NRC·CNRC

NRC Publications Archive
Archives des publications du CNRC

Mesures de l'isolation acoustique d'une habitation à ossature de bois soumise au bruit d'aéronefs

Bradley, J. S.; Lay, K.; Norcross, S. G.

For the publisher's version, please access the DOI link below./ Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

Publisher's version / Version de l'éditeur:
https://doi.org/10.4224/20378801
Rapport Interne de l'IRC; no. IRC-IR-831F, 2002-03-01

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :
https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=3295613b-6968-4cf2-aae9-f625e10334fe
https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=3295613b-6968-4cf2-aae9-f625e10334fe

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at
https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright
READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site
https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits
LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.

National Research Council Canada | Conseil national de recherches Canada

Canada

Mesures de l'isolation acoustique d'une habitation à ossature de bois soumise au bruit d'aéronefs

J.S. Bradley, K. Lay et S.G. Norcross

Rapport interne de l'IRC, IRC IR-831F

Novembre 2001 (révisé Mars 2002)

Remerciements

Le soutien financier du projet IBANA a été principalement assuré par Transports Canada, le ministère de la Défense nationale et le Conseil national de recherches du Canada. Des fonds supplémentaires ont été versés par l'Administration de l'aéroport international de Vancouver. Nous tenons aussi à remercier le personnel des aéroports d'Ottawa, de Toronto et de Vancouver qui nous ont considérablement aidés à effectuer les différentes mesures sur le terrain.

Avertissement

Les conclusions du présent rapport sont le fruit d'essais et d'analyses menés par le laboratoire d'acoustique de l'Institut de recherche en construction du Conseil national de recherches du Canada. Bien qu'elles soient censées constituer la meilleure interprétation des données recueillies, d'autres interprétations sont possibles, et les présents résultats peuvent ne pas exprimer les politiques de Transports Canada ou du ministère de la Défense nationale.

Résumé

Le présent rapport établit une comparaison des mesures de l'isolation acoustique d'une habitation d'essai soumise au bruit d'aéronefs à l'aéroport d'Ottawa et ce, pour différentes configurations. Il comprend également les prévisions établies à partir des mesures en laboratoire pour les mêmes configurations. Des analyses additionnelles ont ensuite porté sur les principales sources d'écarts entre les mesures en laboratoire et celles sur le terrain et des correctifs ont été élaborés pour le logiciel d'isolation acoustique IBANA-Calc. Des formes du spectre de sources visant les types d'aéronefs modernes ont aussi été élaborées pour le logiciel.

La Structure d'essai de l'aéroport d'Ottawa (SEAO) est une structure à ossature de bois simple, représentative des techniques de construction types au Canada, comportant deux pièces principales soumises au bruit des aéronefs. La construction a été modifiée méthodiquement de façon à intégrer des différences dans les murs et les plafonds, à ajouter des fenêtres ainsi que différents orifices de ventilation. Pour certains essais, des murs isolateurs ont été ajoutés dans chaque pièce pour simplifier la situation et faire en sorte que le son ne se transmette principalement que par l'un des murs extérieurs. Pour chacune des configurations, le bruit de l'aéronef au décollage a été enregistré à l'extérieur, dans le champ libre et sur la façade du bâtiment, ainsi qu'à l'intérieur, à trois endroits dans chacune des deux pièces d'essai.

Principales comparaisons

Il existe trois groupes de comparaison des mesures globales d'isolation acoustique. Le premier groupe tient compte des cas de transmission du son par un seul des deux murs simples de l'habitation d'essai. Le deuxième groupe porte sur les murs fenêtrés et le troisième vise les ensembles dotés de différents orifices de ventilation.

(1) Murs

Dans le cas des quatre configurations, l'indice de réduction du bruit (RB) pondéré A global est prévu compte tenu d'un écart-type de –6,4 dBA (soit de –8,7 à –4,3 dBA). Lorsque des correctifs supplémentaires sont apportés de façon à prendre en considération le son réfléchi au sol et la transmission indirecte due à la structure, l'écart-type est passé à –3,1 dBA (soit de –5,4 à –1,1 dBA). Les valeurs RB mesurées sont supérieures (meilleures) aux valeurs prévues. Les différences de transmission du son en fonction de la résonance structurale principale et le son incident réduit du côté d'approche de l'immeuble sont les causes principales des autres écarts de prévision.

(2) Fenêtres

Les cas touchant les fenêtres sont prévus avec une précision accrue parce que les niveaux sonores intérieurs sont dominés par les fréquences moyennes et, par conséquent, moins touchés par les effets aggravants des réflexions au sol à basse fréquence et de la directionalité basse fréquence des aéronefs. Les valeurs RB pondérées A globales des études sur les fenêtres sont prévues compte tenu d'un écart moyen d'à peine 0,5 dBA (soit de –2,4 à +1,6 dBA). Ce résultat est en partie dû aux écarts positifs aux basses fréquences qui compensent les écarts négatifs aux fréquences élevées.

(3) Orifices de ventilation

Les orifices de ventilation de toit, de faîte, et d'avant-toit ont habituellement peu d'incidence, alors que les orifices muraux influent considérablement sur l'isolation acoustique mesurée. Les essais en laboratoire sur les orifices de ventilation de toit et de faîte révèlent une incidence moindre sur l'isolation acoustique lorsque de la fibre isolante est installée dans l'entretoit, lorsque deux couches de placoplâtre sont en place et lorsque le nombre d'orifices de ventilation de toit est moindre. Lorsqu'un certain nombre d'orifices de ventilation devrait être installé dans les

habitations dont l'entretoit est isolé de fibre R40, les orifices de ventilation de toit entraînent une réduction d'environ 1 dBA de la valeur RB pondérée A globale.

Les essais des orifices muraux, raccordant directement l'extérieur aux espaces intérieurs ont indiqué des réductions de huit et de neuf dBA des valeurs RB pondérées A globales. Aux fréquences moyennes, les orifices accusent une perte de transmission efficace de 0 dBA. Ces orifices devraient faire l'objet d'un traitement acoustique et, dans la mesure du possible, être situés du côté calme de l'immeuble.

Études des écarts entre les résultats des essais en laboratoire et de ceux sur le terrain

Le son réfléchi au sol réduit les niveaux sonores incidents de basse fréquence jusqu'à huit dB. Les calculs, basés sur des survols simulés d'aéronefs, indiquent que cet effet varie selon la hauteur et la distance de l'aéronef par rapport à la façade de l'immeuble et que les effets sont négligeables lorsque les récepteurs sont situés au-dessus du niveau du sol.

