice constant, l'angle entre le rayon diffracté et l'arête est identique à l'angle du rayon incident. On peut donc reformuler le principe de Fermat pour les rayons diffractés de la manière suivante : *dans un milieu d'indice constant, un rayon acoustique diffracté suit le plus court trajet entre la source et le récepteur et passant par chaque arête considérée.*

On peut prendre l'exemple d'une double diffraction sur des arêtes latérales verticales. Dans la vue dans le plan vertical, le rayon suit la droite (SR). L'angle entre les arêtes diffractantes verticales et le rayon est bien constant, avec les notations illustrées sur la Figure E.1 :

$$\mathbf{u}_1^- \cdot \mathbf{u} = \mathbf{u}_1^+ \cdot \mathbf{u} = \mathbf{u}_2^- \cdot \mathbf{u} = \mathbf{u}_2^+ \cdot \mathbf{u} \quad (\text{E.1})$$

avec

$$\begin{cases} \mathbf{u}_1^- = \frac{1}{\|\vec{SM}_1\|} \vec{SM}_1 \\ \mathbf{u}_1^+ = \frac{1}{\|\vec{M}_1M_2\|} \vec{M}_1M_2 = \mathbf{u}_2^- \\ \mathbf{u}_2^+ = \frac{1}{\|\vec{M}_2R\|} \vec{M}_2R \end{cases} \quad (\text{E.2})$$

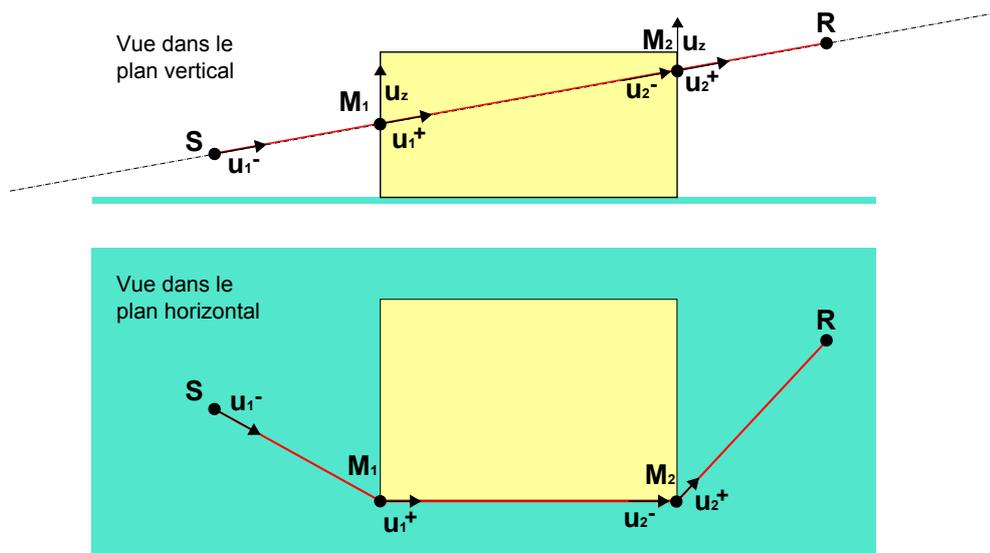


FIG. E.1 – Exemple d'application du principe de Fermat à une double diffraction.

E.2 - Ellipsoïde et pondération par zone de Fresnel

La pondération de Fresnel fournit une extension au principe de localité¹ de l'acoustique optique afin de prendre en compte la dimension des obstacles par rapport à la longueur d'onde. Comme dans l'acoustique géométrique, on assimile la propagation du son à des trajets géométriques particulier : les rayons sonores. Toutefois, on considère chaque rayon comme porteur d'un front d'onde étendu. L'étendue de ce front d'onde est caractérisée par le critère de Fresnel (Cf. Figure E.2) :

$$SX + XR \leq SR + \frac{\lambda}{n} \quad (\text{E.3})$$

où n est un entier.

Ceci revient à associer à chaque rayon un volume : l'ellipsoïde de Fresnel. On admet alors qu'un rayon sonore peut interagir non seulement avec les obstacles rencontrés mais également avec des obstacles intersectés par son ellipsoïde associé.

En 3D, les calculs d'intersection entre l'ellipsoïde et des obstacles, comme la recherche des rayons, sont complexes à mettre en œuvre.

L'approche 2D1/2 consiste à rechercher d'abord des chemins de propagation dans le plan horizontal, puis de construire les rayons sonores dans le plan de coupe correspondant. On peut alors appliquer la pondération de Fresnel séparément aux descriptions 2D du chemin de propagation dans le plan horizontal et dans le plan de coupe. Le problème de base se réduit alors à calculer l'intersection entre une ellipse et un segment de droite (Cf. Figure E.2).

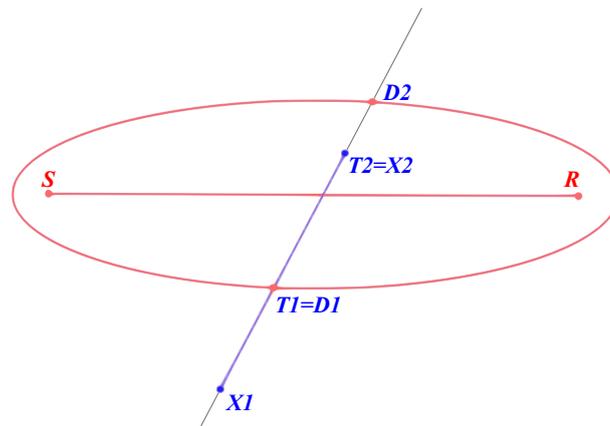


FIG. E.2 – Ellipse de Fresnel.

Les étapes de la construction géométrique de l'ellipse de Fresnel sont les suivantes :

1. segment (X_1, X_2)
2. source S , récepteur R
3. ellipse E
4. droite D porteuse du segment (X_1, X_2)
5. points d'intersection $\{D_1, D_2\}$ de D avec l'ellipse E
6. l'intersection du segment (X_1, X_2) avec le segment (D_1, D_2) donne le segment (T_1, T_2) .

Le coefficient de pondération de Fresnel est alors défini comme le rapport :

¹ Le principe de localité suppose le front d'onde concentré dans une zone infiniment petite autour du rayon sonore (ou lumineux). Par conséquent, le comportement du rayon, et en particulier le calcul de l'amplitude de l'onde associée, est uniquement déterminé par les obstacles rencontrés. Autrement dit, c'est le critère de visibilité, au sens des rayons lumineux, qui détermine s'il y a lieu de prendre en compte une réflexion. Avec ce principe, un simple support de glissière de sécurité suffit à créer une réflexion.

$$F = \frac{T_1 T_2}{D_1 D_2} \quad (\text{E.4})$$

E.2.1 - Applications

- Réflexion sur un obstacle vertical tel qu'un mur ou une façade - correction de longueur finie :
 - R : position du récepteur dans le plan ;
 - S : position de la source-image dans le plan ;
 - X_1, X_2 : extrémités de l'obstacle réfléchissant, dans le plan.
- Réflexion sur un obstacle vertical comme un mur ou une façade - correction de hauteur finie :
 - R : position du récepteur dans la coupe déployée ;
 - S : position de la source, dans la coupe déployée ;
 - X_1, X_2 : image du sommet de l'obstacle par rapport au sol local, *i.e.* au pied de l'obstacle ;
 - Ce principe est extensible aux obstacles inclinés.
- Diffraction latérale par une arête verticale :
 - R : position du récepteur, dans la coupe déployée ;
 - S : position de la source, dans la coupe déployée ;
 - X_1 : sommet de l'arête verticale ;
 - X_2 : image du sommet de l'arête par rapport au sol.
- Diffraction au dessus d'un obstacle de longueur finie : ce cas est plus compliqué. Il faudra assurer la continuité de la solution avec les chemins diffractés latéralement.

F- Traitement des éléments particuliers

La présente annexe vient en complément du Chapitre 7 en ce qui concerne les éléments particuliers, tels que tranchées, tunnels, couvertures partielles.

Elle reproduit, avec l'aimable autorisation du CERTU, les pages du [GdB1980] où ces points sont traités.

5.3 Couvertures complètes des chaussées

5.3.1. Couverture infiniment longue

Lorsqu'un bâtiment est protégé du bruit par une couverture complète des chaussées, le niveau sonore en façade peut être estimé égal au niveau sonore sans couverture diminué de l'efficacité de la couverture. Autrement dit, l'efficacité de la couverture peut être définie comme la différence entre le niveau sonore avant et le niveau sonore après sa mise en place.

Dans ce cas, le niveau sonore en présence d'une couverture infiniment longue est la somme de deux termes :

- . énergie sonore rayonnée par la couverture, (terme positif)
- . perte par atténuation due à la propagation du son depuis la couverture jusqu'au point récepteur considéré (terme négatif).

a) Energie sonore rayonnée par la couverture

a.a. énergie émise.

Pour une circulation de Q véhicules par heure sur une voie, à la vitesse V, la puissance acoustique à l'émission par mètre de voie est égale à :

$$(L_w)_{\text{m}} = L_w + 10 \log \frac{Q}{1000 V}$$

avec : L_w = puissance acoustique d'un véhicule moyen, v étant exprimé en Km/h

L'énergie, émise par un mètre de voie, va être répartie dans la couverture et y constituer un champ acoustique diffus. Les ondes seront soumises à deux causes d'affaiblissement principales, entre la source et le récepteur :

- . une perte d'énergie sous la couverture par absorption,
- . une perte d'énergie dans la couverture lors de sa transmission.

a.1- Perte d'énergie sous la couverture

. Absorption par les parois

Supposons que la couverture soit constituée de matériaux dont on connaît le facteur d'absorption α sabine (voir à ce sujet le fascicule « Recommandations techniques pour les ouvrages de protection contre le bruit » du *Guide du bruit*, paragraphe 3.3.4 page 35).

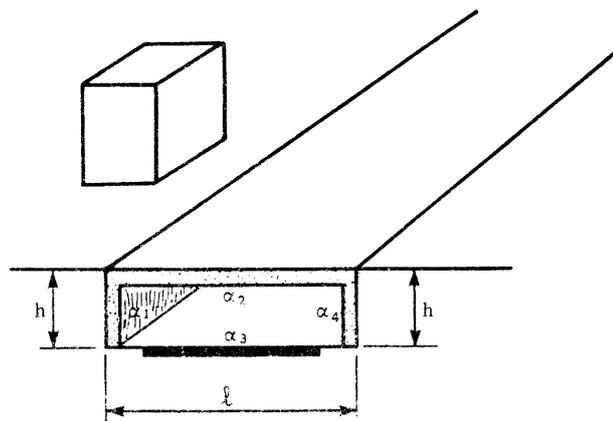


Schéma 4.111 : Chaque élément de paroi dans la couverture peut être affecté d'un facteur d'absorption α sabine. Ici, les parois verticales ont une absorption α_1 et α_3 , la surface de la couverture un facteur α_2 et la voie un facteur α_4

Partie IV : Méthode détaillée routes

On peut calculer la surface d'absorption équivalente à l'intérieur de la couverture.

Pour une couverture homogène dans toute sa longueur, nous aurons par mètre de longueur de tunnel :

$$A \text{ (parois)} = \sum_i (\lambda_i \cdot \alpha_i) = (h \cdot \alpha_1) + (h \cdot \alpha_2) + (\lambda \cdot \alpha_3) + (\lambda \cdot \alpha_4) \quad (38)$$

Dans le champ diffus qui règne sous une couverture, chaque rayon sonore est réfléchi sur les parois en grand nombre de fois. A chaque réflexion, il perd une part d'énergie acoustique. L'énergie absorbée est proportionnelle à A, ce terme « A » est donc directement utilisé dans les équations du champ diffus.

Remarque : Le facteur d'absorption α s est mesuré, pour l'ensemble des matériaux, par octave ou par tiers d'octave, selon la norme NFS 31 003.

Une liste des facteurs d'absorption des matériaux usuels peut être obtenue aisément dans les publications spécialisées, et notamment dans les cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.

Il est à noter que le facteur d'absorption α s utilisé ici, doit être mesuré à partir d'un spectre de bruit routier.

De plus, la valeur octave par octave peut être utilisée dans un calcul par programme informatique. Cependant, pour l'utilisation d'une méthode de calcul manuelle, même détaillée, cette indication est trop fine pour être exploitable.

Il conviendra donc d'utiliser un α sabine globalisé pour toutes les bandes de fréquence. Ce facteur d'absorption global peut être défini comme suit :

On peut écrire que l'énergie incidente globale s'exprime de la façon suivante en fonction de l'énergie par bande de fréquence, pour un bruit routier et une mesure en dB (A) :

$$W \text{ incidente} = \sum_i \left[10^{\frac{L(f)_i \text{ pondéré A}}{10}} \right]$$

avec : $L(f)_i$ = niveau de puissance dans chaque bande de fréquence (i).

De la même façon, il est possible d'écrire que l'énergie absorbée globale s'exprime en fonction de l'énergie absorbée dans chaque bande de fréquence (i) :

$$W \text{ absorbée} = \sum_i \left[\alpha(i) \cdot 10^{\frac{L(f)_i \text{ pondéré A}}{10}} \right]$$

avec : α_i = facteur d'absorption de chaque bande de fréquence = $\frac{W \text{ absorbée}}{W \text{ incidente}}$

Il vient l'expression du facteur d'absorption global d'un matériau, pour un spectre de bruit routier normalisé, mesuré en dB (A) :

$$\alpha \text{ global, bruit route} = \frac{\sum_i \left[\alpha(i) \cdot 10^{\frac{L(f)_i \text{ pondéré A}}{10}} \right]}{\sum_i \left[10^{\frac{L(f)_i \text{ pondéré A}}{10}} \right]} \quad (39)$$

Absorption par les véhicules

Les véhicules routiers en circulation sous un tunnel apportent une absorption acoustique. La valeur de cette absorption est proportionnelle à la concentration des véhicules sur la voie.

Pour les prévisions des niveaux sonores, on pourra considérer que la surface absorbante apportée par la présence des véhicules, est égale à la densité des véhicules multipliée par 1 m^2 (il s'agit ici d'une valeur moyenne approchée, utilisable en cas de trafic de véhicules légers ou des véhicules lourds, quelle que soit leur proposition), pour 1 m de longueur de tunnel.

$$A (\text{véhicules}) = \frac{Q}{1000 V} \cdot 1 \text{ m}^2 \quad (40)$$

Absorption par l'air

Dans un tunnel, loin des extrémités, on peut admettre que le champ acoustique est un champ diffus.

Un rayon sonore est soumis dans un tel champ à un grand nombre de réflexions sur les parois.

La théorie de EYRING nous enseigne que, dans une salle de volume V , le parcours moyen d'un rayon sonore à une longueur égale à $\frac{4V}{S}$ avec S , section de la salle dans le plan considéré.

Plus le trajet du rayon sonore est grand, plus l'air absorbe une part importante d'énergie sous la couverture.

Pour l'ensemble des rayons sonores contenus dans une tranche de couverture de 1 mètre de longueur, on démontre que la surface d'absorbant parfait équivalente à l'absorption par l'air est égale à approximativement $5 S \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ avec $S = h \cdot \lambda$ (selon le schéma 4.111).

On peut donc définir un terme représentant l'absorption par l'air et qui est fonction des dimensions du tunnel. Il est sensiblement égal à :

$$A (\text{air}) = 5 S \cdot 10^{-3} \text{ en m}^2 \quad S = \text{surface de la coupe de la tranchée} \quad (41)$$

Surface absorbante équivalente du tunnel

Cette surface est égale à la somme des trois termes précédents :

$$A = A (\text{parois}) + A (\text{véhicules}) + A (\text{air})$$

$$A = \sum_i (\lambda_i \cdot \alpha_i) + \left[\frac{Q}{1000 V} \times 1 \text{ m}^2 \right] + [5 S \cdot 10^{-3} \text{ m}^2] \quad (42)$$

« A » représente la surface d'absorption équivalente du tunnel exprimée en m^2 , pour 1 m de longueur de tunnel.

a.2. - Perte d'énergie par transmission dans la couverture

Le matériau utilisé pour réaliser la couverture des chaussées sera caractérisé par son indice d'affaiblissement en transmission « R » (voir le fascicule « Recommandations techniques pour les ouvrages de protection contre le bruit » du *Guide du bruit des Transports Terrestres*, paragraphe 3.3.1, page 31). Il est mesuré selon les indications de la norme NFS 31 002 et sera défini, pour ce qui nous concerne, à partir d'un spectre de bruit routier normalisé, mesuré en dB (A) et cumulé sur toutes les bandes de fréquences pour aboutir à l'expression d'un chiffre « R » global.

C'est cet indicateur qui représente la perte d'énergie par transmission dans la couverture.

Si la couverture est composée de matériaux différents (ex : une couverture en béton comportant des parties translucides en plastique), il convient d'affecter chaque matériau de surface S_i par un indice d'affaiblissement en transmission R_i .

Partie IV : Méthode détaillée routes

On peut alors définir la « transparence » du matériau comme :

$$\tau_i = 10^{-\frac{R_i}{10}}$$

Pour une tranche de tunnel de 1 mètre de longueur, on pourra alors faire la somme des transparences en fonction de la longueur des différents éléments de couverture :

$$\tau = \sum_i \tau_i \cdot \lambda_i$$

a.3 - Calcul de l'efficacité propre de la couverture

L'efficacité propre de la couverture est égale à la différence entre le niveau de puissance acoustique émis par la circulation et celui rayonné par la couverture.

Cette efficacité est également égale à la somme de l'efficacité en transmission pure et de la perte d'énergie par absorption sous la couverture.

Pour une tranche de tunnel de 1 mètre de longueur, on peut écrire :

$$\Delta L = R + 10 \log \frac{A}{\lambda} \quad (43)$$

avec : ΔL = efficacité propre de la couverture,

A = surface d'absorption équivalente dans une unité de longueur du tunnel en m^2

λ = largeur de la couverture en mètres.

Pour une couverture infiniment longue, l'efficacité propre de l'ensemble de la couverture peut être considérée comme égale à l'efficacité précédemment calculée pour 1 m de tunnel. Ce résultat approché est en effet valable si l'on admet que l'efficacité de la couverture est indépendante de l'angle d'incidence des rayons sonores.

Il est à noter que pour des couvertures lourdes (dalles supportant des véhicules), on pourra admettre, en première approximation, que R est très grand et que τ est voisin de 1. Dans ce cas, l'efficacité de la couverture est très grande.