L'orientation de la façade influe sur l'isolation acoustique parce qu'elle a une incidence sur l'angle de survol complet et que la transmission du son varie selon l'angle d'incidence du son. En pratique, les tentatives de quantification de ces effets peuvent être adéquates, mais elles sont moins précises qu'il n'était souhaité en raison des complications entraînées par d'importantes répercussions imprévues des réflexions au sol, de la direction des aéronefs et des voies de transmission indirecte structurale.

Les mesures de l'incidence de l'angle vertical de l'aéronef conduisent aux petits écarts prévus dans les valeurs RB mesurées à l'intérieur des limites de précision des mesures.

Les voies de transmission indirecte du bâtiment à ossature de bois ont une forte incidence aux fréquences élevées, mais n'entraînent pas de répercussions importantes sur les niveaux sonores intérieurs pondérés A globaux. Elles sont considérées comme des voies de transmission indirecte de structure et sont perçues comme court-circuitant les avantages de l'utilisation des profilés souples pour poser le placoplâtre sur les murs de l'habitation d'essai.

Les mesures des niveaux sonores incidents réalisées à l'aide de microphones posés sur la façade, conformément aux recommandations des différentes normes, renferment des erreurs importantes pouvant atteindre 12 dB. Les niveaux sonores incidents mesurés sur la façade du bâtiment sont considérablement touchés par les réflexions au sol et les effets de diffraction qui varient selon l'angle vertical de l'aéronef.

Les formes du spectre moyen ont été établies pour quatre catégories d'aéronefs. Comme les mesures du bruit d'hélicoptères sont impossibles, la forme du spectre des hélicoptères est tirée des données publiées par la FAA. Ces dernières sont basées sur les niveaux maximaux relevés en un seul point, ce qui sous-estime le niveau sonore réel à basse fréquence produit par le survol complet d'un aéronef. Les autres nouvelles formes du spectre sont tirées de mesures effectuées aux aéroports d'Ottawa, de Toronto et de Vancouver. L'emploi de formes de spectre anciennes et non pertinentes produit des erreurs pouvant atteindre 10 dB dans les valeurs RB calculées.

Les corrections des formes de spectre de source tenant compte de l'absorption de l'air permettent d'améliorer davantage les nouvelles formes de spectre. D'autres corrections touchant l'incidence des réflexions au sol, l'orientation de la façade et l'angle vertical de l'aéronef ont été établies de façon à améliorer le calcul de l'isolation acoustique du bâtiment dans le logiciel IBANA-Calc.

Table des matières

	page
Remerciements	1
Résumé	2
Table des matières	4
1. Introduction	5
2. Structure d'essai et méthodes de mesure à l'aéroport d'Ottawa	7
2.1 SEAO – Structure d'essai de l'aéroport d'Ottawa	7
2.2 Plan expérimental	8
2.3 Méthodes de mesure	15
2.4 Analyse des données	16
2.5 Calculs	17
3. Réductions du bruit moyennes mesurées pour chacune des configurations	19
3.1 Configurations des murs	19
3.1.1 Comparaisons avec des prévisions simples	19
3.1.2 Réflexion au sol et voies de transmission indirecte	26
3.2 Murs fenêtrés	32
3.3 Orifices de ventilation	42
3.3.1 Orifices de toit, de faîte et d'avant-toit	42
3.3.2 Orifices de ventilation muraux	52
4 Effets de l'angle d'incidence	57
4.1 Essais de haut-parleur source	57
4.2 Effets des variations de façade	60
4.3 Variation des réductions du bruit	69
5 Effets de l'orientation de la façade	75
5.1 Problème	75
5.2 Méthode proposée et complications	76
5.3 Résultats des mesures	77
6 Spectres de source des aéronefs	83
6.1 Spectres moyens mesurés	83
6.2 Corrections d'absorption de l'air et de distance	86
6.3 Spectres de source des hélicoptères	86
6.4 Comparaisons des nouveaux spectres moyens et des autres spectres	88
7 Calculs d'isolation acoustique pour le logiciel IBANA-Calc	92
7.1Calculs d'isolation acoustique de base	92
7.2 Conversions de NEF à Leq24	92
7.3 Corrections des conditions sur le terrain	93
8. Conclusions	97
8.1 Comparaisons principales	97
8.2 Approfondissement des détails	98
8.3 Recherche à venir	99
Ouvrages de référence	100
Annexe I. RB moyenne mesurée dans chacune des configurations	102
Annexe II. Effet de la direction des aéronefs sur les mesures d'isolation acoustique	104
Annexe III. Brouillage entre les bruits d'aéronefs direct et réfléchi au sol	112

1. Introduction

Le présent rapport renferme les résultats d'une série exhaustive de mesures d'isolation acoustique dans une habitation d'essai construite à l'aéroport international d'Ottawa. Les réductions du bruit mesurées ont été obtenues pour différentes configurations de la construction de l'habitation en utilisant comme signal d'essai le bruit réel d'aéronefs. Les réductions du bruit mesurées sont comparées aux réductions du bruit calculées d'après les mesures de perte de transmission du son pour les mêmes éléments de façade, p. ex. les murs et les toits [1], effectuées précédemment en laboratoire.

Ce travail est censé nous aider à mieux comprendre les différences entre les mesures de l'isolation acoustique en laboratoire et l'isolation acoustique efficace des mêmes constructions lorsqu'une partie d'un immeuble complet est soumis aux survols réels d'aéronefs.

Il existe de nombreuses différences entre les conditions des essais en laboratoire et celles de bâtiments réels soumis au bruit d'aéronefs. Pour effectuer en laboratoire les essais standard de l'isolation acoustique des éléments de façade, comme les murs, les plafonds et les composants toit-plafond, on a construit un modèle d'essai entre deux enceintes de réverbération [2,3]. Ces enceintes d'essai de réverbération sont conçues de sorte que le son soit incident sur le modèle d'essai de façon égale à partir de toutes les directions et de sorte que toutes les autres trajectoires acoustiques, différentes des trajectoires traversant directement le modèle, soient négligeables.