Les calculs ci-dessus ne s'appliquent en fait qu'à des couvertures légères (rôle uniquement acoustique) ou des ensembles possédant des joints entre dalles, où qui présentent un indice « R » sur l'ensemble de leur surface voisin de 35 dB (A).

a.4 - Énergie rayonnée par la couverture

L'énergie rayonnée par la couverture est égale à la différence entre l'énergie émise par la circulation et l'efficacité propre de la couverture.

Le niveau d'énergie rayonné par la couverture sera donc le suivant, par unité de longueur de couverture :

$$(L'_W)_m = (L_W)_m \left[R + 10 \log \frac{A}{\lambda_c} \right] \text{ avec } \lambda_c = \text{longueur de la couverture}$$

Il est également possible de calculer le niveau sonore sous la couverture, par application des équations du champ diffus dans une salle : on aura pour 1 mètre de longueur de tunnel :

$$L_p \text{ (sous la couverture)} = \left[L_W + 10 \log \frac{Q}{1000v} \right] - 10 \log A + 6 \quad (44)$$

b) Niveau sonore en façade d'un bâtiment protégé par une couverture

Pour une couverture infiniment longue, l'énergie rayonnée par l'ensemble de la couverture est approximativement égale à celle rayonnée par 1 m de longueur de tunnel

Le niveau sonore en façade d'un bâtiment protégé par une couverture est égal au niveau rayonné par la couverture diminuée par l'atténuation due à la propagation du son depuis la couverture jusqu'au point récepteur.

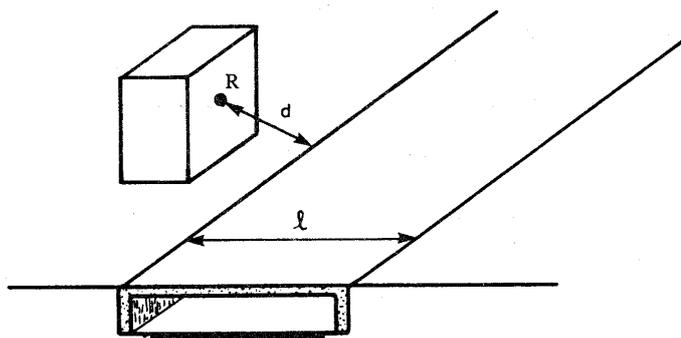


Schéma 4.112 : Récepteur en façade d'un bâtiment protégé par une couverture

On a vu qu'une circulation de Q véhicules par heure à une vitesse V , émet un niveau de puissance (L_w) m par mètre de longueur de voie qui s'exprime de la façon suivante par rapport au niveau de puissance d'un véhicule moyen L_w :

$$(L_w) m = L_w + 10 \log \frac{Q}{1000 V}$$

En présence de la couverture, les ondes sonores sont atténuées par absorption sous la couverture et par transmission dans la couverture. L'efficacité propre de la couverture a été définie pour 1 m de longueur de tunnel comme :

$$\Delta L = R + 10 \log \frac{A}{\ell} \quad \text{avec } \ell = \text{longueur de la couverture}$$

La couverture peut être assimilée à une voie circulée fictive, qui émettrait un niveau de puissance par unité de longueur de voie égale au niveau de puissance rayonné par la couverture.

Ainsi, le calcul du niveau sonore en façade sera effectué à l'aide des méthodes classiques exposées aux paragraphes 4.2 et 4.3 ci-dessus, pour une voie fictive au niveau du sol.

Pour la couverture infiniment longue, le niveau sonore en façade du bâtiment sera :

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{Q}{1000 V} - 12 \log \left(d + \frac{\ell_c}{3} \right) - \left[R + 10 \log \frac{A}{\ell} \right] + 3 \quad (45)$$

$$\text{ou } L_p = (L_w) m - \left[R + 10 \log \frac{A}{\ell} \right] - 12 \log \left(d + \frac{\ell_c}{3} \right) + 3 \quad (46)$$

$$\text{ou } L_p = (L'_w) m - 12 \log \left(d + \frac{\ell_c}{3} \right) + 3 \quad (47)$$

avec : $(L'_w) m$ = puissance acoustique rayonnée par 1 m de longueur de couverture.
 L_w = puissance acoustique d'un véhicule moyen.
 $(L_w) m$ = puissance acoustique par unité de longueur de voie.

Partie IV : Méthode détaillée routes

Il est également possible d'exprimer le niveau de pression en façade à partir du niveau de pression qui règne sous la couverture :

$$L_p = L_p \text{ (sous la couverture)} - 12 \log \left(d + \frac{\ell_c}{3} \right) - R + 10 \log \ell - 3 \quad (48)$$

avec : $L_p \text{ (sous couverture)} = L_w - 10 \log A + 6$,
 ΔL = efficacité propre de la couverture,
 d = distance entre le récepteur et la couverture,
 ℓ_c = largeur de la chaussée (assimilée ici à la largeur de la couverture).

5.3.2. Couverture de longueur limitée

Un récepteur situé en façade d'un bâtiment protégé par une couverture de longueur limitée percevra une énergie sonore qui sera la somme de trois termes :

- . l'énergie rayonnée par la couverture,
- . l'énergie en vue directe issue des parties non protégées de la source, de part et d'autre de la couverture,
- . l'énergie d'une source fictive représentant l'effet de sortie du tunnel.

a) La couverture est étudiée dans un plan particulier

En toute rigueur, il conviendrait de raisonner en angles solides sous lesquels on voit la couverture et les parties non protégées de la source de part et d'autre de la couverture, depuis le récepteur.

Cette rigueur n'est pas nécessaire pour les calculs de prévision et présente l'inconvénient de compliquer sensiblement les calculs.

De façon approchée, il est possible de mener l'ensemble du raisonnement qui conduit au calcul d'efficacité d'une couverture dans un plan particulier, sans altérer les résultats de façon excessive.

Ce plan particulier peut être défini comme celui qui passe par le point récepteur R où l'on cherche à connaître le niveau sonore et la ligne émettrice. Il est donc défini a priori en l'absence de la couverture.

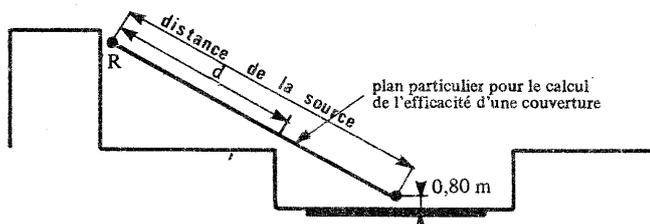


Schéma 4.113

Schéma 4.113 : Le plan est défini comme passant par le point récepteur R et la ligne émettrice, centrée sur l'axe de la voie et située à 0,80 m au-dessus du niveau de la chaussée.

Dans ce plan, il est possible de définir plusieurs zones caractéristiques de la façon dont le bruit va se propager jusqu'au récepteur R.

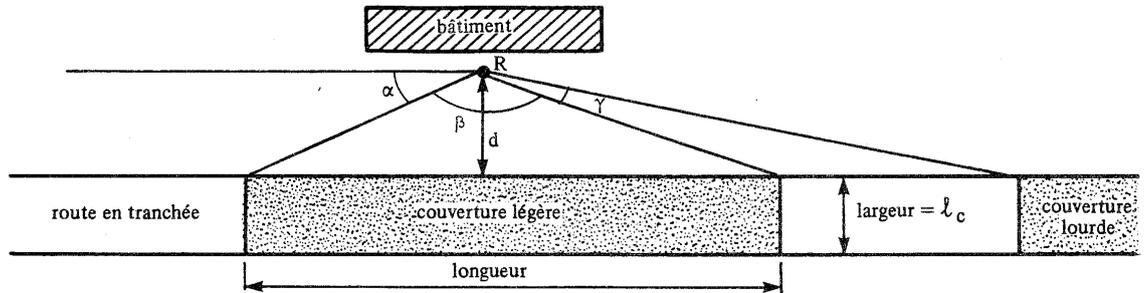


Schéma 4.114 : Vue en plan (dans le plan particulier défini ci-dessus).

Dans l'exemple ci-dessus :

- . la couverture est vue sous l'angle β
- . l'énergie directe parviendra, de part et d'autre de la couverture, sous les angles α et γ

b) Energie rayonnée par la couverture

Dans le paragraphe 5.3.1 ci-dessus, le niveau de puissance rayonné par 1 m de longueur de couverture a été indiqué comme égal à :

$$(L'_W)_m = (L_W)_m \left[R + 10 \log \frac{A}{\ell} \right]$$

De plus, l'efficacité de l'ensemble d'une couverture infiniment longue a été admise comme égale à l'efficacité de 1 m de longueur de couverture. Il en est de même pour l'énergie rayonnée.

L'énergie rayonnée par la couverture va se propager jusqu'à R comme l'aurait fait le bruit d'une route fictive située à l'emplacement de la couverture, émettant une énergie égale à l'énergie rayonnée par la couverture et ayant une longueur égale à celle de la couverture.

Tout se passe donc comme si nous avions à calculer le niveau sonore d'une route située à la distance d du point récepteur R et vue sous l'angle β . Soit pour un point récepteur R en façade d'un bâtiment :

$$L_p(\beta) = (L'_W)_m - 12 \log \left(d + \frac{\ell_c}{3} \right) + 10 \log \frac{\beta}{180^\circ} + 3 \quad (49)$$

$$\text{ou } L_p(\beta) = (L_W)_m \left[R + 10 \log \frac{A}{\ell} \right] - 12 \log \left(d + \frac{\ell_c}{3} \right) + 10 \log \frac{\beta}{180^\circ} + 3 \quad (50)$$

Pour un calcul en champs libre, il conviendrait de retrancher 3 dB (A) aux valeurs issues de l'utilisation des formules (49) et (50).

- avec :
- L_W = puissance acoustique d'un véhicule moyen,
 - $(L_W)_m$ = puissance acoustique par unité de longueur de voie,
 - R = indice d'affaiblissement en transmission de la couverture,
 - A = surface absorbante équivalente sous la couverture,
 - S_c = surface de la couverture,
 - L_p = niveau de pression en façade du bâtiment,
 - L_p' = niveau de pression sous la couverture.
 - $(L'_W)_m$ = puissance acoustique rayonnée par la couverture infiniment longue

Partie IV : Méthode détaillée routes

c) Energie directe parvenant des segments source non protégés par la couverture

Sous les angles α et γ du schéma 4.114 ci-dessus, l'énergie parvient au récepteur sans être affectée par la couverture.

On applique à cette énergie les équations d'extension finie, comme pour tout autre écran acoustique, telles que définies au paragraphe 5.2.4 ci-dessus.

En façade du bâtiment, on percevra donc un niveau sonore L tel que :

$$L(\alpha + \gamma) = L_W + 10 \log \frac{Q}{1000 V} - 12 \log \left(d + \frac{l_c}{3} \right) + 10 \log \frac{\alpha + \gamma}{180^\circ} + 3 \quad (51)$$

avec : d = distance de récepteur à la voie.
 l_c = largeur de la chaussée.

Eventuellement, dans le cas d'une route en tranchée, on pourra retrancher un affaiblissement en diffraction (à calculer selon les indications du paragraphe 5.2 ci-dessus) si le plan particulier dans lequel on raisonne coupe le bord de tranchée.

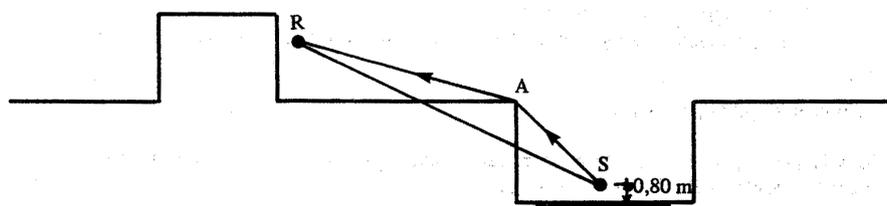


Schéma 4.115 : Si le plan SR coupe le bord de tranchée, il y a lieu de tenir compte d'un affaiblissement en diffraction pour le calcul de l'énergie parvenant par les côtés de la couverture.

d) Energie d'une source fictive représentant l'effet de sortie du tunnel

L'espace compris entre l'extrémité du tunnel et une distance d'environ 1 fois à 3 fois sa largeur, à l'intérieur du tunnel, constitue un espace intermédiaire où le champ acoustique n'est ni un champ direct (champ régnant à l'extérieur du tunnel), ni un champ diffus (champ régnant à l'intérieur, loin de l'extrémité). Dans cet espace intermédiaire le champ acoustique peut être assimilé à un champ diffus progressif.

Ce champ diffus progressif sera assimilé (par extension du théorème de HUYGENS [*]), à une source ponctuelle omnidirectionnelle située au centre de la surface constituant l'extrémité du tunnel.

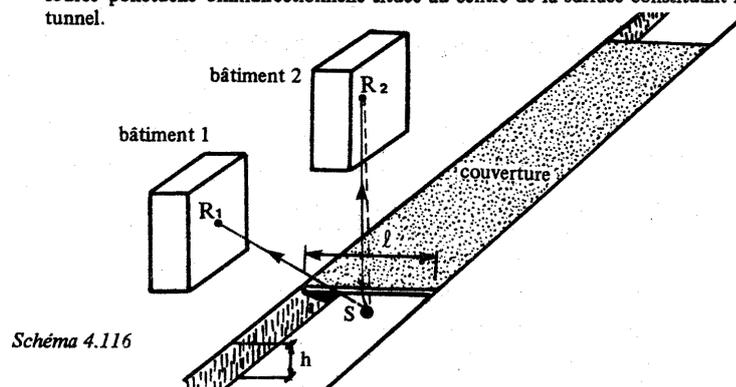


Schéma 4.116

(*) En toute rigueur, le théorème de HUYGENS s'applique entre deux champs diffus. Il permet de remplacer un des champs acoustiques par une courbe continue de sources ponctuelles omnidirectionnelles, monopolaires et indépendantes, situées à la frontière des deux champs acoustiques.

Le niveau de puissance de cette source ponctuelle devrait correspondre, de façon théorique, à celui du champ acoustique qu'elle remplace, pour les calculs.

De façon approchée, on peut admettre pour les calculs de prévision des niveaux sonores que cette source possède un niveau de puissance égal à :

$$(L_W) \text{ source ponctuelle} = (L_W) m - 10 \log \frac{A}{S} \quad (52)$$

avec : (L_W) source ponctuelle = niveau de puissance de cette source,
 $(L_W) m$ = niveau de puissance émise par la circulation, par 1m de voie.
 A = surface absorbante équivalente du tunnel, par unité de longueur de voie A,
 S = surface de la coupe du tunnel.

Le niveau de pression s'obtient ensuite par un calcul classique de propagation pour une source ponctuelle : propagation directe dans le cas du bâtiment 1 du schéma 4.116 (affaiblissement en $1/d^2$ en fonction de la distance d du récepteur à la source) et propagation comportant une diffraction sur l'arête de la couverture dans le cas du bâtiment 2 du schéma 4.116 (utilisation de l'abaque de MAEKAWA indiquée au 5.2.1 ci-dessus).

e) Niveau sonore en façade d'un bâtiment protégé par une couverture de longueur limitée de longueur limitée

Le niveau sonore résultant en façade du bâtiment protégé par une façade de longueur limitée est égal au cumul (selon les indications de l'annexe 2 ci-après) des trois contributions :

$$L_R = L_p(\beta) \oplus L_p(\alpha + \gamma) \oplus L_p(\text{sortie tunnel})$$

5.4 Couvertures partielles des chaussées

Le calcul de l'efficacité d'une couverture partielle, ou bien celui du niveau sonore en façade d'un bâtiment protégé par ce type d'écran acoustique, est basé sur des lois de nature comparable à celles utilisées pour le calcul d'efficacité des couvertures complètes des chaussées.

On peut cependant noter quelques différences importantes entre ces deux types d'écrans acoustiques :

- pour le calcul des couvertures partielles, on négligera la part d'énergie rayonnée par la couverture elle-même, et l'on ne prendra en compte que l'énergie acoustique qui se propage à travers les parties laissées ouvertes. En effet, alors que pour une couverture complète l'énergie rayonnée est l'une des deux sources importantes demeurant après réalisation de la protection (avec les segments non protégés, de part et d'autre de la couverture), pour une couverture partielle cette énergie rayonnée par la couverture elle-même est souvent faible devant l'énergie qui se propage à travers l'ouverture laissée libre ;
- La puissance acoustique émise par la voie sera décomposée en deux termes lors du calcul d'efficacité d'une couverture partielle :
 - . l'énergie directe qui se propage sans réflexions
 - . l'énergie diffuse qui se propage par la surface demeurée ouverte, après de multiples réflexions acoustiques.

5.4.1. Couverture partielle

On appelle couverture partielle d'une chaussée, par opposition à la couverture complète qui clôt l'espace autour de la ligne émettrice, une couverture qui offre une surface ouverte importante (supérieure à $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) [*].

Une couverture partielle sera décrite en coupe par sa section couverte S et son ouverture Ω

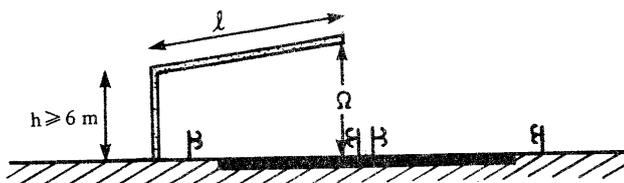


Schéma 4.117 : Couverture d'une demi-chaussée. Ici, $S = h + l$ et l'ouverture Ω aura la dimension figurée sur le schéma, pour un mètre de longueur de voie.

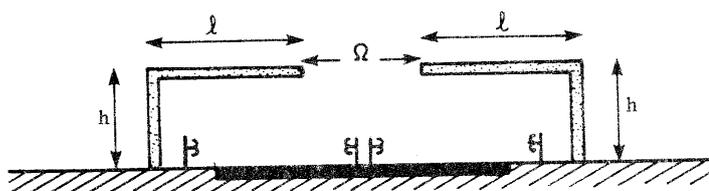


Schéma 4.118 : Deux couvertures partielles face à face. Ici, $S = 2(h + l)$ et l'ouverture Ω est figurée sur le schéma, pour un mètre de longueur de voie.

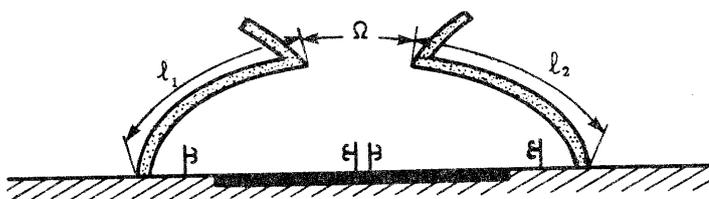


Schéma 4.119 : Couverture partielle. Ici, $S = l_1 + l_2$ et l'ouverture Ω est figurée sur le schéma.