Dans la réalité, le bruit produit par un aéronef est incident sur une façade de bâtiment particulière à partir d'une plage limitée d'angles et la façade accuse un angle particulier par rapport à la trajectoire de vol. Les aéronefs constituent des sources de bruit directionnelles et n'émettent pas de bruit également dans toutes les directions. Cette variation du bruit incident d'aéronefs par rapport à la direction de l'aéronef se complique davantage en raison de la variation du niveau sonore selon la distance de l'aéronef qui vole à proximité d'un immeuble. Bien que le bruit de l'aéronef se transmette directement de l'appareil à l'immeuble, il peut arriver qu'une quantité importante d'énergie acoustique soit incidente sur l'immeuble après réflexion sur le sol et d'autres grandes surfaces. Nous savons que la théorie prévoit que la perte de transmission de panneaux souples simples varie selon l'angle d'incidence sonore. Toutefois, on ne sait pas exactement la façon dont l'angle d'incidence joue sur la perte de transmission dans le cas de façades d'immeubles comprenant des structures plus complexes.

Sur le terrain, les immeubles comportent également un certain nombre de trajectoires acoustiques qui sont sciemment éliminées dans les essais standard en laboratoire. Il s'agit de voies de transmission indirecte permettant au son de se propager par la structure de l'immeuble, d'une surface extérieure à une surface intérieure non adjacente. Il existe plusieurs types d'orifices de ventilation de toit et d'avant-toit qui sont nécessaires pour empêcher l'accumulation d'humidité dans les greniers, mais qui peuvent faire office de trajectoires acoustiques efficaces. De même, il existe différents autres orifices de ventilation qui traversent la façade de l'immeuble et peuvent ainsi modifier l'isolation acoustique totale.

Ces travaux essaient de déterminer l'importance de ces différences entre les conditions en laboratoire et celles sur le terrain et d'élaborer des méthodes améliorées de calcul de l'isolation acoustique prévue des immeubles soumis au bruit d'aéronefs. Les réductions du bruit sont mesurées dans les deux pièces de l'habitation d'essai, ce qui permet de concevoir une série de changements systématiques des méthodes de construction. Les premiers bruits d'essai subissent une contrainte de façon à les faire pénétrer dans l'habitation d'essai principalement par un seul mur; c'est-à-dire que des murs isolateurs sont érigés devant les autres murs exposés. Les façades sont identiques aux murs utilisés dans les essais précédents en laboratoire. Les modifications

accroissent systématiquement la complexité du système mesuré et finissent par intégrer les fenêtres et différents orifices de ventilation.

Ce travail constitue un composant important du projet IBANA (isolation acoustique des immeubles contre le bruit produit par les aéronefs). Le projet IBANA global comprend des mesures en laboratoire et sur le terrain de l'isolation acoustique des façades d'immeubles, ainsi que la création d'un logiciel qui permettent l'utilisation pratique des données recueillies pour concevoir l'isolation acoustique extérieure des immeubles contre le bruit produit par les aéronefs.

Le projet IBANA fait suite à une étude exhaustive antérieure de la mesure du bruit d'aéronefs NEF et de différents aspects de la prévision du bruit des aéronefs et de ses effets au Canada [4-6]. Cette étude a permis de conclure, entre autres, que l'isolation acoustique supérieure des immeubles constituait un correctif essentiel pour minimiser l'incidence du bruit d'aéronefs. Il a aussi été déterminé que les renseignements et lignes directrices techniques [7] existant au Canada pour améliorer l'isolation acoustique n'étaient pas à jour et devaient être abordées sous un angle nouveau. Une étude approfondie des problèmes d'isolation acoustique des façades d'immeubles a également été réalisée [8]. Cette étude a révélé que, bien que les principes généraux fussent habituellement bien compris, il n'existait presque aucune donnée représentative de l'isolation acoustique des constructions modernes au Canada. En outre, l'étude indiquait que les rapports entre les données d'isolation acoustique recueillies en laboratoire et sur le terrain étaient mal compris et que les lignes directrices canadiennes actuelles étaient fondées sur des spectres de bruits d'aéronefs non représentatifs des types d'aéronefs d'aujourd'hui.

Le projet IBANA comprend les éléments clés suivants :

- Mesures en laboratoire de l'isolation acoustique de différents composants de façades d'immeubles, y compris différentes structures de murs et de toits, ainsi que les fenêtres et l'incidence des orifices de ventilation [1].
- Mesures sur le terrain de l'isolation acoustique de différentes configurations d'une habitation à ossature de bois simple érigée à l'aéroport d'Ottawa.
- Élaboration de méthodes de conversion des mesures d'isolation acoustique en laboratoire et sur le terrain.
- Mise au point d'un logiciel qui permet la conception plus exacte et pratique de l'isolation acoustique nécessaire des immeubles soumis au bruit d'aéronefs.
- Validation sur le terrain de la nouvelle méthode de conception.

Le présent rapport énonce d'abord les principaux résultats des mesures de réduction du bruit, puis les différentes analyses qui tiennent compte d'effets particuliers en détail. Le chapitre 2 décrit le schéma expérimental ainsi que les méthodes de mesure et d'analyse. Le chapitre 3 établit la comparaison entre les réductions du bruit moyennes mesurées et les réductions du bruit prévues d'après les résultats en laboratoire. Les chapitres 4 et 5 portent respectivement sur les effets des angles d'incidence vertical et horizontal. Le chapitre 6 décrit l'élaboration des formes de spectre de source standard des types d'aéronefs modernes et le chapitre 7 traite des corrections apportées aux mesures en laboratoire de perte de transmission du son qui peuvent être comprises dans les calculs du logiciel IBANA-Calc. Le rapport compte aussi plusieurs annexes qui renferment les résultats de calculs exhaustifs propres à des sujets donnés.

2. Structure d'essai et méthodes de mesure à l'aéroport d'Ottawa

2.1 SEAO – Structure d'essai de l'aéroport d'Ottawa

La Structure d'essai de l'aéroport d'Ottawa (SEAO) est censée constituer la plus simple des ossatures de bois représentative des habitations modernes au Canada. La structure comporte deux pièces principales qui font face à la trajectoire des aéronefs et une petite aire de rangement située du côté opposé à cette trajectoire. La figure 1 présente le plan de la structure et le croquis de son aspect extérieur. Le plan comprend les murs isolateurs qui ont été érigés pour bloquer davantage la propagation directe du son par l'un des deux murs extérieurs de chacune des pièces. Ils ont été ajoutés et enlevés dans le cadre des changements expérimentaux décrits ci-dessous.

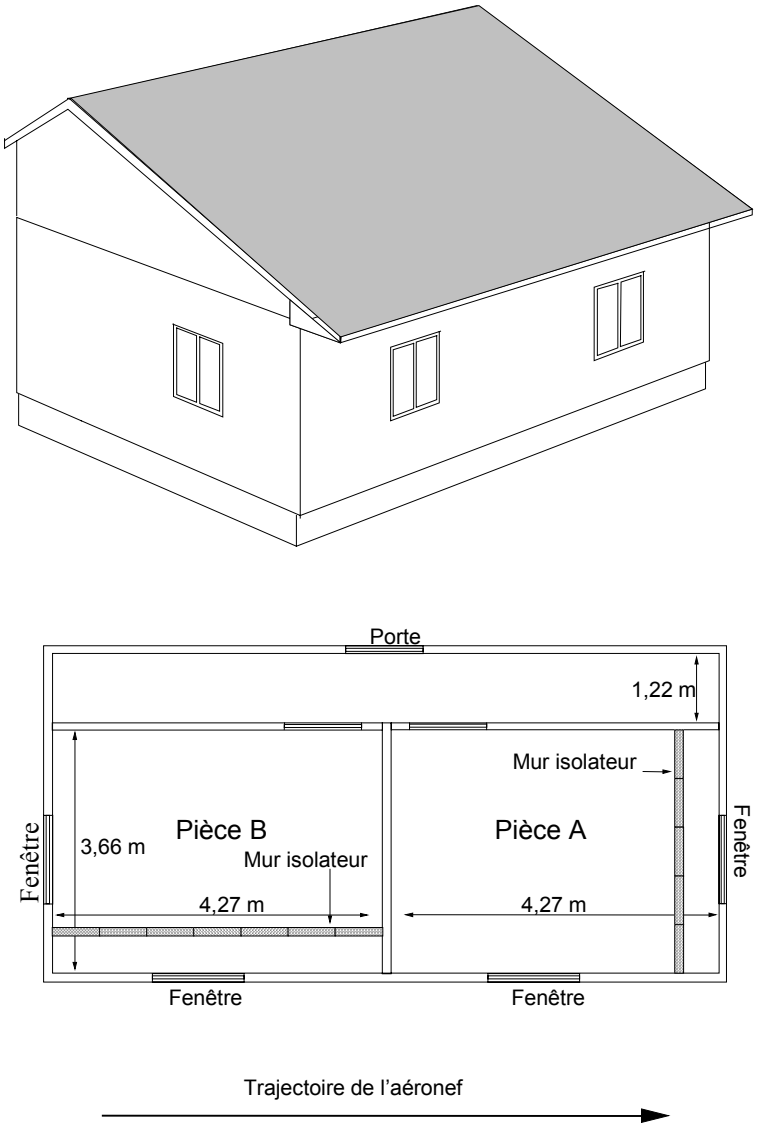


Figure 1. Croquis et plan d'étage de la SEAO.

Bon nombre des détails de la construction n'ont pas été modifiés pendant les essais. Le plancher était fabriqué de contreplaqué de 16 mm posé sur des solives-I en bois. Celles-ci reposaient sur une fondation en blocs de béton. Les murs étaient faits de poteaux en bois de 140 mm (2 x 6) à

espacement de 406 mm (16 pouces). Le lambrissage extérieur de panneaux de copeaux orientés 11 mm était revêtu de parement de vinyle et la cavité murale remplie d'isolation thermique en fibre de verre.

À l'origine, les surfaces intérieures des deux murs extérieurs de chacune des pièces étaient constituées d'une seule couche de placoplâtre ordinaire de 13 mm directement fixée aux poteaux. Les surfaces des murs intérieurs (c.-à-d., entre les pièces) étaient toujours constituées de deux couches de placoplâtre fixées à des profilés souples de façon à minimiser la propagation du son entre les espaces internes. Pendant la série d'essais, les surfaces intérieures des murs extérieurs ont été modifiées, c'est-à-dire que la couche unique de placoplâtre posée directement sur les poteaux a été remplacée par deux couches fixées par l'intermédiaire de profilés souples.

Le toit était fabriqué de fermes en bois lambrissées de panneaux de copeaux orientés de 11 mm recouverts de bardeaux d'asphalte. L'entretoit était isolé à l'aide de 264 mm de fibre de verre (R40). Pendant les premiers essais, le plafond était fait de deux couches de placoplâtre ordinaire de 13 mm fixées par l'intermédiaire de profilés souples. Pour des essais ultérieurs, la double couche a été remplacée par une seule couche de placoplâtre posée directement sur l'ossature du toit. Les autres changements apportés comprennent l'ajout de différents orifices de ventilation et l'installation de fenêtres. Les particularités de chaque construction sont présentées dans la section ci-dessous.

La SEAO était située à proximité de la trajectoire de vol des aéronefs décollant de la piste 25 de l'aéroport d'Ottawa. Plus particulièrement, elle se trouvait à 240 m de la trajectoire de vol à 1000 m de l'extrémité ouest de la piste et sur le terrain de l'aéroport. La façade principale de l'immeuble était parallèle à la piste 25. L'angle vertical moyen de l'aéronef décollant devant la structure était de 55 degrés au-dessus de l'horizontale.

2.2 Plan expérimental

Le plan expérimental consistait à mettre à l'essai une série de structures dont la complexité devait être méthodiquement accrue de façon à obtenir une construction s'apparentant à un immeuble complet. Pour les premiers essais, l'isolation acoustique toit-plafond a été augmentée par la pose de deux couches de placoplâtre sur profilés souples au plafond. Lors de ces essais, les murs extérieurs assuraient la trajectoire acoustique dominante. Pour simplifier davantage la situation, des essais ont été exécutés après l'érection d'un mur isolateur devant l'un des murs extérieurs de sorte que la trajectoire acoustique dominante soit celle d'un seul mur extérieur. Cette mesure devait faciliter l'identification des incidences liées à l'orientation de la façade par rapport à la trajectoire de vol de l'aéronef. Dans tous les essais, les mêmes conditions ont été créées dans les deux pièces de la structure d'essai, mais des écarts étaient prévus parce que l'une d'elles était plus exposée que l'autre aux aéronefs à l'atterrissage et que l'autre était davantage soumise au bruit des aéronefs au décollage. Le mur isolateur était fait de panneaux préfabriqués comportant deux couches de placoplâtre de 13 mm posées sur une ossature en poteaux d'acier léger dont la cavité est remplie de matériau d'isolation acoustique. Tous les joints ont été rubanés de façon à garantir l'étanchéité à l'air. Le mur isolateur se trouvait à 300 mm de la surface intérieure du mur extérieur de la pièce.