(*) La présente méthode de calcul n'est pas applicable aux systèmes à conduits, aux systèmes à ouvertures dissipatives du type « damier phonique », ou aux couvertures comportant des ouvertures de petites dimensions traitées en matériaux absorbants.

5.4.2. Calcul de rayonnement direct à travers l'ouverture

a) Convention : angle de rayonnement direct

On appelle angle de rayonnement direct d'une ligne de sources S , l'angle θ dont le sommet coïncide avec la source, et qui passe par les extrémités de l'ouverture Ω

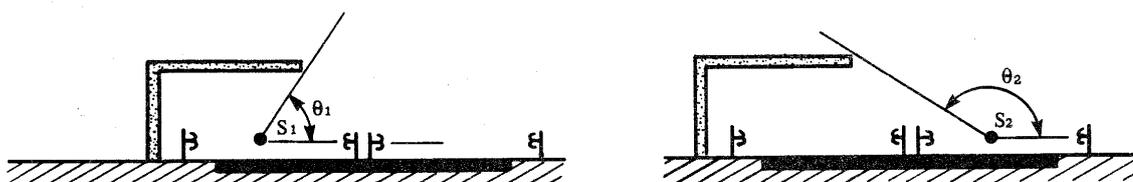


Schéma 4.120 : La route est ici décomposée en deux lignes de sources parallèles S_1 et S_2 . Les angles de rayonnement direct pour une couverture couvrant 1/2 chaussée sont ici figurés par les angles θ_1 et θ_2 respectivement pour les sources S_1 et S_2 .

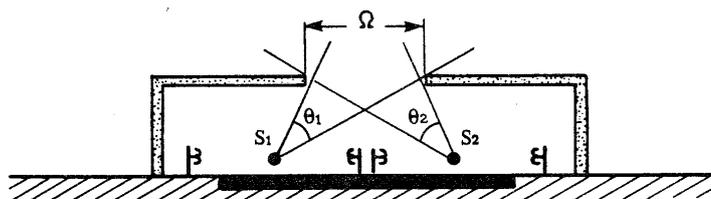


Schéma 4.121 : La route est encore décomposée en deux lignes de sources S_1 et S_2 . Pour deux couvertures partielles laissant une ouverture Ω les angles de rayonnement direct seront tels que θ_1 et θ_2 figurés sur le schéma, respectivement pour les sources S_1 et S_2 .

On appelle angle de rayonnement direct θ' d'une source image S' l'angle dont le sommet coïncide avec la source image S' (symétrique de la source S par rapport à une paroi), et qui passe par les extrémités de l'ouverture Ω

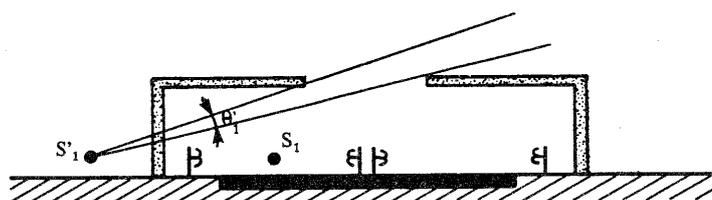


Schéma 4.122 : La source S_1 a une symétrique S'_1 par rapport à la paroi verticale. Pour cette source image S'_1 l'angle de rayonnement direct est égal à θ'_1 tel que figuré sur le schéma.

b) Calcul du niveau sonore par rayonnement direct

Chaque chaussée, pour une voie de circulation à 2 chaussées séparées, ou chaque sens de circulation pour une voie à une seule chaussée, peut être assimilée à une ligne émettrice située à 0,80 mètre au-dessus du niveau de la chaussée.

Partie IV : Méthode détaillée routes

Pour un récepteur R situé en façade d'un bâtiment protégé par une couverture partielle, le niveau sonore par rayonnement direct sera calculé en considérant que l'énergie émise par les lignes émettrices est diffractée par les bords de la couverture partielle, comme dans les cas d'écrans verticaux (voir paragraphe 5.2).

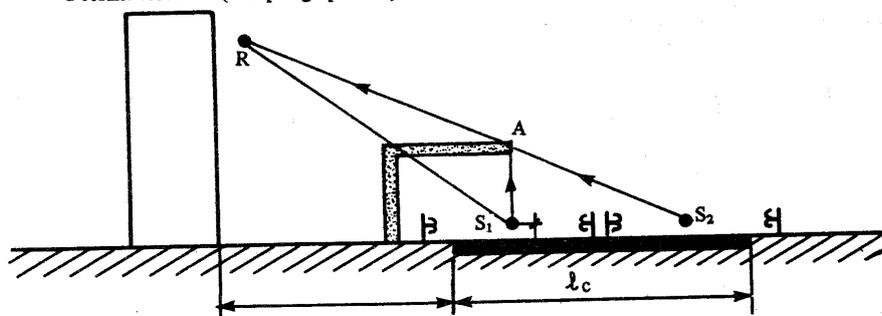


Schéma 4.123 : Diffraction du rayonnement direct par une couverture partielle.

Pour la source S_1 , l'atténuation en diffraction apportée au rayonnement direct (donc à la part d'énergie contenue dans l'angle de rayonnement direct θ_1) est calculée par application de l'abaque de diffraction 4.75, comme pour un écran vertical. La différence de marche utilisée est ici : $\delta_1 = S_1 A + AR - S_1 R$ pour la source S_1 .

Pour la source S_2 , on effectue le même calcul avec une atténuation en diffraction calculée à partir de la différence de marche $\delta_2 = S_2 A + AR - S_2 R$.

Supposons que pour une ligne de sources S_1 , l'atténuation en diffraction lue sur l'abaque 4.75 soit égale à ΔL_1 , le niveau sonore en R dû à cette source peut s'écrire :

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{Q}{1000 V} - 12 \log \left(d + \frac{l_c}{3} \right) + 10 \log \frac{\beta}{180} - \Delta L_1 + 3 \quad (53)$$

avec : L_w = puissance acoustique d'un véhicule moyen,
 d = distance du récepteur au bord de plateforme,
 l_c = largeur de la chaussée,
 β = angle sous lequel l'énergie parvient à R après diffraction sur le sommet de la couverture,
 ΔL_1 = efficacité en diffraction de la couverture assimilée à un écran vertical et lue sur l'abaque 4.75.

Pour un récepteur en champs libre, il conviendrait de retrancher 3 dB (A) au niveau sonore calculé à l'aide de la formule (53).

Le calcul sera effectué pour la ou les lignes de sources auxquelles on a assimilé la circulation.

Pour un calcul précis, il sera également effectué pour les sources images du premier ordre. Il est en effet souvent inutile d'aller jusqu'à calculer les sources images du second ordre, et ce d'autant plus que dans la suite de la méthode exposée ici, nous prendrons en compte l'existence d'un champ diffus superposé au champ direct.

Pour le calcul du rayonnement direct pour les lignes sources images, si la paroi réfléchissante possède un facteur d'absorption α , on ajoutera algébriquement au niveau sonore calculé pour ces sources la valeur $10 \log (1 - \alpha)$.

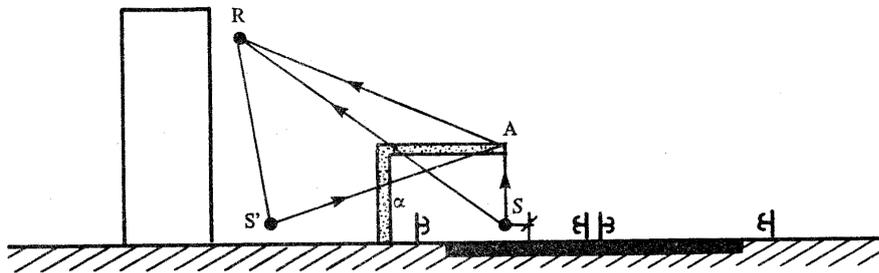


Schéma 4.124 : Niveau sonore correspondant au rayonnement direct.

Dans le schéma 4.124, le rayonnement direct sera calculé pour la source S en considérant une différence de marche $\delta = SA + AR - SR$ et en utilisant l'abaque 4.75.

Ce niveau sonore sera ensuite cumulé avec le niveau issu de S' symétrique de S par rapport à la paroi, dont l'atténuation en diffraction ΔL sera calculé sur la base d'une différence de marche $\delta = S'A + AR - S'R$ et donc le niveau sera :

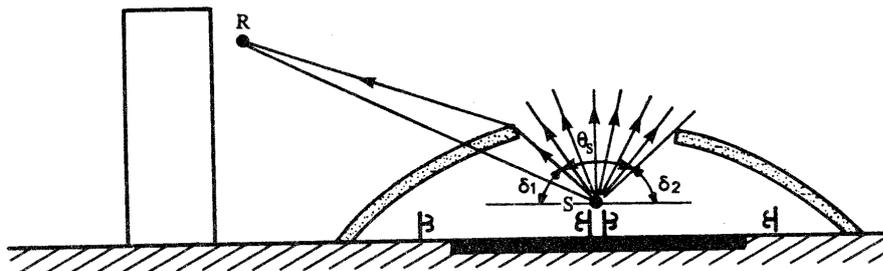
$$L_p = L_w + 10 \log \frac{Q}{1000 V} - 12 \log \left(d + \frac{l_a}{3} \right) + 10 \log \frac{\beta}{180^\circ} - \Delta L + 10 \log (1 - \alpha) + 3 \quad (54)$$

Pour un récepteur en champs libre, il convient de retrancher 3 dB (A) à ce résultat.

avec : β = angle sous lequel on voit la couverture depuis R (voir paragraphe 4.3.2 a ou schéma 4.114).

5.4.3. Calcul du rayonnement diffus

Pour le calcul précédent, indiqué au paragraphe 5.4.2 précédent, la puissance acoustique de l'ensemble des rayons directs issus d'une ligne de sources a été prise en compte, ainsi que la puissance du symétrique de cette ligne émettrice par rapport à la paroi.

Schéma 4.125 : Une partie de l'énergie émise par la source S n'a cependant pas été prise en compte : c'est celle qui se propage depuis S, dans les angles δ_1 et δ_2

Partie IV : Méthode détaillée routes

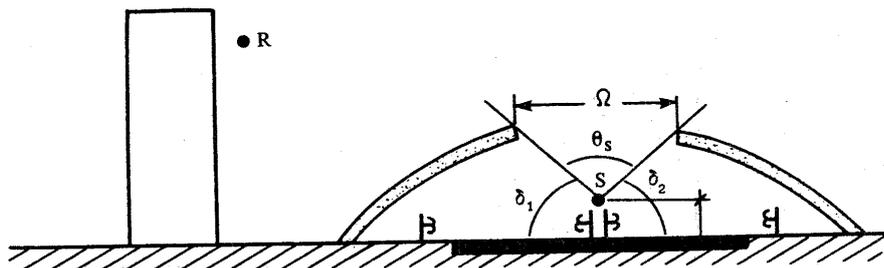


Schéma 4.126 : L'énergie émise par la source S dans les angles δ_1 et δ_2 va se réfléchir un grand nombre de fois avant de « sortir » par l'ouverture Ω et se propager jusqu'au récepteur R. Cette énergie va se répartir sous la couverture et constituer un champ acoustique qui sera, ici, assimilé à un champ diffus.

La proportion d'énergie qui va constituer ce champ diffus sera fonction de $(1 - \frac{\theta_s}{\pi})$.

Le tunnel constitué par l'ensemble « couverture-parois verticales-chaussée » peut être caractérisé par une surface d'absorption équivalente par unité de longueur de voie, qui, comme pour les couvertures complètes, est la somme de trois termes (on ne tiendra pas compte ici de l'ouverture Ω) :

. absorption par les parois (voir paragraphe 5.3.1)

$$A \text{ (parois)} = \sum_i [\ell_i \cdot \alpha_i] = \ell_1 \cdot \alpha_1 + \ell_2 \cdot \alpha_2 + 2h \cdot \alpha_3 + \ell \alpha_4$$

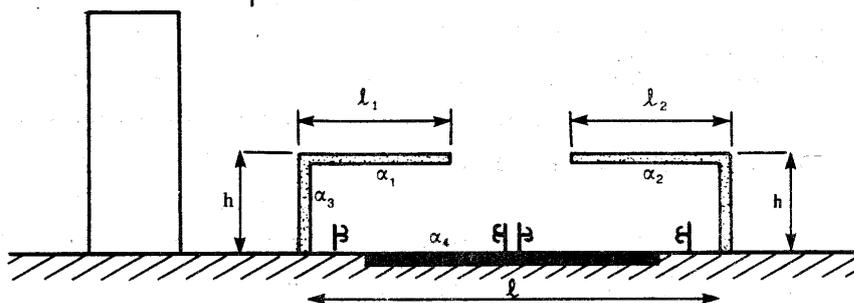


Schéma 4.127 : Absorption par les parois

. absorption par les véhicules A (véhicules) = $\frac{Q}{1000 V} \cdot 1 \text{ m}^2$

. absorption par l'air A (air) = $5 S \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ avec $S = h \cdot \ell$

La puissance acoustique diffuse sous la couverture s'exprime par la relation suivante :

pour « n » lignes de sources :
$$W' = \sum_n \left[W_n \left(1 - \frac{\theta_n + \theta'_n}{180^\circ} \right) \right] \left[\frac{\Omega}{A + \Omega} \right] \quad (55)$$

avec : W_n = puissance acoustique à l'émission de la source n, par unité de longueur de voie,

θ_n = angle de rayonnement direct pour la source, n

θ'_n = angle de rayonnement direct pour la source symétrique par rapport à la paroi apportant la réflexion prépondérante parmi toutes les sources réfléchies d'ordre 1,

Ω = surface de l'ouverture, par unité de longueur de voie,

A = surface absorbante équivalente par unité de longueur de voie.

Le niveau de puissance dans ce champ acoustique diffus s'écrit :

$$L_{w'} = 10 \log \frac{\Omega}{A + \Omega} + 10 \log \sum_n \left[10^{\frac{L_{wn}}{10}} \left(1 - \frac{\theta_n + \theta'_n}{180^\circ} \right) \right] \quad (56)$$

Par extension du théorème de HUYGENS (voir paragraphe 5.3.2 d ci-dessus), le champ diffus qui existe sous la couverture est assimilé, pour une longueur unitaire de la voie étudiée, à une source ponctuelle omnidirectionnelle de puissance acoustique égale à celle du champ diffus telle que calculée ci-dessus (pour l'ensemble de la longueur de la couverture, le champ acoustique sera donc assimilé à une ligne ou segment de ligne de sources).

Le calcul du niveau sonore L_p perçu par un récepteur R en façade d'un bâtiment protégé par une couverture partielle, et due au rayonnement diffus, peut donc être assimilé au calcul du niveau sonore dû à une source fictive que l'on place dans l'axe de l'ouverture Ω

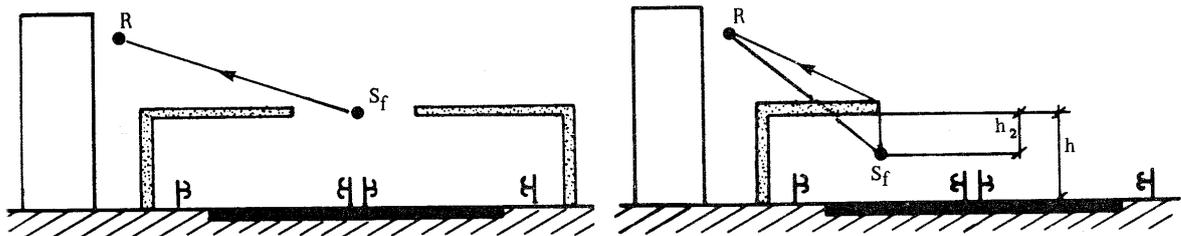


Schéma 4.128 : Situation de la source fictive à laquelle on assimile le champ diffus sous la couverture.

Le niveau sonore L_p dû à ce champ diffus, au point récepteur R s'écrit : pour une couverture partielle infiniment longue.

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{Q}{1000 V} + 10 \log \left(1 - \frac{\theta n + \theta' n}{180} \right) + 10 \log \left(\frac{\Omega}{A + \Omega} \right) - 12 \log \left(d + \frac{1c}{3} \right) + 3 \quad (57)$$

S'il existe une diffraction ΔL , on retranchera encore la valeur de ΔL du niveau L_p calculé avec la formule (57). Pour un calcul en champ libre, il conviendrait de plus d'oter 3 dB (A).

5.4.4. Calcul du niveau sonore global en prévision d'une couverture partielle de longueur limitée.

Le niveau sonore global perçu par le point R en façade d'un bâtiment protégé par une couverture partielle, sera égal au cumul des énergies parvenant en R, soit :

- . énergie se propageant par rayonnement direct, et réfléchi d'ordre 1.
- . énergie diffuse,
- . énergie perçue de façon directe à partir des extrémités de la couverture partielle, par les segments de route non protégés par la couverture.

Dans le plan passant par le point récepteur R, et la ligne de source simulant la route, on peut définir deux zones :

- . sous les angles α et γ l'énergie parvient de façon directe,
- . sous l'angle β l'énergie parvient après diffraction sur la couverture. Elle est la somme de deux termes : énergie rayonnée directement et énergie diffuse.