Les trois premières configurations d'essai se présentent comme suit : (essai 1) seul le mur faisant face à la trajectoire de l'aéronef est exposé, (2) seuls les murs d'extrémité perpendiculaires à la trajectoire de vol sont exposés et (3) les deux murs extérieurs de chacune des pièces sont exposés. (Il n'existe aucune configuration (4)). Quant à la configuration (5), les murs extérieurs ont été modifiés; c.-à-d. que la couche simple de placoplâtre posée directement a été remplacée par une couche double fixée par l'intermédiaire de profilés souples. Pour ce qui est du plafond, les deux couches fixées par l'intermédiaire de profilés souples ont été remplacées par une couche simple posée directement. Cette configuration a servi de base ou de référence pour les changements subséquents selon lesquels des fenêtres ou des orifices de ventilation ont été ajoutés.

L’ajout d’une double couche de placoplâtre et de profilés souples sur les murs était censé faciliter l’identification des changements à la trajectoire acoustique par le composant toit-plafond en raison de la pose d’orifices de ventilation. Pour cette configuration d’essai (6), six orifices de ventilation ont été ajoutés au toit. Ces orifices sont les mêmes qui ont servi aux essais en laboratoire et ils assurent le double de l’aération de toit prescrite par le Code national du bâtiment. Quant à la configuration (7), le lambrissage en panneaux de copeaux orientés de (11) mm installé sur les soffites de l’avant-toit a été remplacé par des prises d’aérations de l’avant-toit en métal perforé de sorte que le toit comprenne des orifices de ventilation d’avant-toit et de toit. Pour ce qui est de la configuration (8), les orifices de ventilation de toit ont été enlevés et les trous obturés, et un orifice de ventilation de faîte a été ajouté sur toute la longueur du faîte du toit. Les orifices de ventilation de faîte et d’avant-toit ont été conservés pour tous les essais subséquents, y compris lorsque des fenêtres ont été ajoutées.

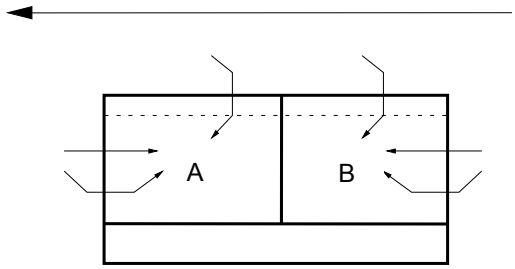
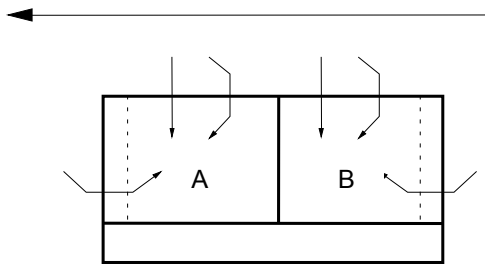
La configuration d’essai (9) comprend des orifices de ventilation installés dans les murs de chacune des pièces d’essai (outre les orifices de ventilation de faîte et d’avant-toit). Pour les essais (10), (11) et (12), des fenêtres ont été ajoutées, d’abord aux murs d’extrémité (10), puis aux murs avant (11) et enfin aux deux types de murs (12). Les deux fenêtres ont été installées dans chaque pièce pour tous les essais, mais la transmission du son par l’autre fenêtre a été minimisée par l’érection de murs isolateurs devant elles.

Deux autres essais ont été réalisés sur la structure dont les deux fenêtres étaient exposées (essais (13) et (14). Dans le cas de l’essai (13), des enregistrements supplémentaires ont été effectués à l’aide de microphones placés sur chaque façade extérieure de l’immeuble. Dans l’essai (14), un haut-parleur source émettait le son et sa position était méthodiquement changée.

Le tableau I résume les différentes configurations de chacun des essais. Les particularités de chaque essai sont présentées dans les différentes parties du tableau ci-dessous.

Essai	Plafond		Murs		Murs avant		Murs d'extrémité		Vent. toit	Vent. avant-toit
	Plac.	PS	Plac.	PS	Fenêtre	M. isol.	Fenêtre	M. isol.		
1	2	oui	1	non	non	oui	non	non	non	non
2	2	oui	1	non	non	non	non	oui	non	non
3	2	oui	1	non	non	non	non	non	non	non
4										
5	1	non	2	oui	non	non	non	non	non	non
6	1	non	2	oui	non	non	non	non	toit	non
7	1	non	2	oui	non	non	non	non	toit avant-toit	oui
8	1	non	2	oui	non	non	non	non	faîte	oui
9	1	non	2	oui	vent	non	non	non	faîte	oui
10	1	non	2	oui	oui	oui	oui	non	faîte	oui
11	1	non	2	oui	oui	non	oui	oui	faîte	oui
12	1	non	2	oui	oui	non	oui	non	faîte	oui
13	1	non	2	oui	oui	non	oui	oui	faîte	oui
14	1	non	2	oui	oui	non	oui	oui	faîte	oui

Tableau I. Résumé des particularités de chaque configuration de mesures à la SEA.
Vent. = Orifices de ventilation
Plac. = nombre de couches de placoplâtre de 13 mm
PS = profilés souples
M. isol. : présence de murs isolateurs

Essai : n° 1	**Essai : n° 2**
Objet : évaluer la transmission du son par les seuls murs d'extrémité des pièces d'essai.	**Objet :** évaluer la transmission du son par les seuls murs avant des pièces d'essai.
	
Construction **Murs :** – une couche de placoplâtre de 13 mm posée directement. **Plafond :** – deux couches de placoplâtre de 13 mm fixées à l'aide de profilés souples. **Orifices de ventilation** : – aucun. **Murs isolateurs** : – devant les murs avant (pointillés)	**Construction** **Murs :** – une couche de placoplâtre de 13 mm posée directement. **Plafond :** – deux couches de placoplâtre de 13 mm fixées à l'aide de profilés souples. **Orifices de ventilation :** – aucun. **Murs isolateurs : –** devant les murs d'extrémité (pointillés)

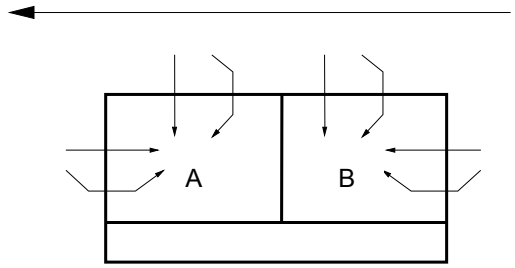
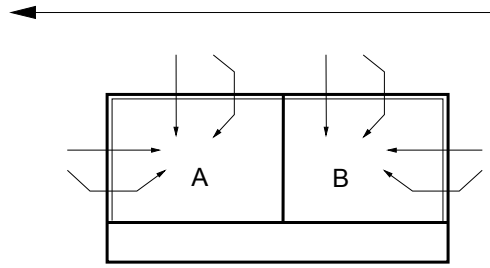
Essai : n° 3	**Essai : n° 5**
Objet : évaluer la transmission du son par les murs d'extrémité et avant des pièces d'essai.	**Objet :** base ou référence des essais avec orifices de ventilation et fenêtres.
	
Construction **Murs :** – une couche de placoplâtre de 13 mm posée directement. **Plafond :** – deux couches de placoplâtre de 13 mm fixées à l'aide de profilés souples. **Orifices de ventilation :** – aucun. **Murs isolateurs :** – aucun.	**Construction** **Murs :** – une couche de placoplâtre de 13 mm posée directement. **Plafond :** – deux couches de placoplâtre de 13 mm fixées à l'aide de profilés souples. **Orifices de ventilation :** – aucun. **Murs isolateurs :** – aucun

Tableau II. Description des essais 1, 2, 3 et 5. La flèche longue indique la trajectoire de l'aéronef par rapport à l'habitation d'essai. Les flèches droites traversant les murs indiquent les voies de

transmission directe et les flèches courbées indiquent les voies de transmission indirecte de structure.

Essai : n° 6	**Essai : n° 7**
Objet : effet de l'ajout d'orifices de ventilation de toit.	**Objet :** de l'ajout d'orifices de ventilation de toit et d'avant-toit.
(voir figure de l'essai n° 5)	(voir figure de l'essai n° 5)
Construction	**Construction**
Murs : – deux couches de placoplâtre de 13 mm fixées à l'aide de profilés souples.	**Murs :** – deux couches de placoplâtre de 13 mm fixées à l'aide de profilés souples.
Plafond : – une couche de placoplâtre de 13 mm posée directement.	**Plafond :** – une couche de placoplâtre de 13 mm posée directement.
Orifices de ventilation : – 6 orifices de ventilation de toit.	**Orifices de ventilation :** – 6 orifices de ventilation de toit et orifices de ventilation d'avant-toit.
Murs isolateurs : – aucun	**Murs isolateurs :** – aucun

Essai : n°8	**Essai : n°9**
Objet : effet d'orifices de ventilation de faîte et d'avant-toit.	**Objet :** effet d'orifices de ventilation muraux.
(voir figure de l'essai n° 5)	(voir figure de l'essai n° 5)
Construction	**Construction**
Murs : – deux couches de placoplâtre de 13 mm fixées à l'aide de profilés souples.	**Murs :** – deux couches de placoplâtre de 13 mm fixées à l'aide de profilés souples.
Plafond : – une couche de placoplâtre de 13 mm posée directement.	**Plafond :** – une couche de placoplâtre de 13 mm posée directement.
Orifices de ventilation : – orifices de ventilation de faîte et orifices de ventilation d'avant-toit.	**Orifices de ventilation :** – orifices de ventilation muraux et orifices de ventilation de faîte et d'avant-toit.
Murs isolateurs : – aucun.	**Murs isolateurs :** – aucun

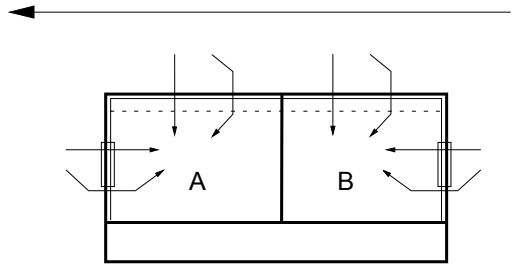
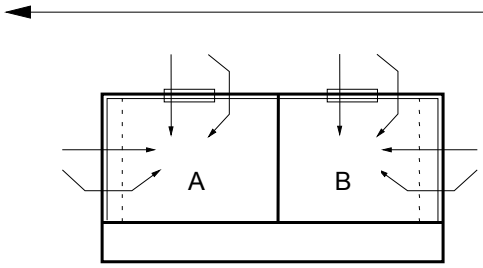
Essai : n° 10	**Essai : n° 11**
Objet : effet de fenêtres d'extrémité.	**Objet :** effet de fenêtres avant.
	
Construction **Murs :** – deux couches de placoplâtre de 13 mm fixées à l'aide de profilés souples. **Plafond :** – une couche de placoplâtre de 13 mm posée directement. **Orifices de ventilation :** – orifices de ventilation de toit- faîte et orifices de ventilation d'avant-toit. **Murs isolateurs :** – situés devant les murs avant (pointillés)	**Construction** **Murs :** – deux couches de placoplâtre de 13 mm fixées à l'aide de profilés souples. **Plafond :** – une couche de placoplâtre de 13 mm posée directement. **Orifices de ventilation :** – orifices de ventilation de toit-faîte et orifices de ventilation d'avant-toit. **Murs isolateurs :** – situés devant les murs d'extrémités (pointillés)

Tableau II. Description des essais 6, 7, 8, 9, 10 et 11. La flèche longue indique la trajectoire de l'aéronef par rapport à l'habitation d'essai. Les flèches droites traversant les murs indiquent les voies de transmission directe et les flèches courbées indiquent les voies de transmission indirecte de structure.