Le niveau sonore en un point récepteur R en façade sera égale au cumul des niveaux sonores perçus sous les angles α , γ et β

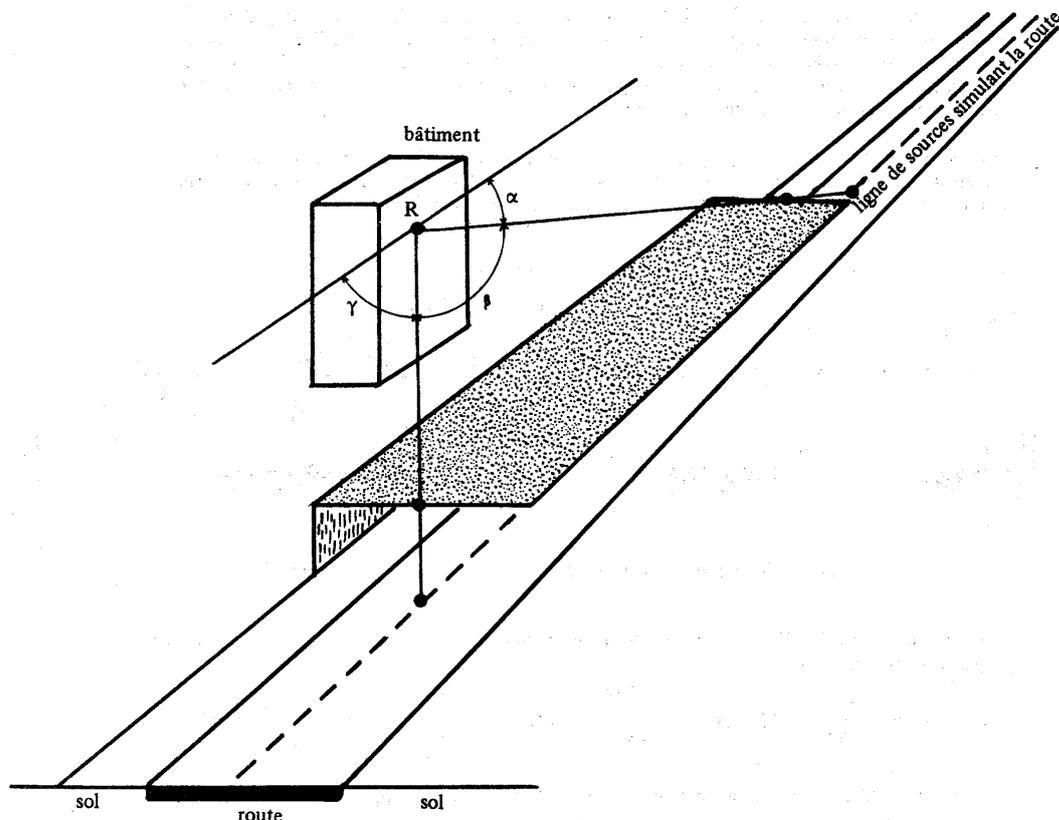


Schéma 4.129 : . sous les angles α et γ : énergie directe,
 . sous l'angle β : énergie rayonnée directement et énergie diffuse sous la couverture.

. sous les angles ($\alpha + \gamma$) il est possible d'écrire :

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{Q}{1000 V} - 12 \log \left(d + \frac{l_c}{3} \right) + 10 \log \frac{\alpha + \beta}{180^\circ} + 3$$

. sous l'angle β on peut écrire :

$$L_p = L(\text{direct}) \oplus L(\text{réfléchi}) \oplus L(\text{diffus})$$

$$\text{avec : } L(\text{direct}) = L_w + 10 \log \frac{Q}{1000 V} - 12 \log \left(d + \frac{l_c}{3} \right) + 10 \log \frac{\beta}{180^\circ} - \Delta L + 3$$

$$L(\text{réfléchi}) = L_w + 10 \log \frac{Q}{1000 V} - 12 \log \left(d + \frac{l_c}{3} \right) + 10 \log \frac{\beta}{180^\circ} - \Delta L' + 10 \log (1 - \alpha) + 3$$

$$L(\text{diffus}) = L_w + 10 \log \frac{Q}{1000 V} - 10 \log \left(1 - \frac{\theta + \theta'}{180^\circ} \right) + 10 \log \frac{\Omega}{A + \Omega} + 3$$

\oplus = notation de cumul selon les indications de l'annexe II.

G-Éléments de validation

La validation de la NMPB-Routes-2008 s'est déroulée en deux temps. Tout d'abord chaque changement a été évalué sur des configurations académiques par rapport à une méthode de référence. Selon le cas, la méthode des rayons, celle des éléments de frontière, ou l'équation parabolique a servi de référence (Cf. [CSTB2002][CSTB2007][LRS2003a][LRS2003b][LRS2004]).

Dans un deuxième temps, la méthode dans son ensemble a été confrontée à des mesures réalisées sur 6 sites réels dont les profils en travers sont représentatifs des topographies courantes (Cf. [LRS2005][LRS2007]) :

- route en déblai : sites de SaintOmer (67) et de Mulhouse (68) ;
- route en viaduc : site de Saint Omer (62) ;
- route à flanc de vallée : site de Massiac (15) ;
- mur anti-bruit : site de Couvron (02) ;
- modelé de terrain : site de Mer (41).

L'Annexe H présente succinctement les sites retenus.

Pour chaque site, un levé topographique a été effectué. Les niveaux sonores en 9 points au moins ont été enregistrés en L_{eq} court par bande de tiers d'octave pendant au moins deux semaines, en parallèle avec des mesures météorologiques. Les relevés météorologiques ont permis de calculer la rose des occurrences des conditions favorables. Les mesures de bruit dépouillées donnent des valeurs d'atténuation par rapport à un microphone de référence pour plusieurs périodes réglementaires Jour (6h-22h) ou Nuit (22h-6h), en L_{Aeq} .

Malgré tout le soin qui a été apporté au protocole de mesure, obtenir des mesures valides au-delà de 400 m s'avère difficile, même en présence de forts trafics. Au terme du traitement des mesures, les récepteurs considérés permettent de définir 310 atténuations par rapport à un récepteur de référence, qui est le plus proche de la route. Chaque atténuation correspond à une période de moyen terme Jour (6h-22) ou Nuit (22h-6h).

Chaque site a été simulé à la fois selon la NMPB-Routes-96 et la NMPB-Routes-2008. La comparaison avec les mesures donne 310 écarts entre l'atténuation mesurée et l'atténuation calculée. La répartition des écarts est représentée à la Figure G.1 pour la NMPB-Routes-96 et à la Figure G.2 pour la NMPB-Routes-2008. L'étude statistique de ces écarts mesure/calcul mène aux conclusions suivantes :

- La moyenne des écarts mesure/calcul NMPB-Routes-2008 est significativement¹ plus petite que celle de la NMPB-Routes-96. En d'autres termes, la justesse de la NMPB-Routes-2008 est meilleure que celle de la NMPB-Routes-96 (Cf. Figure G.1 et Figure G.2) ;
- Les dispersions des écarts mesure/calcul ne sont pas significativement² différentes entre les deux méthodes : la NMPB-Routes-2008 ne modifie pas la précision de la méthode de calcul de bruit par rapport à la NMPB-Routes-96 ;
- Les écarts mesure/calcul NMPB-Routes-2008 suivent une loi normale³, contrairement à ceux de la NMPB-Routes-96⁴ ;
- Sur les 310 couples d'écarts d'atténuations mesure/calcul pour la NMPB-Routes-2008, 32 % sont supérieurs à 2 dB en valeur absolue, contre 50 % avec la NMPB-Routes-96 (Cf. Figure G.3).

¹ Test statistique de Student-Welsh : $p_value < 5\%$ (hypothèse alternative H1 : les moyennes sont différentes). Test statistique de Wilcoxon : $p_value < 5\%$ (hypothèse alternative H1 : les lois des distributions diffèrent).

² Test statistique de Bartlett : $p_value > 5\%$ (hypothèse alternative H1 : les variances sont différentes).

³ Test statistique de Shapiro-Wilk : $p_value > 5\%$ (hypothèse alternative H1 : les écarts ne suivent pas une loi normale).

⁴ Test statistique de Shapiro-Wilk : $p_value < 5\%$ (hypothèse alternative H1 : les écarts ne suivent pas une loi normale).

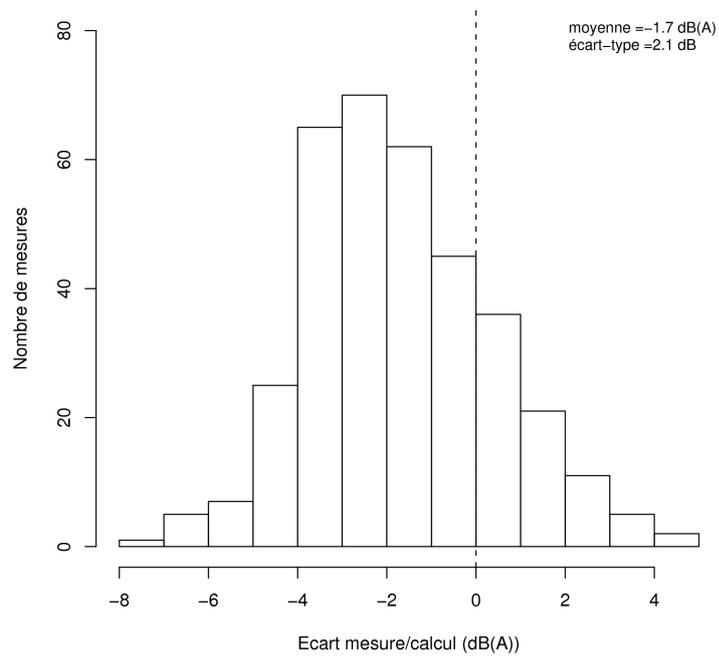


FIG. G.1 – Histogramme des écarts entre les atténuations mesurées et calculées pour la NMPB-Routes-96.

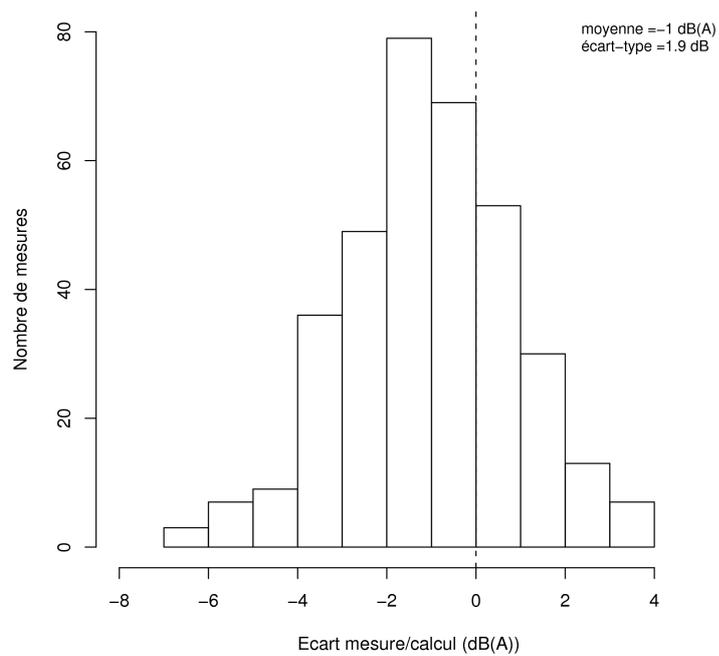


FIG. G.2 – Histogramme des écarts entre les atténuations mesurées et calculées pour la NMPB-Routes-2008.

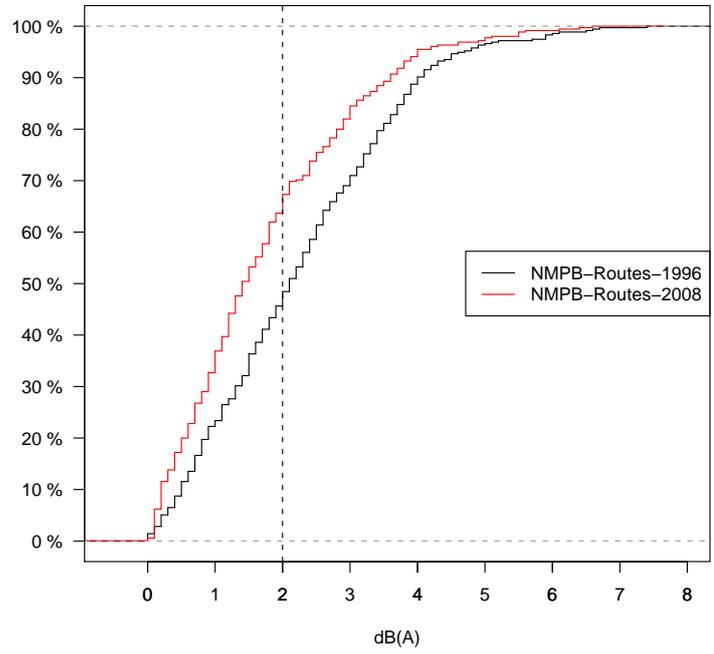


FIG. G.3 – Fonction de répartition des écarts mesure/calcul

H - Description des sites de la validation

Les résultats des mesures obtenus dans le cadre de la révision et de la définition des nouvelles formules de la méthode de prévision du bruit résultent de campagnes de mesures réalisées sur des sites représentatifs des situations rencontrées par les ingénieurs routiers. Ils représentent donc des cas types les plus couramment rencontrés sur le réseau routier national. Les paragraphes suivants détaillent ces différentes configurations.

H.1 - Site de Mulhouse

Ce site se trouve à une dizaine de kilomètres au nord de Mulhouse, en bordure de l'autoroute A 35, entre Baldersheim et Battenheim. L'autoroute A 35 est une 2x2 voies avec une pente nulle présentant un déblai de 2 m de profondeur et sur une longueur d'environ 2 km. Au delà de l'arête du déblai, la surface de mesure est pratiquement plate (dénivelée maximale de 15 cm) et de même nature sur 500 m de largeur (Cf. Figure H.1).

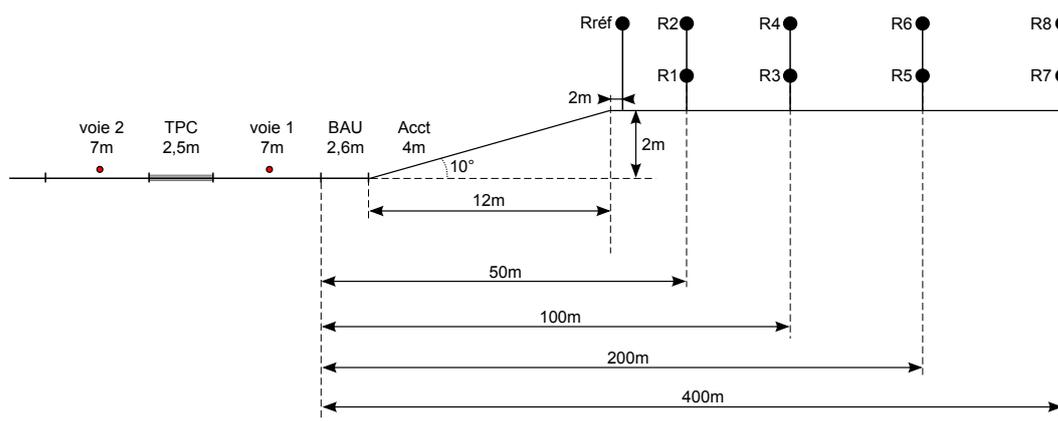


FIG. H.1 – Profil en travers du site de Mulhouse et position des capteurs

L'instrumentation météorologique du site nécessite la mise en place de 3 mâts, dont 2 positionnés à proximité de l'arête du déblai pour analyser les perturbations d'écoulement dans la zone proche de l'obstacle créé par le talus. Le schéma ci-dessus montre une coupe approximative du site passant par chaque mât météorologique. Les capteurs sont placés soit à 2 m soit à 5 m au-dessus du sol.

H.2 - Site de Massiac

La coupe représentée à la Figure H.2 est celle du lieu de la campagne de mesures situé à 80 km au sud de Clermont-Ferrand, en bordure de l'autoroute A 75, à 4 km au sud de Massiac. Les récepteurs sont comme précédemment placés à 2 et 5 mètres au-dessus du sol.

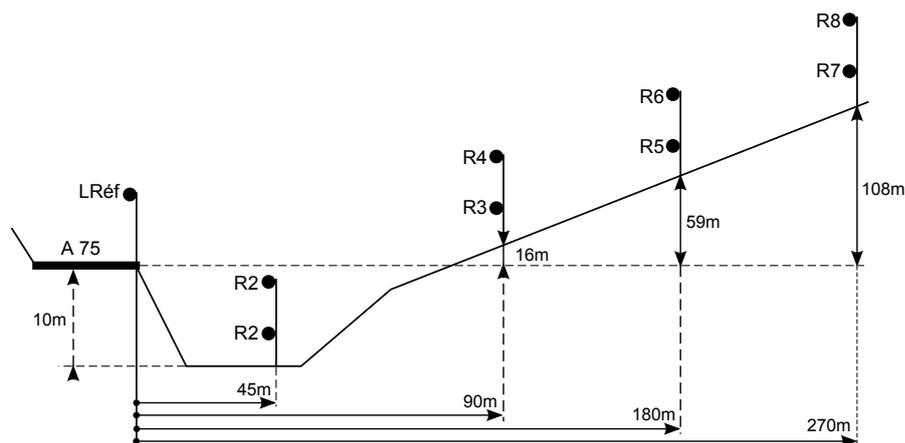


FIG. H.2 – Profil en travers du site de Massiac et position des capteurs

L'instrumentation météorologique du site a été réalisée par la mise en place de 3 mâts répartis le long de la ligne de mesure acoustique, afin de tester ultérieurement l'homogénéité micrométéorologique du site. Le schéma de la Figure H.2 montre une coupe approximative du site passant par chaque mât météorologique. Les résultats obtenus dans le cas de la diffraction par une plate forme horizontale sont résumés par le tableau suivant (Récepteur R2) :

NMPB-Routes-96	3 dB(A)
NMPB-Routes-2008	<2 dB(A)

H.3-Site de Mer

Le troisième site expérimental testé dans ce document est à proximité de l'autoroute A 10 sur la commune de Mer (41). Le terrain a une forme d'arrondi qui part de l'autoroute, culmine à 3 m par rapport à l'autoroute à 150 m puis redescend au niveau de celle-ci vers 300 m (Cf. Figure H.3).

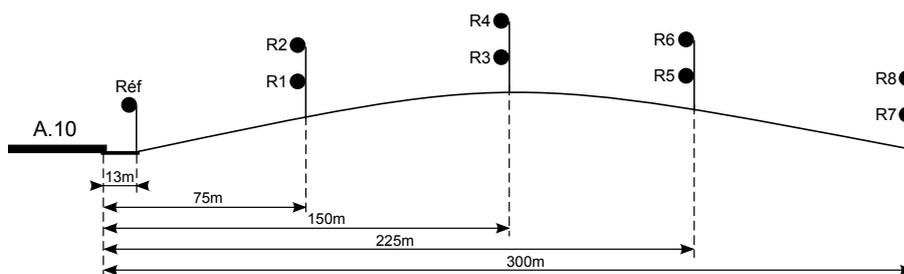


FIG. H.3 – Profil en travers du site de Mer et position des capteurs

Les informations acoustiques sont mesurées à 4 distances et à 2 hauteurs différentes (2 m et 5 m au-dessus du sol naturel). Un point de mesure situé à proximité immédiate de la voie routière constitue une valeur de référence, ce qui donne en tout 9 points de mesures.