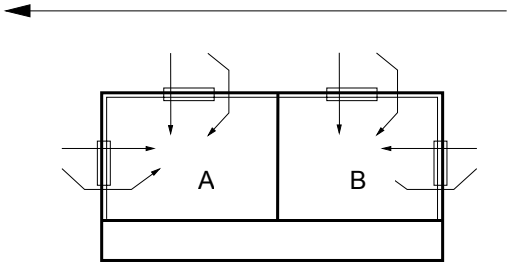
<table>
<tr><td>Essai : n° 12</td><td>Essai : n° 13</td></tr>
<tr><td>Objet : effet de fenêtres d’extrémité et avant.</td><td>Objet : comparer les niveaux sonores extérieurs à chaque façade.</td></tr>
<tr><td rowspan="2"> 
</td><td>(voir figure de l’essai n° 12)</td></tr>
<tr><td>Construction
(identique à celle de l’essai n°12)</td></tr>
<tr><td>Construction
Murs : – deux couches de placoplâtre de 13 mm fixées à l’aide de profilés souples.
Plafond : – une couche de placoplâtre de 13 mm posée directement.
Orifices de ventilation : – orifices de ventilation de toit-faîte et orifices de ventilation d’avant-toit.
Murs isolateurs : – aucun.</td><td>Essai : n° 14</td></tr>
<tr><td></td><td>Objet : mesurer les effets de l’angle d’incidence avec haut-parleur source.</td></tr>
<tr><td></td><td>(voir figure de l’essai n° 12)</td></tr>
<tr><td></td><td>Construction
(identique à celle de l’essai n°12)</td></tr>
</table>

Tableau II. Description des essais 12, 13 et 14. La flèche longue indique la trajectoire de l’aéronef par rapport à l’habitation d’essai. Les flèches droites traversant les murs indiquent les voies de transmission directe et les flèches courbées indiquent les voies de transmission indirecte de structure.

2.3 Méthodes de mesure

Les mesures sur le terrain des réductions du bruit à la SEAO ont été réalisées par l'enregistrement simultané de survols d'aéronefs à la fois à l'extérieur et à l'intérieur à l'aide de huit microphones. Deux microphones étaient placés à l'extérieur et trois microphones étaient installés dans chacune des pièces d'essai. Le microphone extérieur principal était monté sur un mât à 8,5 m au-dessus du sol à proximité de la structure d'essai. Il servait à enregistrer les niveaux sonores incidents d'aéronefs en champ libre. Le deuxième microphone extérieur était fixé au centre de la façade de l'immeuble exposée directement au survol des aéronefs. Il était placé à 1,65 m au-dessus du sol, soit à 1,2 m du niveau du plancher des pièces d'essai. Les microphones de chacune des pièces ont été répartis de façon à échantillonner les niveaux sonores à plus d'un mètre des surfaces de la pièce. Les positions des micros sont les mêmes pour tous les enregistrements.

Le microphone du mât était un modèle Bruel et Kjaer de type 4921 conçu pour l'extérieur. Tous les autres microphones étaient des modèles Bruel et Kjaer de 4190 à condensateur de 12 mm raccordés à des préamplificateurs Bruel et Kjaer de type 4921 à adaptation d'impédance. Les sept microphones étaient alimentés par des blocs à piles ACO Pacifico qui servaient aussi à amplifier les signaux des microphones. Cinq voies de signaux étaient raccordées à l'enregistreur audio-numérique huit pistes Tascam DA38 8-par l'intermédiaire d'émetteurs et de récepteurs numériques X-wire. Les trois autres voies étaient directement raccordées par câble à l'enregistreur. Tout l'équipement était alimenté par piles. La figure 2 présente un schéma d'ensemble de l'équipement de mesure.

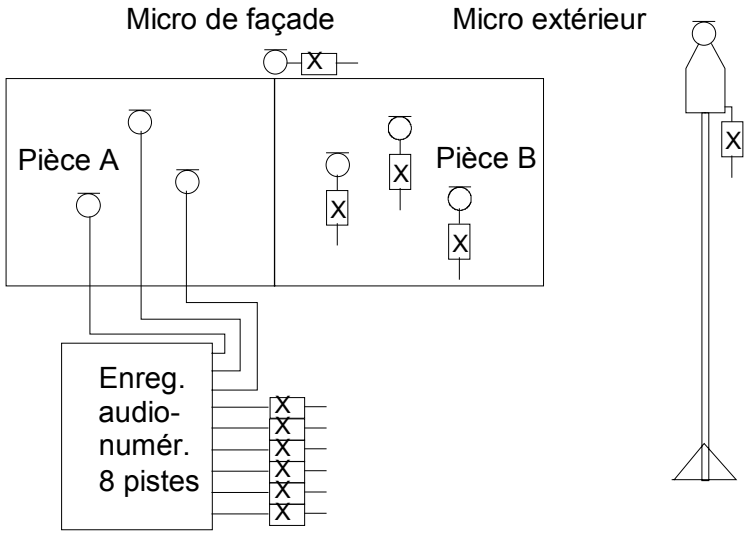


Figure 2. Schéma d'ensemble du système d'enregistrement sur le terrain.
(X = Émetteur ou récepteur numérique X-wire).

Les enregistrements continus ont permis de capter tous les passages d'aéronefs sur une période d'environ deux heures. Les tonalités d'étalonnage ont été enregistrées sur chacune des pistes au commencement et à la fin de la période de deux heures. Le technicien se tenait à l'extérieur de l'habitation d'essai pendant les enregistrements et prenait note de la hauteur et du type de chaque aéronef. Le technicien pouvait écouter les communications radio entre la tour de contrôle de l'aérodrome et les aéronefs pour se tenir au courant des passages imminents et établir les types d'aéronefs. La figure 3 montre l'opérateur affairé à déterminer la note de l'angle vertical d'un aéronef. À cette fin, le technicien, placé à un point d'observation fixe, aligne l'aéronef en vol sur les repères qui font saillie de l'extrémité du toit. Depuis la position du technicien, les angles de chaque repère sont connus, ce qui permet de déterminer la hauteur de l'aéronef.