H.4-Site de Couvron

Les campagnes du quatrième site se sont déroulées en bordure de l'autoroute A 26, sur la commune de Couvron. Au droit du site retenu, au niveau du profil 202+350, l'autoroute est en déblai et au niveau du terrain naturel se trouve un écran composé de plaques de béton, d'une hauteur de 2,50 mètres. La longueur de l'écran est de 1120 mètres. La coupe retenue est représentée à la Figure H.4 :

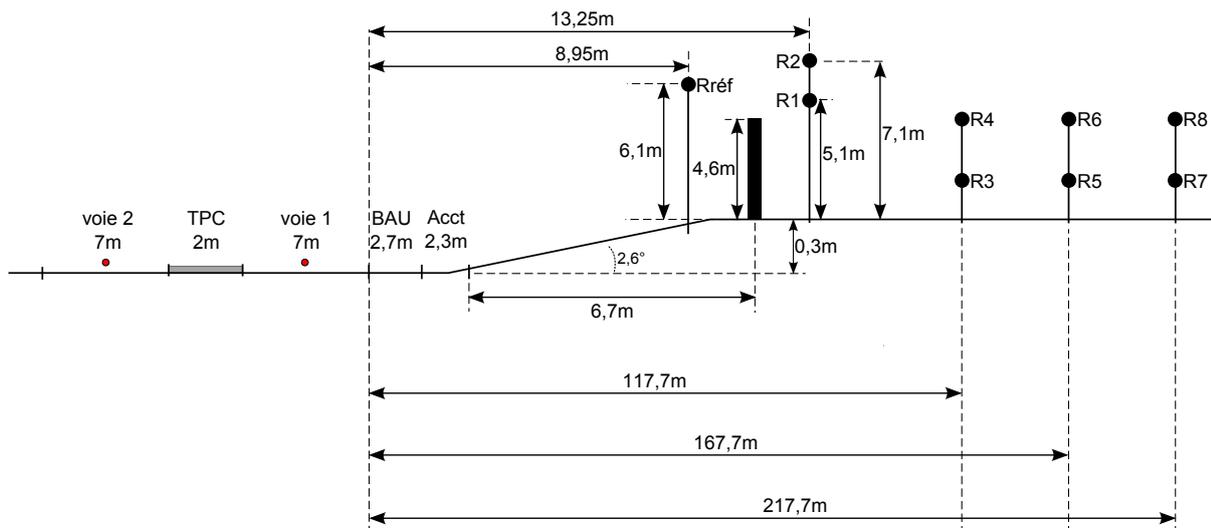


FIG. H.4 – Profil en travers du site de Couvron et position des capteurs

Sur ce site les microphones sont implantés à l’ouest de la voie, à partir du bord du déblai (point de référence), puis à des distances de 100 mètres, 150 mètres et jusqu’à 200 mètres de l’écran. La ligne de mesure fait un angle d’environ 123° avec l’écran et un angle de 5° par rapport au nord. Compte-tenu du faible trafic circulant sur l’autoroute (environ 13 500 véh/j dont 30% de poids lourds) et de la présence de l’écran, la distance maximale des récepteurs par rapport à l’écran a été limitée à 200 mètres, le rapport signal/bruit étant trop faible pour des points plus éloignés. Chaque mât acoustique comporte deux microphones placés respectivement à 2 mètres et 5 mètres par rapport au sol, excepté le point de référence ne comportant qu’un microphone situé à 4 mètres du sol et le point juste derrière l’écran comportant deux microphones situés à 3 mètres et 5 mètres.

H.5-Site de Molsheim

La cinquième campagne d’expérimentation s’est déroulée le long de l’autoroute A 352, reliant Molsheim à Strasbourg, sur la commune d’Altorf. La Figure H.5 montre la coupe du site.

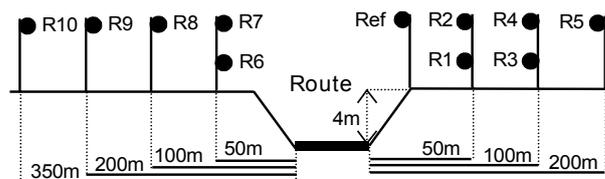


FIG. H.5 – Profil en travers du site de Molsheim et position des capteurs

L’angle de vue de la voie pour chaque récepteur est de 180°. Les microphones sont alignés selon les directions 350° pour le côté Sud (direction choisie perpendiculaire à la voie) et de 180° pour le côté Nord (direction imposée par la configuration des champs de culture déjà ensemencés). Le mât météorologique a été placé dans un endroit où les conditions relevées sont représentatives des conditions moyennes entre la source routière et les différents récepteurs.

H.6-Site de Saint Omer

La sixième et dernier site d’expérimentation est à 40 km au sud-est de Calais, en bordure de l’autoroute A 26, à 6 km au sud-ouest de Saint-Omer. Sur ce site, l’autoroute A26 est une 2x2 voies et traverse perpendiculairement le ravin de Pihem au PR 37+200. L’autoroute A26 surplombe le fond du ravin d’environ 32 m. Les points de mesures sont implantés à flanc de colline parallèlement à l’autoroute, avec un dénivelé variant

de 16 à 32 m par rapport au viaduc. Le site est chahuté et le sol est absorbant parsemé de végétation rase. L'angle de vue de la voie est inférieur à 80°.

Les mesures ont été effectuées sur deux hauteurs à 2 m et 5 m au dessus du sol, en champ libre, de part et d'autre du mât météorologique. L'emplacement des différents points de mesures et leurs dénominations sont donnés Figure H.6.

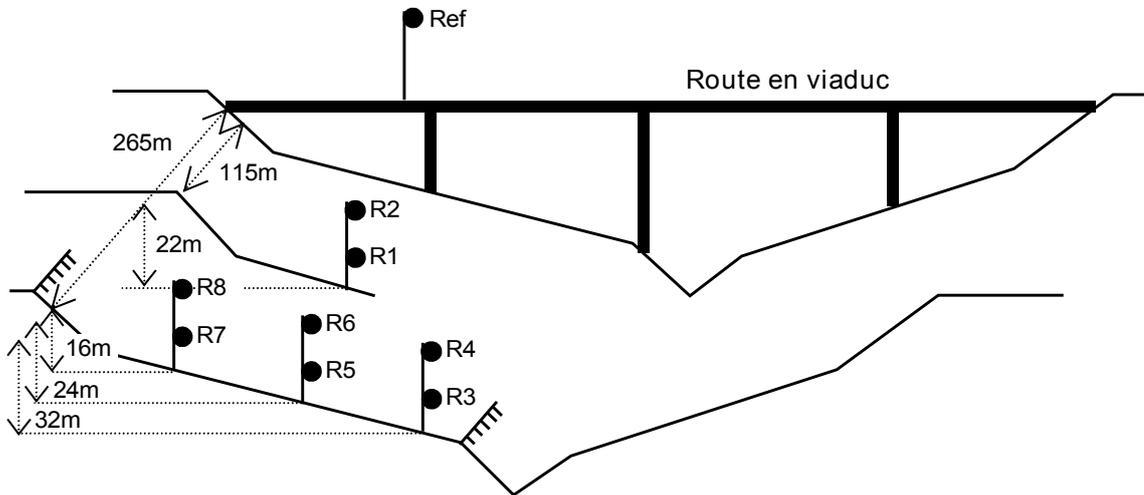


FIG. H.6 – Profil en travers du site de Saint Omer et position des capteurs

L'instrumentation météorologique du site a été réalisée par la mise en place d'un mât entre les lignes de mesures acoustiques. La Figure H.6 montre la position du mât météorologique sur le site. Le chiffre au niveau de chaque étage indique la position des capteurs au dessus du sol. Les résultats obtenus dans le cas de la diffraction par une plate forme horizontale sont résumés par le tableau suivant :

R1 et R2	NMPB-Routes-96	3 dB(A)
	NMPB-Routes-2008	< 2 dB(A)
R5 et R6	NMPB-Routes-96	4-5 dB(A)
	NMPB-Routes-2008	< 2 dB(A)
R7 et R8	NMPB-Routes-96	4-5 dB(A)
	NMPB-Routes-2008	3 dB(A)

I-Exemples d'application de la NMPB-Routes-2008

Cette annexe a pour but d'illustrer l'utilisation de la NMPB-Routes-2008. Elle doit permettre au lecteur de se familiariser avec la méthode, le déroulement de son application et ses formules. L'organigramme de la méthode est disponible à l'Annexe A.

Dans les exemples qui suivent, on suppose que les occurrences du Tableau I.1 s'appliquent.

Angle (°)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
Jour (6h-22h)	30	28	26	25	27	28	30	32	34	35	36	35	34	32	32	32	32	32
Nuit (22h-6h)	85	85	88	90	92	92	92	92	92	93	94	96	97	96	94	91	88	86

TAB. I.1 – Occurrences de conditions favorables en pourcentage en fonction de l'angle de l'axe source récepteur par rapport au nord (\vec{N}, \vec{RS}).

Pour la mesure des angles, le plan horizontal est orienté dans le sens des aiguilles d'une montre.

Pour des raisons de lisibilité, les différentes coupes et vues de dessus présentées dans cette annexe sont tracées dans des repères non orthonormés. Elles ne sont donc pas utilisables directement pour déterminer si une source et un récepteur sont en vue directe, ou pour calculer des angles.

I.1-Site en léger déblai

On considère le site en déblai représenté sur la Figure I.1 et la Figure I.2. Une seule voie de circulation est étudiée. La ligne-source associée est placée au centre de la voie. On choisit de la décomposer de façon équidistante. La distance euclidienne entre le récepteur le plus proche et la ligne-source impose un pas de distance inférieur à 8.8 m. Par souci de simplification, le pas est fixé à 5 m. Parmi les segments sources, on s'intéresse uniquement au segment S1 centré au droit des récepteurs et à S2 situé à 1450 m de S1. L'axe de la voie définit un angle par rapport au nord (\vec{N}, \vec{Oy}) de 130°.

On suppose que l'émission sonore a été déterminée conformément à [Abq2008] et que le niveau de puissance d'un segment source est de 80 dB(A). Le revêtement de chaussée est un BBSG 0/10. Le spectre à utiliser est donc le spectre Non drainant.

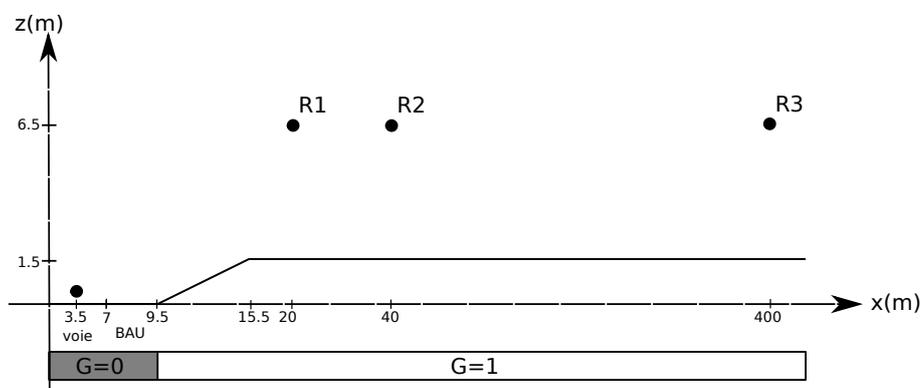


FIG. I.1 – Coupe verticale du site en déblai de 1.5 m.

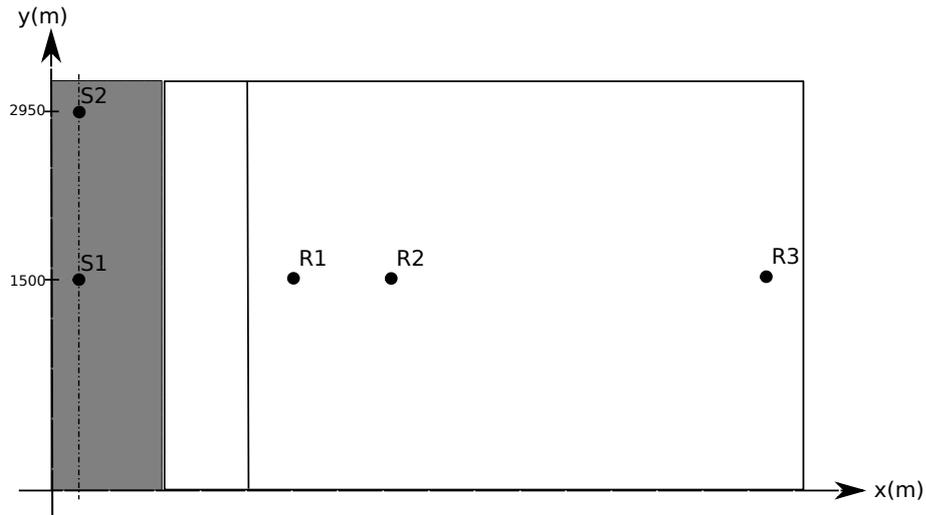


FIG. I.2 – Vue de dessus du site en déblai de 1.5 m

I.1.1 - Trajet (S1,R1)

Le Tableau I.2 donne les probabilités d’occurrence des conditions favorables.

Orientation SR	Secteur	Jour	Nuit
40°	40°	0.28	0.85

TAB. I.2 – Occurrences des conditions favorables pour le trajet (S1,R1).

I.1.1.1 - Géométrie du trajet

Distance SR : 17.716 m

La polyligne associée à ce trajet est définie au Tableau I.3.

x (m)	3.5	15.5	20
y (m)	1500	1500	1500
z (m)	0.05	1.5	6.5
z du sol (m)	0	1.5	1.5

TAB. I.3 – Polyligne du trajet (S1,R1).

I.1.1.2 - Homogène

Vue directe : calcul de A_{sol}

Le plan moyen associé est donné au Tableau I.4.

z_s (m)	d_p (m)	z_r (m)
0.37	17.16	4.77

TAB. I.4 – Plan moyen pour le trajet (S1,R1).

Absorption du sol :

– G_{trajet} : 0.64

– G'_{trajet} : 0.07

A_{talus} : aucun talus détecté

Les atténuations en conditions homogènes sont données au Tableau I.5.

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>A_{div}</i>	36.1	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
<i>A_{atm}</i>	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7
<i>A_{sol}</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8
<i>A_{dif}</i>	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TAB. I.5 – Atténuations en conditions homogènes pour le trajet (S1,R1).

I.1.1.3 - Favorable

Vue directe : calcul de A_{sol}

Le plan moyen associé est donné au Tableau I.6.

z_s (m)	d_p (m)	z_r (m)
0.39	17.16	4.81

TAB. I.6 – Plan moyen pour le trajet (S1,R1).

Absorption du sol :

– G_{trajet} : 0.64

– G'_{trajet} : 0.07

A_{talus} : aucun talus détecté

Les atténuations en conditions favorables sont données au Tableau I.7.

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>A_{div}</i>	36.1	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
<i>A_{atm}</i>	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7
<i>A_{sol}</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8
<i>A_{dif}</i>	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TAB. I.7 – Atténuations en conditions favorables pour le trajet (S1,R1).

I.1.1.4 - Contributions sonores

Les niveaux sonores en conditions homogènes sont donnés au Tableau I.8, en conditions favorables au Tableau I.9, les niveaux sonores de long terme au Tableau I.10.

I.1.2 - Trajet (S2,R1)

Ignoré : longueur de chemin supérieure à $\max(10 \cdot d_{min}, 200)$ m.

I.1.3 - Trajet (S1,R2)

Le Tableau I.11 donne les probabilités d'occurrence des conditions favorables.

I.1.3.1 - Géométrie du trajet

Distance SR : 37.066 m

La polygone associée à ce trajet est définie au Tableau I.12.

I.1.3.2 - Homogène

Diffraction simple : calcul de A_{dif} et de A_{sol}

Fréquence de transition : 630 Hz

Vue directe : calcul de A_{sol}

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_w</i>	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	33.9	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2	33.3	33.3	33.3	33.3	33.4	33.5	33.6	33.9
<i>L_{eq}</i>	46.7	19.9	20.9	22.9	25.9	27.9	30.9	32.9	35.9	35.9	38.9	39.9	38.8	36.8	33.8	30.7	28.6	25.5	23.2

TAB. I.8 – Niveaux en conditions homogènes pour le trajet (S1,R1).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_w</i>	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	33.9	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2	33.3	33.3	33.3	33.3	33.4	33.5	33.6	33.9
<i>L_{eq}</i>	46.7	19.9	20.9	22.9	25.9	27.9	30.9	32.9	35.9	35.9	38.9	39.9	38.8	36.8	33.8	30.7	28.6	25.5	23.2

TAB. I.9 – Niveaux en conditions favorables pour le trajet (S1,R1).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_{eq,LT}</i>	46.7	19.9	20.9	22.9	25.9	27.9	30.9	32.9	35.9	35.9	38.9	39.9	38.8	36.8	33.8	30.7	28.6	25.5	23.2

TAB. I.10 – Niveaux de long terme pour le trajet (S1,R1).

Orientation SR	Secteur	Jour	Nuit
40°	40°	0.28	0.85

TAB. I.11 – Occurrences des conditions favorables pour le trajet (S1,R2).

x (m)	3.5	15.5	40
y (m)	1500	1500	1500
z (m)	0.05	1.5	6.5
z du sol (m)	0	1.5	1.5

TAB. I.12 – Polygone du trajet (S1,R2).

Le plan moyen associé est donné au Tableau I.13.

z_s (m)	d_p (m)	z_r (m)
0	36.75	4.56

TAB. I.13 – Plan moyen pour le trajet (S1,R2).

Absorption du sol :

- G_{trajet} : 0.84
- G'_{trajet} : 0.23

A_{talus} : aucun talus détecté

Diffraction simple : calcul de A_{dif}

- vue directe : OUI
- point de diffraction : [15.5;1500;1.5]
- δ : -0.027 m

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.14.

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Δ_{dif}	4.3	4.2	4	3.7	3.4	3	2.4	1.5	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta_{sol(S,O)}$	2.1	-2	-2	-2	1.9	1.8	1.7	1.6	1.3	1.3	-1.3	-1.3	-1	-0.1	1	1.7	1.1	-0.9
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_{sol(S,O)}$	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	-2.2	-2.2	-1.6	-0.2	1.6	2.9	1.8	-1.3

TAB. I.14 – Composantes de A_{dif} pour le trajet (S1,R2).

$\Delta_{talus(S,O)}$: aucun talus détecté

Les atténuations en conditions homogènes sont données au Tableau I.15.

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_{div}	42.5	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4
A_{atm}	0.3	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5
A_{sol}	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-0.9	0.4	1.6	2.7
A_{dif}	0.1	2.2	2.1	2	1.8	1.6	1.2	0.7	0	1.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TAB. I.15 – Atténuations en conditions homogènes pour le trajet (S1,R2).

I.1.3.3 - Favorable

Diffraction simple : calcul de A_{dif} et de A_{sol}

Fréquence de transition : 500 Hz

Vue directe : calcul de A_{sol}

Le plan moyen associé est donné au Tableau I.16.

Absorption du sol :

- G_{trajet} : 0.84
- G'_{trajet} : 0.23

A_{talus} : aucun talus détecté

Diffraction simple : calcul de A_{dif}

- vue directe : OUI
- point de diffraction : [15.5;1500;1.5]
- δ : -0.028 m

z_s (m)	d_p (m)	z_r (m)
0.05	36.75	4.74

TAB. I.16 – Plan moyen pour le trajet (S1,R2).

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Δ_{dif}	4.3	4.1	3.9	3.7	3.4	2.9	2.2	1.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta_{sol(S,O)}$	-2.1	-2	-2	-2	-1.9	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-0.6	0.5	1.8	2	0.8	-1.6	-1.7	-1.8
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1
$A_{sol(S,O)}$	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.1	-0.9	0.9	3	3.4	1.2	-2.2	-2.2	-2.2

TAB. I.17 – Composantes de A_{dif} pour le trajet (S1,R2).

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.17.

$\Delta_{talus(S,O)}$: aucun talus détecté

Les atténuations en conditions favorables sont données au Tableau I.18.

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_{div}	42.5	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4
A_{atm}	0.3	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5
A_{sol}	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-0.8	1.4	3.1	3.3	1.8
A_{dif}	0.1	2.2	2.1	1.9	1.7	1.5	1.1	0.5	-0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TAB. I.18 – Atténuations en conditions favorables pour le trajet (S1,R2).

I.1.3.4 - Contributions sonores

Les niveaux sonores en conditions homogènes sont donnés au Tableau I.19, en conditions favorables au Tableau I.20, les niveaux sonores de long terme au Tableau I.21.

I.1.4 - Trajet (S2,R2)

Ignoré : longueur de chemin supérieure à $\max(10 \cdot d_{min}, 200)$ m.

I.1.5 - Trajet (S1,R3)

Le Tableau I.22 donne les probabilités d'occurrence des conditions favorables.

I.1.5.1 - Géométrie du trajet

Distance SR : 396.552 m

La polygone associée à ce trajet est définie au Tableau I.23.

I.1.5.2 - Homogène

Diffraction simple : calcul de A_{dif}

- vue directe : NON
- point de diffraction : [15.5;1500;1.5]
- δ : 0.067 m

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.24.

$\Delta_{talus(S,O)}$: aucun talus détecté

Les atténuations en conditions homogènes sont données au Tableau I.25.

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_w</i>	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	43	44.6	44.5	44.4	44.2	44	43.6	43.2	42.4	41.2	40.2	40.2	40.2	40.3	40.4	42	43.4	45	46.5
<i>L_{eq}</i>	39.2	8.5	9.6	11.7	14.9	17.1	20.5	23	26.7	27.9	31.9	32.9	31.9	29.8	26.7	22.2	18.7	14.2	10.6

TAB. I.19 – Niveaux en conditions homogènes pour le trajet (S1,R2).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_w</i>	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	43	44.6	44.5	44.3	44.1	43.9	43.5	43	42.2	40.2	40.2	40.2	40.2	40.3	41.9	44.2	46.1	46.7	45.7
<i>L_{eq}</i>	39.2	8.5	9.6	11.8	15	17.2	20.6	23.1	26.9	29	31.9	32.9	31.9	29.8	25.3	19.9	16	12.5	11.5

TAB. I.20 – Niveaux en conditions favorables pour le trajet (S1,R2).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_{eq,LT}</i>	39.2	8.5	9.6	11.8	14.9	17.2	20.5	23	26.7	28.2	31.9	32.9	31.9	29.8	26.4	21.6	18.1	13.7	10.9

TAB. I.21 – Niveaux de long terme pour le trajet (S1,R2).

Orientation SR	Secteur	Jour	Nuit
40°	40°	0.28	0.85

TAB. I.22 – Occurrences des conditions favorables pour le trajet (S1,R3).

x (m)	3.5	15.5	400
y (m)	1500	1500	1500
z (m)	0.05	1.5	6.5
z du sol (m)	0	1.5	1.5

TAB. I.23 – Polygone du trajet (S1,R3).

<i>f</i>	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
Δ_{dif}	5.8	6	6.3	6.6	7	7.4	7.9	8.4	9	9.7	10.4	11.1	12	12.8	13.6	14.5	15.4	16.3	
$\Delta_{sol(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-1.5	-1.5	-1.1	-0.1	1	1.8	1.1	-0.8
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	0	0	1.1	4.4	6.7	7.9	8.8	9.7	10.3	10.7	11	11.4	11.6	11.9	12.1	12.3	12.5	
$A_{sol(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-2.2	-2.2	-1.6	-0.2	1.6	2.9	1.8	-1.3
	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2

TAB. I.24 – Composantes de A_{dif} pour le trajet (S1,R3).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>A_{div}</i>	63.1	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
<i>A_{atm}</i>	1.9	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	0.9	1.1	1.3	1.6	2	2.6	3.5	4.8	7	10.5	15.8
<i>A_{sol}</i>	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>A_{dif}</i>	18.6	3.9	4.1	4.5	5.9	9.6	12.4	14.2	15.6	17.1	18.4	19.5	20.6	22.2	24.3	26.5	28.3	28.8	27.9

TAB. I.25 – Atténuations en conditions homogènes pour le trajet (S1,R3).

I.1.5.3 - Favorable

Diffraction simple : calcul de A_{dif}

- vue directe : NON
- point de diffraction : [15.5;1500;1.5]
- δ : 0.045 m

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.26.

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Δ_{dif}	5.5	5.6	5.8	6.1	6.3	6.7	7.1	7.5	8	8.6	9.2	9.8	10.6	11.3	12.1	12.9	13.8	14.7
$\Delta_{sol(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.6	0.5	1.7	1.8	0.7	-1.3	-1.3	-1.3
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	2.4	3.6	3.1	1.4	0	0	0	0	0	0
$A_{sol(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.9	0.9	3	3.4	1.2	-2.2	-2.2	-2.2

TAB. I.26 – Composantes de A_{dif} pour le trajet (S1,R3).

$\Delta_{talus(S,O)}$: aucun talus détecté

Les atténuations en conditions favorables sont données au Tableau I.27.

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_{div}	63.1	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
A_{atm}	1.9	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	0.9	1.1	1.3	1.6	2	2.6	3.5	4.8	7	10.5	15.8
A_{sol}	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_{dif}	10.2	3.6	3.8	4	4.3	4.6	5	5.5	6	8.9	10.8	11.6	11.8	12.3	13.1	12.7	11.6	12.5	13.4

TAB. I.27 – Atténuations en conditions favorables pour le trajet (S1,R3).

I.1.5.4 - Contributions sonores

Les niveaux sonores en conditions homogènes sont donnés au Tableau I.28, en conditions favorables au Tableau I.29, les niveaux sonores de long terme au Tableau I.30.

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
L_w	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	83.7	66.9	67.3	67.7	69.2	73	76	77.9	79.5	81.2	82.7	84.1	85.6	87.8	90.7	94.3	98.3	102	107
L_{eq}	-	0.8	13.8	13.1	11.6	10.1	11.9	11.8	10.4	12.1	10.6	-11	13.5	17.7	23.6	30.2	36.2	43.1	49.6

TAB. I.28 – Niveaux en conditions homogènes pour le trajet (S1,R3).

I.1.6 - Trajet (S2,R3)

Le Tableau I.31 donne les probabilités d'occurrence des conditions favorables.

I.1.6.1 - Géométrie du trajet

Distance SR : 1503.248 m

La polygone associée à ce trajet est définie au Tableau I.32.

I.1.6.2 - Homogène

Diffraction simple : calcul de A_{dif}

- vue directe : NON
- point de diffraction : [15.5;2906.116;1.5]
- δ : 0.018 m

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_w</i>	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	75.3	66.6	66.9	67.2	67.6	68.1	68.6	69.2	69.9	73	75.1	76.2	76.8	77.8	79.6	80.5	81.6	85.9	92.1
<i>L_{eq}</i>	6.2	13.5	12.8	11.1	8.5	6.9	4.5	3.1	0.8	3.9	2.9	-3.1	-4.6	-7.7	12.5	16.4	19.5	26.8	-35

TAB. I.29 – Niveaux en conditions favorables pour le trajet (S1,R3).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_{eq,LT}</i>	2.5	13.7	13	11.4	9.6	9.9	8.3	7.3	5.2	-8	6.9	-7.1	-8.9	12.2	17.2	21.5	24.8	32.1	40.2

TAB. I.30 – Niveaux de long terme pour le trajet (S1,R3).

Orientation SR	Secteur	Jour	Nuit
114.7°	120°	0.28	0.92

TAB. I.31 – Occurrences des conditions favorables pour le trajet (S2,R3).

x (m)	3.5	15.5	400
y (m)	2950	2906.116	1500
z (m)	0.05	1.5	6.5
z du sol (m)	0	1.5	1.5

TAB. I.32 – Polygone du trajet (S2,R3).

<i>f</i>	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Δ_{dif}	5.1	5.1	5.2	5.3	5.5	5.6	5.8	6.1	6.4	6.7	7.1	7.5	8	8.6	9.2	9.8	10.6	11.3
$\Delta_{sol(S,O)}$	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	-1	1.9	5.1	7.8	8.3	7.5	6.1	4.7	3.4
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	1	6.4	12.1	16.6	18.2	18.4	18.2	18	17.7	17.4	17	16.6	16.3	16	15.6	15.3	15.1
<i>A_{sol(S,O)}</i>	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.3	2.5	7.8	14.6	17.8	15.6	11.9	8.6	5.9

TAB. I.33 – Composantes de A_{dif} pour le trajet (S2,R3).

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.33.

$\Delta_{talus(S,O)}$: aucun talus détecté

Les atténuations en conditions homogènes sont données au Tableau I.34.

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_{div}	74.7	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5
A_{atm}	5.8	0.4	0.6	0.9	1.2	1.7	2.3	2.9	3.5	4.3	5.1	6.1	7.6	9.8	13.2	18.3	26.6	39.7	60
A_{sol}	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_{dif}	24.8	3.6	4.7	10.2	16.1	20.7	22.5	22.9	23	23.1	23.4	26.3	29.6	32.5	33.2	32.6	31.6	30.6	29.8

TAB. I.34 – Atténuations en conditions homogènes pour le trajet (S2,R3).

I.1.6.3 - Favorable

Diffraction simple : calcul de A_{dif} et de A_{sol}

Fréquence de transition : 200 Hz

Vue directe : calcul de A_{sol}

Le plan moyen associé est donné au Tableau I.35.

z_s (m)	d_p (m)	z_r (m)
1.83	1503.23	232.73

TAB. I.35 – Plan moyen pour le trajet (S2,R3).

Absorption du sol :

– G_{trajet} : 0.98

– G'_{trajet} : 0.98

A_{talus} : aucun talus détecté

Diffraction simple : calcul de A_{dif}

– vue directe : NON

– point de diffraction : [15.5;2906.116;1.5]

– δ : -0.069 m

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.36.

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Δ_{dif}	3.4	3	2.3	1.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta_{sol(S,O)}$	2.8	2.7	2.6	2.5	2.2	2.4	2.7	2.9	1.7	1.1	4.7	7.9	7.8	4.5	0.9	-2.2	-2.9	-2.9
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_{sol(S,O)}$	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	1.7	1.1	4.7	7.9	7.8	4.5	0.9	-2.2	-2.9	-2.9

TAB. I.36 – Composantes de A_{dif} pour le trajet (S2,R3).

$\Delta_{talus(S,O)}$: aucun talus détecté

Les atténuations en conditions favorables sont données au Tableau I.37.

I.1.6.4 - Contributions sonores

Les niveaux sonores en conditions homogènes sont donnés au Tableau I.38, en conditions favorables au Tableau I.39, les niveaux sonores de long terme au Tableau I.40.

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
<i>A_{div}</i>	74.7	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5
<i>A_{atm}</i>	5.8	0.4	0.6	0.9	1.2	1.7	2.3	2.9	3.5	4.3	5.1	6.1	7.6	9.8	13.2	18.3	26.6	39.7	60	
<i>A_{sol}</i>	0.1	0	0	0	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
<i>A_{dif}</i>	0.1	0.6	0.3	-0.3	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TAB. I.37 – Atténuations en conditions favorables pour le trajet (S2,R3).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_w</i>	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	105	78.6	79.8	85.6	91.9	97	99.3	100	101	102	103	107	112	117	121	125	133	145	164
<i>L_{eq}</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	19.7	25.4	25.7	29.5	32.7	35.9	35.2	34.2	32	32.8	30.9	33.9	39.6	46.7	53.8	61.4	70.6	85.7	107.2

TAB. I.38 – Niveaux en conditions homogènes pour le trajet (S2,R3).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_w</i>	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	80.7	75.6	75.4	75.1	74.7	76.1	76.7	77.3	78	78.7	79.5	80.5	82	84.2	87.6	92.8	101	114	134
<i>L_{eq}</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.1	22.4	21.3	19	15.6	15	12.6	11.2	8.8	9.6	7.4	-7.4	-9.9	14.1	20.5	28.6	38.9	-55	77.3

TAB. I.39 – Niveaux en conditions favorables pour le trajet (S2,R3).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_{eq,LT}</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-26	-	-	-	-
	5.5	24.4	24	23.6	20.9	20.4	18	16.7	14.3	15	12.9	12.9	15.4	19.6	34.2	44.4	60.5	82.8	

TAB. I.40 – Niveaux de long terme pour le trajet (S2,R3).

I.2 - Site en fort déblai

Le site étudié ici est identique celui de la Section I.1, en dehors du fait que le déblai est de 4 m au lieu de 1.5 m. Ce site illustre la prise en compte de la réflexion sur un talus de déblai, dans l'effet de sol comme dans la diffraction. La coupe verticale du site est donnée à la Figure I.3.

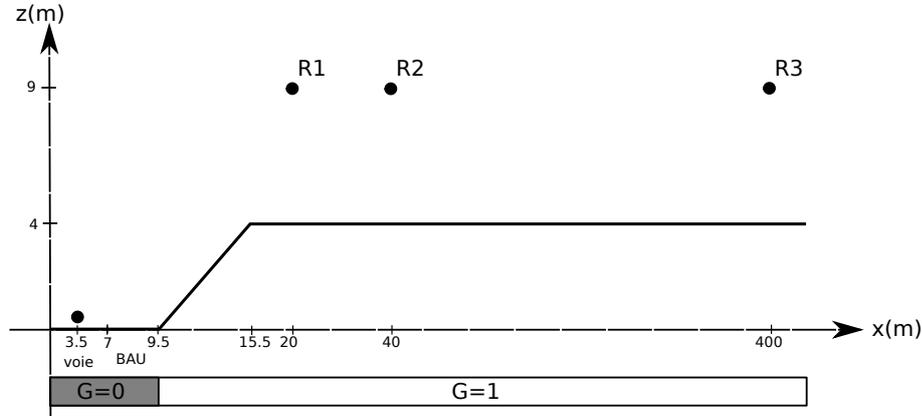


FIG. I.3 – Coupe verticale du site en déblai de 4 m.

I.2.1 - Trajet (S1,R1)

Le Tableau I.41 donne les probabilités d'occurrence des conditions favorables.

Orientation SR	Secteur	Jour	Nuit
40°	40°	0.28	0.85

TAB. I.41 – Occurrences des conditions favorables pour le trajet (S1,R1).

I.2.1.1 - Géométrie du trajet

Distance SR : 18.771 m

La polygone associée à ce trajet est définie au Tableau I.42.

x (m)	3.5	15.5	20
y (m)	1500	1500	1500
z (m)	0.05	4	9
z du sol (m)	0	4	4

TAB. I.42 – Polygone du trajet (S1,R1).

I.2.1.2 - Homogène

Vue directe : calcul de A_{sol}

Le plan moyen associé est donné au Tableau I.43.

z_s (m)	d_p (m)	z_r (m)
0.87	18.46	4.25

TAB. I.43 – Plan moyen pour le trajet (S1,R1).

Absorption du sol :

- G_{trajet} : 0.64
- G'_{trajet} : 0.08

Les composantes de A_{talus} sont données au Tableau I.44.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_{talus}	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6

TAB. I.44 – Composantes de A_{talus} .

Les atténuations en conditions homogènes sont données au Tableau I.45.

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_{div}	36.6	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5
A_{atm}	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7
A_{sol}	-3.2	-3.3	-3.3	-3.4	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.4	-3.4	-3.4	-3.4	-3.4	-3.4	-3.4	-3.3
A_{dif}	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TAB. I.45 – Atténuations en conditions homogènes pour le trajet (S1,R1).

I.2.1.3 - Favorable

Vue directe : calcul de A_{sol}

Le plan moyen associé est donné au Tableau I.46.

z_s (m)	d_p (m)	z_r (m)
0.9	1 8.46	4.3

TAB. I.46 – Plan moyen pour le trajet (S1,R1).

Absorption du sol :

- G_{trajet} : 0.64
- G'_{trajet} : 0.08

Les composantes de A_{talus} sont données au Tableau I.47.

Les atténuations en conditions favorables sont données au Tableau I.48.

I.2.1.4 - Contributions sonores

Les niveaux sonores en conditions homogènes sont donnés au Tableau I.49, en conditions favorables au Tableau I.50, les niveaux sonores de long terme au Tableau I.51.

I.2.2 - Trajet (S2,R1)

Ignoré : longueur de chemin supérieure à $\max(10 \cdot d_{min}, 200)$ m.

I.2.3 - Trajet (S1,R2)

Le Tableau I.52 donne les probabilités d'occurrence des conditions favorables.

I.2.3.1 - Géométrie du trajet

Distance SR : 37.581 m

La polygone associée à ce trajet est définie au Tableau I.53.

I.2.3.2 - Homogène

Diffraction simple : calcul de A_{dif}

- vue directe : NON

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_{talus}	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6

TAB. I.47 – Composantes de A_{talus} .

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_{div}	36.6	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5
A_{atm}	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7
A_{sol}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-3.4	-3.4	-3.4	-3.4	-3.4
A_{dif}	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TAB. I.48 – Atténuations en conditions favorables pour le trajet (S1,R1).

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
L_w	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	33.7	33.2	33.1	33.1	33	33	33	33	33	33.1	33.1	33.1	33.1	33.2	33.2	33.3	33.4	33.6	33.9
L_{eq}	46.9	19.9	21	23	26.1	28.1	31.1	33.1	36.1	36.1	39	40	39	36.9	33.9	30.8	28.7	25.5	23.2

TAB. I.49 – Niveaux en conditions homogènes pour le trajet (S1,R1).

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
L_w	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	33.7	33.2	33.1	33.1	33	33	33	33	33	33.1	33.1	33.1	33.1	33.2	33.2	33.3	33.4	33.6	33.9
L_{eq}	46.9	19.9	21	23	26.1	28.1	31.1	33.1	36.1	36.1	39	40	39	36.9	33.9	30.8	28.7	25.5	23.2

TAB. I.50 – Niveaux en conditions favorables pour le trajet (S1,R1).

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
$L_{eq,LT}$	46.9	19.9	21	23	26.1	28.1	31.1	33.1	36.1	36.1	39	40	39	36.9	33.9	30.8	28.7	25.5	23.2

TAB. I.51 – Niveaux de long terme pour le trajet (S1,R1).

Orientation SR	Secteur	Jour	Nuit
40°	40°	0.28	0.85

TAB. I.52 – Occurrences des conditions favorables pour le trajet (S1,R2).

x (m)	3.5	15.5	40
y (m)	1500	1500	1500
z (m)	0.05	4	9
z du sol (m)	0	4	4

TAB. I.53 – Polygone du trajet (S1,R2).

- point de diffraction : [15.5;1500;4]
- δ : 0.057 m

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.54.

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Δ_{dif}	5.6	5.8	6.1	6.4	6.7	7.1	7.5	8	8.6	9.2	9.9	10.6	11.4	12.2	13	13.8	14.8	15.6
$\Delta_{sol(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-1.2	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-1.3	-1.3	-1.3
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_{sol(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-2.2	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6
$\Delta_{talus(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1

TAB. I.54 – Composantes de A_{dif} pour le trajet (S1,R2).

Les atténuations en conditions homogènes sont données au Tableau I.55.

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_{div}	42.6	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5
A_{atm}	0.3	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5
A_{sol}	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_{dif}	8.9	3.7	4.3	4.9	5.5	6.1	6.7	7.3	7.8	8.2	8.4	8.5	9	9.8	10.6	11.5	12.3	13.3	14.2

TAB. I.55 – Atténuations en conditions homogènes pour le trajet (S1,R2).

I.2.3.3 - Favorable

Diffraction simple : calcul de A_{dif}

- vue directe : NON
- point de diffraction : [15.5;1500;4]
- δ : 0.056 m

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.56.

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Δ_{dif}	5.6	5.8	6.1	6.3	6.7	7	7.5	8	8.5	9.2	9.8	10.5	11.3	12.1	12.9	13.7	14.7	15.5
$\Delta_{sol(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-1.5	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-1.3	-1.3	-1.3
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.3
$A_{sol(S,O)}$	-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6
$\Delta_{talus(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1

TAB. I.56 – Composantes de A_{dif} pour le trajet (S1,R2).

Les atténuations en conditions favorables sont données au Tableau I.57.

I.2.3.4 - Contributions sonores

Les niveaux sonores en conditions homogènes sont donnés au Tableau I.58, en conditions favorables au Tableau I.59, les niveaux sonores de long terme au Tableau I.60.

I.2.4 - Trajet (S2,R2)

Ignoré : longueur de chemin supérieure à $\max(10 \cdot d_{\min}, 200)$ m.

I.2.5 - Trajet (S1,R3)

Le Tableau I.61 donne les probabilités d'occurrence des conditions favorables.

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
<i>A_{div}</i>	42.6	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	42.5
<i>A_{atm}</i>	0.3	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5	
<i>A_{sol}</i>	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<i>A_{dif}</i>	8.6	3.8	4.3	4.9	5.4	5.9	6.3	6.7	7.1	7.4	7.8	8.2	8.9	9.7	10.5	11.4	12.3	13.5	14.4	

TAB. I.57 – Atténuations en conditions favorables pour le trajet (S1,R2).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_w</i>	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	51.9	46.2	46.8	47.5	48.1	48.7	49.3	49.9	50.4	50.8	51	51.2	51.7	52.6	53.5	54.4	55.5	56.8	58.2
<i>L_{eq}</i>	28.8	6.9	7.3	8.7	11	12.4	14.8	16.2	18.7	18.3	21.1	22	20.5	17.5	13.7	9.7	6.6	2.4	-1

TAB. I.58 – Niveaux en conditions homogènes pour le trajet (S1,R2).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_w</i>	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	51.6	46.3	46.8	47.4	48	48.4	48.9	49.3	49.7	50	50.4	50.8	51.6	52.5	53.4	54.3	55.5	57	58.4
<i>L_{eq}</i>	29.2	6.8	7.3	8.7	11.2	12.7	15.2	16.8	19.5	19.1	21.7	22.3	20.5	17.6	13.7	9.8	6.7	2.1	-1.3

TAB. I.59 – Niveaux en conditions favorables pour le trajet (S1,R2).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_{eq,LT}</i>	28.9	6.9	7.3	8.7	11.1	12.5	14.9	16.4	19	18.6	21.2	22	20.5	17.6	13.7	9.7	6.6	2.3	-1.1

TAB. I.60 – Niveaux de long terme pour le trajet (S1,R2).

Orientation SR	Secteur	Jour	Nuit
40°	40°	0.28	0.85

TAB. I.61 – Occurrences des conditions favorables pour le trajet (S1,R3).

I.2.5.1 - Géométrie du trajet

Distance SR : 396.601 m

La polygline associée à ce trajet est définie au Tableau I.62.

x (m)	3.5	15.5	400
y (m)	1500	1500	1500
z (m)	0.05	4	9
z du sol (m)	0	4	4

TAB. I.62 – Polygline du trajet (S1,R3).

I.2.5.2 - Homogène

Diffraction simple : calcul de A_{dif}

- vue directe : NON
- point de diffraction : [15.5;1500;4]
- δ : 0.565 m

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.63.

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Δ_{dif}	9.8	10.5	11.3	12.1	12.9	13.8	14.7	15.6	16.5	17.5	18.4	19.3	20.4	21.3	22.3	23.3	24.3	25
$\Delta_{sol(S,O)}$	-1.6	-1.3	-0.9	-0.6	-0.4	-0.2	0	-0.1	-0.3	-0.8	-1.6	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	0	0	1.1	4.5	7.1	8.6	9.8	11.1	12.1	12.8	13.6	14.4	15	15.6	16.2	16.7	17.2
$A_{sol(S,O)}$	-2.1	-1.7	-1.3	-0.9	-0.5	-0.2	-0.1	-0.1	-0.5	-1.2	-2.2	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6
$\Delta_{talus(S,O)}$	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3

TAB. I.63 – Composantes de A_{dif} pour le trajet (S1,R3).

Les atténuations en conditions homogènes sont données au Tableau I.64.

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_{div}	63.1	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
A_{atm}	1.9	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	0.9	1.1	1.3	1.6	2	2.6	3.5	4.8	7	10.5	15.8
A_{sol}	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_{dif}	27.4	7.9	8.9	10.1	12.3	16.8	20.5	23	25.1	27	28.5	29.4	30.7	32.6	34.2	35.7	37.3	38.9	40

TAB. I.64 – Atténuations en conditions homogènes pour le trajet (S1,R3).

I.2.5.3 - Favorable

Diffraction simple : calcul de A_{dif}

- vue directe : NON
- point de diffraction : [15.5;1500;4]
- δ : 0.542 m

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.65.

Les atténuations en conditions favorables sont données au Tableau I.66.

I.2.5.4 - Contributions sonores

Les niveaux sonores en conditions homogènes sont donnés au Tableau I.67, en conditions favorables au Tableau I.68, les niveaux sonores de long terme au Tableau I.69.

I.2.6 - Trajet (S2,R3)

Le Tableau I.70 donne les probabilités d'occurrence des conditions favorables.

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Δ_{dif}	9.7	10.4	11.2	12	12.8	13.6	14.5	15.4	16.4	17.3	18.2	19.2	20.2	21.2	22.1	23.1	24.1	25
$\Delta_{sol(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	2.7	4.2	3.6	1.7	0	0	0	0	0	0
$A_{sol(S,O)}$	-2	-	-	-1	-	-	-	-	-	-	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6
$\Delta_{talus(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3

TAB. I.65 – Composantes de A_{dif} pour le trajet (S1,R3).

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_{div}	63.1	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
A_{atm}	1.9	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	0.9	1.1	1.3	1.6	2	2.6	3.5	4.8	7	10.5	15.8
A_{sol}	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_{dif}	17.5	7.9	8.9	10	11	11.9	12.8	13.6	14.3	17.6	19.7	19.7	18.7	18.1	19	20	20.9	22	22.9

TAB. I.66 – Atténuations en conditions favorables pour le trajet (S1,R3).

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
L_w	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1	
A	92.5	71	72	73.3	75.6	80.2	84	86.7	89	91.1	92.8	94	95.7	98.1	101	104	107	112	119	
L_{eq}	-	8.4	17.9	17.9	17.2	16.5	19.1	19.9	20.6	19.8	22	20.6	20.9	23.6	-28	33.5	39.4	45.2	53.2	61.7

TAB. I.67 – Niveaux en conditions homogènes pour le trajet (S1,R3).

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
L_w	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1	
A	82.6	71	72	73.2	74.2	75.3	76.3	77.3	78.2	81.7	84	84.3	83.7	83.6	85.4	87.8	90.9	95.4	102	
L_{eq}	-	1.5	17.8	17.9	17	15.1	14.2	12.2	11.2	9.1	12.6	11.9	11.2	11.6	13.5	18.3	23.6	28.8	36.3	44.5

TAB. I.68 – Niveaux en conditions favorables pour le trajet (S1,R3).

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
$L_{eq,LT}$	5.2	-	17.9	17.9	-	16.1	17.1	16.2	15.6	13.8	17	16.1	15.6	16.4	18.6	23.5	28.9	34.1	41.6	49.8

TAB. I.69 – Niveaux de long terme pour le trajet (S1,R3).

Orientation SR	Secteur	Jour	Nuit
114.7°	120°	0.28	0.92

TAB. I.70 – Occurrences des conditions favorables pour le trajet (S2,R3).

I.2.6.1 - Géométrie du trajet

Distance SR : 1503.261 m

La polygline associée à ce trajet est définie au Tableau I.71.

x (m)	3.5	15.5	400
y (m)	2950	2906.116	1500
z (m)	0.05	4	9
z du sol (m)	0	4	4

TAB. I.71 – Polygline du trajet (S2,R3).

I.2.6.2 - Homogène

Diffraction simple : calcul de A_{dif}

- vue directe : NON
- point de diffraction : [15.5;2906.116;4]
- δ : 0.153 m

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.72.

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Δ_{dif}	6.8	7.2	7.7	8.2	8.8	9.4	10.1	10.8	11.6	12.4	13.2	14.1	15	15.9	16.8	17.8	18.8	19.7
$\Delta_{sol(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.8	2.1	2.3	0.8	-1.3	-1.3	-1.3	-1.3
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	1	6.2	11.8	16.1	17.8	18.3	18.6	18.8	19.1	19.4	19.7	20	20.2	20.4	20.6	20.8	20.9
$A_{sol(S,O)}$	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-0.8	1.2	3.3	3.7	1.2	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9

TAB. I.72 – Composantes de A_{dif} pour le trajet (S2,R3).

$\Delta_{talus(S,O)}$: aucun talus détecté

Les atténuations en conditions homogènes sont données au Tableau I.73.

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_{div}	74.7	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5
A_{atm}	5.8	0.4	0.6	0.9	1.2	1.7	2.3	2.9	3.5	4.3	5.1	6.1	7.6	9.8	13.2	18.3	26.6	39.7	60
A_{sol}	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_{dif}	30.7	5.3	6.7	12.5	18.6	23.5	25.8	27	28	29.1	31	33.5	35.9	37.3	36.9	36	37.1	38.3	39.3

TAB. I.73 – Atténuations en conditions homogènes pour le trajet (S2,R3).

I.2.6.3 - Favorable

Diffraction simple : calcul de A_{dif}

- vue directe : NON
- point de diffraction : [15.5;2906.116;4]
- δ : 0.067 m

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.74.

$\Delta_{talus(S,O)}$: aucun talus détecté

Les atténuations en conditions favorables sont données au Tableau I.75.

I.2.6.4 - Contributions sonores

Les niveaux sonores en conditions homogènes sont donnés au Tableau I.76, en conditions favorables au Tableau I.77, les niveaux sonores de long terme au Tableau I.78.

<i>f</i>	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Δ_{dif}	5.8	6	6.3	6.6	7	7.4	7.9	8.4	9	9.7	10.4	11.1	11.9	12.7	13.5	14.4	15.4	16.3
$\Delta_{sol(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1.7	1.5	-0.2	-1	-1	-1	-1	-1
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_{sol(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.8	3.4	2.9	-0.3	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9

TAB. I.74 – Composantes de A_{dif} pour le trajet (S2,R3).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_{div}	74.7	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5
A_{atm}	5.8	0.4	0.6	0.9	1.2	1.7	2.3	2.9	3.5	4.3	5.1	6.1	7.6	9.8	13.2	18.3	26.6	39.7	60
A_{sol}	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_{dif}	10.7	4.3	4.6	4.9	5.3	5.7	6.1	6.7	7.3	8.8	10.6	12.1	12.5	11.7	11.7	12.5	13.4	14.4	15.3

TAB. I.75 – Atténuations en conditions favorables pour le trajet (S2,R3).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
L_w	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	111	80.2	81.8	87.9	94.3	99.7	103	104	106	108	111	114	118	122	125	129	138	152	174
L_{eq}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-41	-	-	-	-	-	-	-
	22.5	27.1	27.7	31.7	35.2	38.6	38.5	38.3	37	38.8	38.5		45.9	51.5	57.5	64.7	76.1	93.4	116.7

TAB. I.76 – Niveaux en conditions homogènes pour le trajet (S2,R3).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
L_w	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	91.3	79.2	79.7	80.3	81	81.9	83	84.1	85.4	87.6	90.3	92.7	94.7	96.1	99.4	105	115	129	150
L_{eq}	-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		26.1	25.6	24.2	21.9	20.8	18.8	18	16.2	18.5	18.1	19.6	22.5	-26	32.3	41.3	52.5	69.5	92.7

TAB. I.77 – Niveaux en conditions favorables pour le trajet (S2,R3).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
$L_{eq,LT}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	14.1	26.8	27	28.1	27	26.1	24.2	23.4	21.7	23.9	23.6	25.1	-28	31.5	37.8	46.8	57.9	-75	98.2

TAB. I.78 – Niveaux de long terme pour le trajet (S2,R3).

I.3 - Site en remblai avec écran bas

On considère maintenant le site en remblai représenté sur la Figure I.4. La vue de dessus n'est pas nécessaire ici car seule la propagation dans le plan de coupe est étudiée. Un écran de 0.80 m de hauteur est placé en bord de plate-forme. L'axe de la voie définit un angle par rapport au nord ($\vec{N}, \vec{O}y$) de 10° .

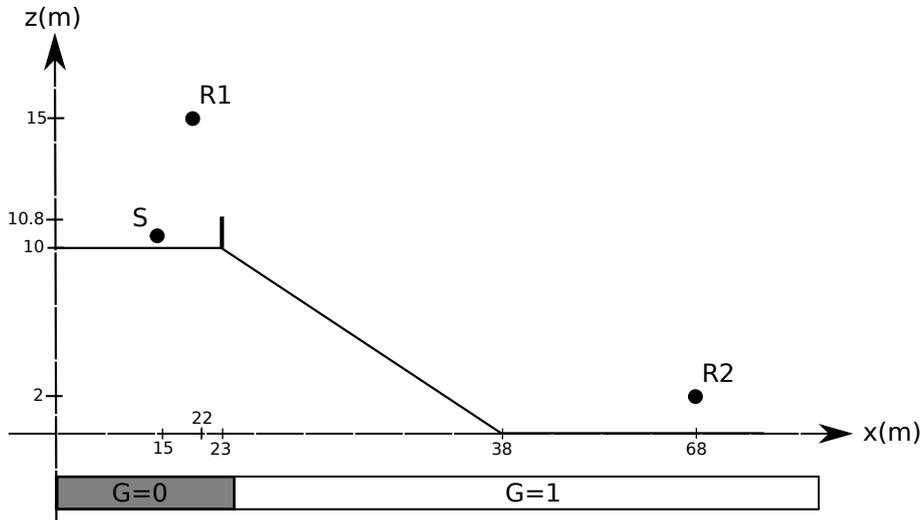


FIG. I.4 – Coupe verticale du site en remblai.

I.3.1 - Trajet (S,R1)

Le Tableau I.79 donne les probabilités d'occurrence des conditions favorables.

Orientation SR	Secteur	Jour	Nuit
280°	280°	0.32	0.96

TAB. I.79 – Occurrences des conditions favorables pour le trajet (S,R1).

I.3.1.1 - Géométrie du trajet

Distance SR : 8.573 m

La polyligne associée à ce trajet est définie au Tableau I.80.

x (m)	15	22
y (m)	50	50
z (m)	10.05	15
z du sol (m)	10	10

TAB. I.80 – Polyligne du trajet (S,R1).

I.3.1.2 - Homogène

Vue directe : calcul de A_{sol}

Le plan moyen associé est donné au Tableau I.81.

z_s (m)	d_p (m)	z_r (m)
0.05	7	5

TAB. I.81 – Plan moyen pour le trajet (S,R1).

Absorption du sol :

- $G_{trajet} : 0$

- $G'_{trajet} : 0$

A_{talus} : aucun talus détecté

Les atténuations en conditions homogènes sont données au Tableau I.82.

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
A_{div}	29.8	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7
A_{atm}	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	
A_{sol}	-2.8	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
A_{dif}	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TAB. I.82 – Atténuations en conditions homogènes pour le trajet (S,R1).

I.3.1.3 - Favorable

Vue directe : calcul de A_{sol}

Le plan moyen associé est donné au Tableau I.83.

z_s (m)	d_p (m)	z_r (m)
0.06	7	5.01

TAB. I.83 – Plan moyen pour le trajet (S,R1).

Absorption du sol :

- $G_{trajet} : 0$

- $G'_{trajet} : 0$

A_{talus} : aucun talus détecté

Les atténuations en conditions favorables sont données au Tableau I.84.

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
A_{div}	29.8	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7	29.7
A_{atm}	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	
A_{sol}	-2.8	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
A_{dif}	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TAB. I.84 – Atténuations en conditions favorables pour le trajet (S,R1).

I.3.1.4 - Contributions sonores

Les niveaux sonores en conditions homogènes sont donnés au Tableau I.85, en conditions favorables au Tableau I.86, les niveaux sonores de long terme au Tableau I.87.

I.3.2 - Trajet (S,R2)

Le Tableau I.88 donne les probabilités d'occurrence des conditions favorables.

I.3.2.1 - Géométrie du trajet

Distance SR : 53.608 m

La polygone associée à ce trajet est définie au Tableau I.89.

I.3.2.2 - Homogène

Diffraction simple : calcul de A_{dif}

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_w</i>	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	27.3	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.8	26.8	26.9	27
<i>L_{eq}</i>	53.3	26.5	27.5	29.4	32.4	34.4	37.4	39.4	42.4	42.4	45.4	46.4	45.4	43.4	40.4	37.3	35.3	32.2	30.1

TAB. I.85 – Niveaux en conditions homogènes pour le trajet (S,R1).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_w</i>	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	27.3	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7	26.8	26.8	26.9	27
<i>L_{eq}</i>	53.3	26.5	27.5	29.4	32.4	34.4	37.4	39.4	42.4	42.4	45.4	46.4	45.4	43.4	40.4	37.3	35.3	32.2	30.1

TAB. I.86 – Niveaux en conditions favorables pour le trajet (S,R1).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_{eq,LT}</i>	53.3	26.5	27.5	29.4	32.4	34.4	37.4	39.4	42.4	42.4	45.4	46.4	45.4	43.4	40.4	37.3	35.3	32.2	30.1

TAB. I.87 – Niveaux de long terme pour le trajet (S,R1).

Orientation SR	Secteur	Jour	Nuit
280°	280°	0.32	0.96

TAB. I.88 – Occurrences des conditions favorables pour le trajet (S,R2).

x (m)	15	23	68
y (m)	50	50	50
z (m)	10.05	10.8	2
z du sol (m)	10	10	0

TAB. I.89 – Polygone du trajet (S,R2).

- vue directe : NON
- point de diffraction : [23;50;10.8]
- δ : 0.28 m

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.90.

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Δ_{dif}	8	8.5	9.2	9.8	10.5	11.3	12.1	12.9	13.8	14.7	15.6	16.4	17.5	18.4	19.3	20.3	21.3	22.2
$\Delta_{sol(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_{sol(S,O)}$	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

TAB. I.90 – Composantes de A_{dif} pour le trajet (S,R2).

$\Delta_{talus(S,O)}$: aucun talus détecté

Les atténuations en conditions homogènes sont données au Tableau I.91.

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_{div}	45.7	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6
A_{atm}	0.4	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.7	0.9	1.4	2.1
A_{sol}	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_{dif}	12.3	5	5.6	6.2	6.9	7.6	8.3	9.2	10	10.8	11.8	12.6	13.5	14.6	15.5	16.4	17.4	18.4	19.3

TAB. I.91 – Atténuations en conditions homogènes pour le trajet (S,R2).

I.3.2.3 - Favorable

Diffraction simple : calcul de A_{dif}

- vue directe : NON
- point de diffraction : [23;50;10.8]
- δ : 0.277 m

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.92.

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Δ_{dif}	8	8.5	9.1	9.8	10.5	11.2	12.1	12.9	13.7	14.6	15.5	16.4	17.4	18.3	19.3	20.2	21.3	22.2
$\Delta_{sol(S,O)}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_{sol(S,O)}$	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

TAB. I.92 – Composantes de A_{dif} pour le trajet (S,R2).

$\Delta_{talus(S,O)}$: aucun talus détecté

Les atténuations en conditions favorables sont données au Tableau I.93.

I.3.2.4 - Contributions sonores

Les niveaux sonores en conditions homogènes sont donnés au Tableau I.94, en conditions favorables au Tableau I.95, les niveaux sonores de long terme au Tableau I.96.

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
<i>A_{div}</i>	45.7	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6
<i>A_{atm}</i>	0.4	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.7	0.9	1.4	2.1	
<i>A_{sol}</i>	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>A_{dif}</i>	12.3	5	5.6	6.2	6.9	7.6	8.3	9.1	9.9	10.8	11.7	12.6	13.5	14.5	15.4	16.4	17.3	18.4	19.3	

TAB. I.93 – Atténuations en conditions favorables pour le trajet (S,R2).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_w</i>	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	58.5	50.6	51.2	51.9	52.5	53.2	54	54.9	55.7	56.6	57.5	58.5	59.4	60.5	61.5	62.6	63.9	65.4	67.1
<i>L_{eq}</i>	22.4	2.5	2.9	4.3	6.6	7.9	10.1	11.3	13.4	12.5	14.6	14.7	12.7	9.6	5.6	1.5	-1.8	-6.3	-10

TAB. I.94 – Niveaux en conditions homogènes pour le trajet (S,R2).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_w</i>	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	58.5	50.6	51.2	51.8	52.5	53.2	54	54.8	55.7	56.6	57.5	58.4	59.4	60.5	61.5	62.6	63.9	65.4	67
<i>L_{eq}</i>	22.4	2.5	3	4.3	6.6	7.9	10.1	11.3	13.5	12.6	14.6	14.7	12.8	9.7	5.6	1.5	-1.8	-6.2	-9.9

TAB. I.95 – Niveaux en conditions favorables pour le trajet (S,R2).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_{eq,LT}</i>	22.4	2.5	2.9	4.3	6.6	7.9	10.1	11.3	13.4	12.5	14.6	14.7	12.7	9.6	5.6	1.5	-1.8	-6.3	-9.9

TAB. I.96 – Niveaux de long terme pour le trajet (S,R2).

I.4 - Site avec diffraction multiple

Le dernier exemple de cette annexe concerne le site dont une coupe est représentée à la Figure I.5. La route passe en remblai, 6 m au dessus du terrain naturel. La plateforme routière est bordée d'un écran de 4 m de hauteur. A proximité du remblai se trouve un bâtiment de 8 m de hauteur, que l'on suppose suffisamment étendu selon \vec{Oy} pour que la contribution des diffractions latérales soit négligeable.

L'axe de la voie définit un angle par rapport au nord (\vec{N}, \vec{Oy}) de 100° .

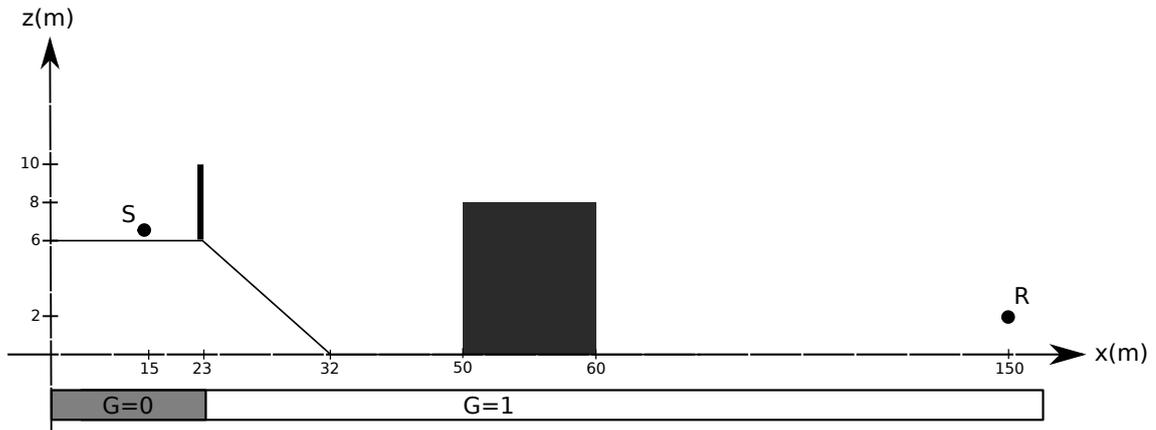


FIG. I.5 – Coupe verticale du site avec diffraction multiple.

Sur ce site, trois arêtes empêchent la vue directe entre S et R . Conformément à la règle définie à la Section 7.4.3, deux seulement sont à prendre en compte. En effet, sur le bâtiment, le bord de toit le plus proche de la route n'est pas sur l'enveloppe convexe entre S et R .

I.4.1 - Trajet (S,R)

Le Tableau I.97 donne les probabilités d'occurrence des conditions favorables.

Orientation SR	Secteur	Jour	Nuit
100°	100°	0.27	0.92

TAB. I.97 – Occurrences des conditions favorables pour le trajet (S,R).

I.4.1.1 - Géométrie du trajet

Distance SR : 135.061 m

La polygone associée à ce trajet est définie au Tableau I.98.

x (m)	15	23	60	150
y (m)	50	50	50	50
z (m)	6.05	10	8	2
z du sol (m)	6	6	8	0

TAB. I.98 – Polygone du trajet (S,R).

I.4.1.2 - Homogène

Diffraction multiple : calcul de A_{dif}

- vue directe : NON
- Premier point de diffraction : [23;50;10]

- Dernier point de diffraction : [60;50;8]
- δ : 1.115 m

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.99.

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Δ_{dif}	15.1	16.3	17.6	18.7	19.8	20.9	21.9	22.9	23.9	25	25	25	25	25	25	25	25	25
$\Delta_{sol(S,O)}$	-3	-3	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_{sol(S,O)}$	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

TAB. I.99 – Composantes de A_{dif} .

$\Delta_{talus(S,O)}$: aucun talus détecté

Les atténuations en conditions homogènes sont données au Tableau I.100.

f	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_{div}	53.7	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6
A_{atm}	0.8	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9	1.2	1.6	2.4	3.6	5.4
A_{sol}	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_{dif}	21.5	12.1	13.4	14.7	15.8	16.8	17.9	19	20	21	22	22.1	22.1	22.1	22.1	22.1	22.1	22.1	22.1

TAB. I.100 – Atténuations en conditions homogènes pour le trajet (S,R).

I.4.1.3 - Favorable

Diffraction multiple : calcul de A_{dif}

- vue directe : NON
- Premier point de diffraction : [23;50;10]
- Dernier point de diffraction : [60;50;8]
- δ : 1.055 m

Les composantes de A_{dif} sont détaillées au Tableau I.101.

f	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Δ_{dif}	15	16.2	17.5	18.7	19.7	20.8	21.9	22.9	23.9	24.9	25	25	25	25	25	25	25	25
$\Delta_{sol(S,O)}$	-3	-3	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9
$\Delta_{sol(O,R)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_{sol(S,O)}$	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

TAB. I.101 – Composantes de A_{dif} .

$\Delta_{talus(S,O)}$: aucun talus détecté

Les atténuations en conditions favorables sont données au Tableau I.102.

I.4.1.4 - Contributions sonores

Les niveaux sonores en conditions homogènes sont donnés au Tableau I.103, en conditions favorables au Tableau I.104, les niveaux sonores de long terme au Tableau I.105.

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
<i>A_{div}</i>	53.7	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6
<i>A_{atm}</i>	0.8	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9	1.2	1.6	2.4	3.6	5.4	
<i>A_{sol}</i>	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>A_{dif}</i>	21.5	12.1	13.3	14.6	15.7	16.8	17.9	18.9	19.9	20.9	22	22.1	22.1	22.1	22.1	22.1	22.1	22.1	22.1	22.1

TAB. I.102 – Atténuations en conditions favorables pour le trajet (S,R).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_w</i>	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	76.1	65.8	67	68.3	69.5	70.6	71.7	72.9	73.9	75	76.1	76.2	76.3	76.5	76.8	77.3	78.1	79.2	81.1
<i>L_{eq}</i>	4.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-4	-3.1	-4.2	-6.4	-9.7	-	-	-	-
		12.6	12.9	12.2	10.4	9.5	7.6	6.7	4.8	5.9						13.2	15.9	20.1	23.9

TAB. I.103 – Niveaux en conditions homogènes pour le trajet (S,R).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_w</i>	80	53.1	54.1	56.1	59.1	61.1	64.1	66.1	69.1	69.1	72.1	73.1	72.1	70.1	67.1	64.1	62.1	59.1	57.1
A	76.1	65.7	67	68.3	69.4	70.5	71.7	72.8	73.9	74.9	76.1	76.2	76.3	76.5	76.8	77.3	78.1	79.2	81.1
<i>L_{eq}</i>	4.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-3.1	-4.2	-6.4	-9.7	-	-	-	-
		12.6	12.8	12.2	10.3	9.4	7.6	6.7	4.7	5.8	3.9					13.2	15.9	20.1	23.9

TAB. I.104 – Niveaux en conditions favorables pour le trajet (S,R).

<i>f</i>	A	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<i>L_{eq,LT}</i>	4.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-4	-3.1	-4.2	-6.4	-9.7	-	-	-	-
		12.6	12.9	12.2	10.4	9.5	7.6	6.7	4.8	5.9						13.2	15.9	20.1	23.9

TAB. I.105 – Niveaux de long terme pour le trajet (S,R).

J- De la NMPB-Routes-96 à la NMPB-Routes-2008

Le Tableau J.1 résume les changements qu'apporte la NMPB-Routes-2008 par rapport à la NMPB-Routes-96. Le lecteur trouvera la justification de ces modifications dans la bibliographie.

Aspect	NMPB-Routes-96	NMPB-Routes-2008
Domaine d'application (altitude, site,...)	[[NMPB96],1 et 3.3.1]	Inchangé
Occurrences de conditions favorables	Grille UiTi quantitative [LRA1995]	Calcul de $Grad_c$ avec le logiciel MAGRET (INRA) [LRS2008]
Résolution	Octaves (125-4000 Hz)	Tiers d'octave (100-5000 Hz)
Hauteur de source	0.5 m	0.05 m [Gaulin2000]
Spectre d'émission	Unique [EN1793p3]	Drainant/Non drainant [Abq2008]
Discretisation	[[NMPB96],5.1.3]	Rédaction contraignante. Plusieurs cas pour la discretisation équiangulaire [LRS2007]
Etendue minimale de la ligne-source	Non spécifiée	Rapport de distances, longueur minimale du rayon direct le plus long [CSTB2007]
Longueur maximale de trajet	Néant	2000 m [CSTB2007]
Facteur de sol G	0 ou 1	Valeurs de G en fonction de la nature du sol [Emb1997] déduites de la résistance au passage de l'air σ par $G = \min((300/\sigma)^{0.57}, 1)$
Effet sol en conditions favorables	Dérivé de [ISO9613p2]	Dérivé de $A_{sol,H}$ NMPB-Routes-96 [CSTB2002]
Talus de déblai	Prise en compte dans le plan moyen	A_{talus} ou Δ_{talus} [CSTB2002]
Transition A_{sol}/A_{dif}	Test à 500 Hz [[NMPB96],7.4]	Test pour chaque bande de tiers d'octave [LRS2005]
Prise en compte des écrans bas	Non	Oui [CSTB2007]
Plafonnement de Δ_{dif}	25 dB sur arête horizontale [[NMPB96],7.4.2]	Seulement sur Δ_{dif} figurant dans le calcul de A_{dif} [SETRA07]
Différence de marche en conditions favorables	Rehaussement au droit des arêtes de diffraction [[NMPB96],7.4.3]	Calcul de la longueur des rayons courbes [SETRA04]
Forfaitisation de $A_{sol(S,O)}$	Possible dans certains cas [[NMPB96],7.4.4]	Possibilité supprimée

TAB. J.1 – Synthèse des changements.



La NMPB-Routes-2008 est la méthode française de prévision du bruit routier issue de la méthode expérimentale NMPB-Routes-1996. Elle est conçue aussi bien pour les études d'impact de projets routiers que pour la réalisation de cartes de bruit en application de la directive 2002/49/CE.

Cette méthode prend en compte l'effet de la micrométéorologie sur la propagation du son. Pour ce faire, elle prescrit pour chaque trajet source-récepteur un calcul de niveau sonore en conditions favorables à la propagation du son et un calcul en conditions homogènes. Ce dernier calcul fournit un majorant du niveau sonore en conditions défavorables à la propagation du bruit. La somme des niveaux en conditions favorables et en conditions homogènes, pondérée par la probabilité d'occurrence des conditions favorables et par son complément pour les conditions homogènes, fournit le niveau sonore de long terme.

Le présent document est destiné à la fois aux utilisateurs (bureaux d'études, services de l'Etat) et aux éditeurs de logiciels. Il spécifie la décomposition d'une infrastructure linéaire en sources ponctuelles, la caractérisation micrométéorologique d'un site, la recherche de trajets élémentaires et le calcul de l'atténuation sur un trajet élémentaire. Les probabilités d'occurrences de conditions favorables y sont tabulées pour 41 stations météorologiques réparties sur le territoire français.

La NMPB-Routes-2008 est une révision en profondeur de la méthode initiale. La confrontation à la mesure montre que la NMPB-Routes-2008 améliore significativement la justesse de la prévision du bruit routier. Du point de vue de l'utilisateur, la méthode révisée apporte plus de finesse, aussi bien en matière de prise en compte de la topographie, que d'étude de moyens de protection contre le bruit, sans augmenter significativement les durées de calcul.



Document disponible au bureau de vente du Sétra

46 avenue Aristide Briand - BP 100 - 92225 Bagneux Cedex - France
téléphone : 33 (0)1 46 11 31 53 - télécopie : 33 (0)1 46 11 33 55
Référence : **0924-2** - Prix de vente : **20 €**

*Couverture - crédit photos : Cete de Lyon/Lebert ; Cete de l'Est/Duilleux ; DREIF/Gorby
Conception graphique de la couverture : Philippe Masingarbe (Sétra)
Impression : Caractère - 2, rue Monge - BP 224 - 15002 Aurillac Cedex
L'autorisation du Sétra est indispensable pour la reproduction, même partielle, de ce document
© 2009 Sétra - Dépôt légal : 2^{ème} trimestre 2009 - ISBN : 978-2-11-095825-9*

Ce document participe à la protection de l'environnement.
Il est imprimé avec des encres à base végétale sur du papier écolabélisé PEFC.

CTBA/06-00743



Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagement

46 avenue Aristide Briand
BP 100 - 92225 Bagneux
Cedex - France
tél : 33 (0)1 46 11 31 31
fax : 33 (0)1 46 11 31 69

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique du MEEDDAT