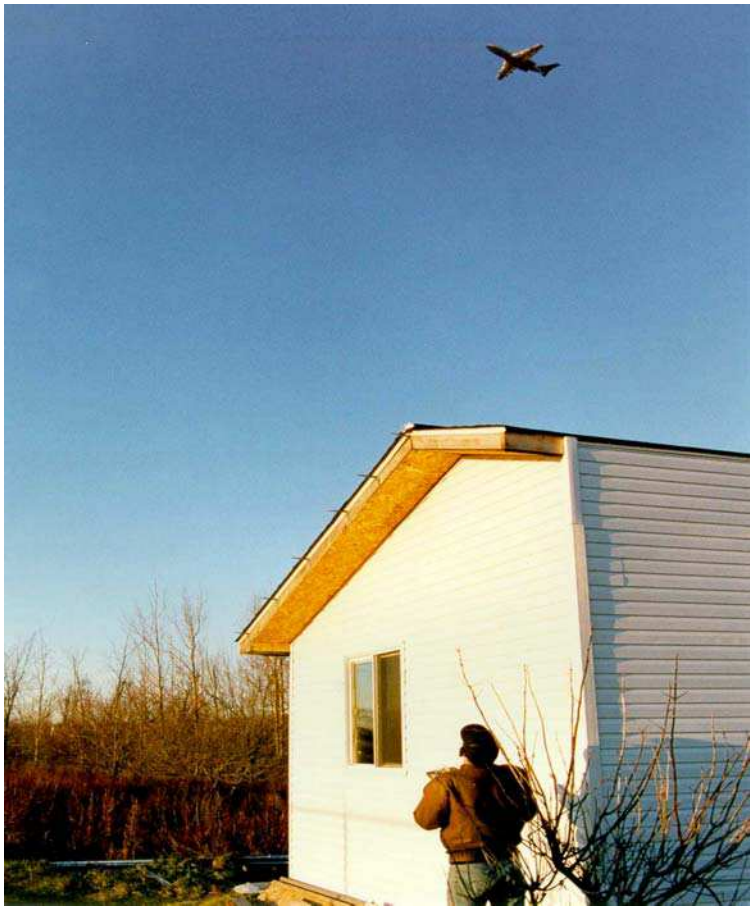


Figure 3. Technicien occupé à déterminer l'angle vertical d'un aéronef en vol pendant les enregistrements des niveaux sonores.

Les durées de réverbération ont aussi été mesurées à plusieurs reprises dans chaque pièce de la structure d'essai. Un signal d'essai à bruit rose standard a été émis dans chaque pièce au moyen d'un gros haut-parleur de sorte que les résultats de réduction du bruit des aéronefs soient uniformes dans la gamme de 50 à 5 000 Hz. Cinq décroissances ont été enregistrées à chacune des trois positions de microphone de chaque pièce. Un analyseur de tiers (1/3) d'octave en temps réel de type 830 de Norwegian Electronics a servi à déterminer les durées de réverbération dans les 15 premiers dB de chaque décroissance. La moyenne des valeurs a été établie à partir des données des trois positions de microphone dans les deux pièces. Bien que les décroissances des basses fréquences soient extrêmement irrégulières, ces prévisions sont considérées comme adéquates dans les calculs de réduction du bruit.

2.4 Analyse des données

La première étape de traitement des enregistrements consistait à en faire l'écoute et à identifier les passages d'aéronefs particulièrement bruyants qui n'étaient pas altérés par d'autres types de bruit. Après que les passages acceptables ont été isolés sur la bande, ils ont fait l'objet d'un traitement servant à établir les spectres de bande de tiers d'octave à intervalles de 0,1 s pour chacun des huit signaux des microphones, de façon à obtenir un total de 30 s pour chacun des passages d'aéronef. Cette opération a été réalisée par la lecture des bandes commandée par

ordinateur, deux voies à la fois, dans un analyseur en temps réel Bruel et Kjaer de type 2144. Les spectres multiples obtenus pour chacune des huit pistes ont été stockés dans un seul fichier de tableur électronique et comprenaient toutes les bandes de tiers d'octave de 50 à 5000 Hz.

Les données ont été traitées de façon approfondie au moyen d'un logiciel tableur. On a d'abord compilé les résultats des trois microphones de chaque pièce pour établir un résultat moyen pour une seule pièce. L'intervalle des données a ensuite été réduit à 1 s par l'addition des valeurs par incrément de 0,1 s pour chaque période de 1 s. Par la suite, les données ont fait l'objet d'une réduction supplémentaire par l'addition des niveaux de chaque bande qui étaient compris dans les 10 dB de la valeur maximale pour calculer les niveaux d'exposition sonore (SEL) dans chaque bande de fréquence et pour chaque position de microphone. C'est-à-dire que les spectres SEL ont été obtenus pour les enregistrements des microphones intérieurs, l'enregistrement du microphone de façade et les moyennes des enregistrements des microphones de chacune des pièces. La différence entre les spectres extérieur et intérieur ont servi à déterminer les réductions du bruit d'une structure en particulier pour chaque passage d'aéronef. Les spectres SEL finals ont été sauvegardés de pair avec les renseignements portant sur le type d'aéronef et l'angle vertical d'un survol particulier.

2.5 Calculs

La plupart des comparaisons portent sur les réductions du bruit entre les résultats du microphone extérieur (champ libre) et les niveaux sonores intérieurs moyens dans chaque pièce. Comme cela a été décrit précédemment, l'énergie sonore des enregistrements des trois microphones de chaque pièce a d'abord été traitée de façon à produire un résultat moyen par pièce. Les différences entre les niveaux des microphones intérieurs et les niveaux intérieurs moyens par pièce en bandes de tiers octave donnent les réductions du bruit du passage particulier d'un aéronef. Les spectres de réduction du bruit (RB) moyenne ont ensuite été déterminés par une moyenne d'énergie de tous les passages d'aéronefs pour chacune des constructions.

Des calculs simples ont permis d'établir approximativement les réductions du bruit à partir des mesures en laboratoire de la perte de transmission du son des composants de façade. Lorsqu'il fallait tenir compte de plus d'un composant, la perte de transmission totale efficace a été déterminée comme suit à partir de la somme pondérée A (de surface) des coefficients de transmission de chaque composant.

$$\tau = \frac{\sum_i \tau_i S_i}{\sum_i S_i} \qquad (2.1)$$

τ_i et S_i étant respectivement le coefficient de transmission et la surface du composant *i*.

Le coefficient de transmission τ décrit la fraction de l'énergie sonore incidente qui traverse la construction. Il est lié à la perte de transmission du son (*TL*) en décibels comme suit :

$$TL = 10 \log [\ 1/\tau\ ], \text{ dB} \qquad (2.2)$$

La perte de transmission du son (*TL*) est associée aux niveaux sonores intérieurs et extérieurs ainsi qu'à la surface de l'élément de façade (*S*) et à l'absorption du son (*A*) dans la pièce réceptrice. Dans le cas idéal d'incidence d'ondes planes en provenance d'un angle particulier θ,

$$TL = L_1 - L_2 + 10 \log[4S\ \text{COS}(\theta) / A], \text{ dB} \qquad (2.3)$$

Dans ce cas, L_1 correspond au niveau sonore incident extérieur en champ libre et L_2 correspond au niveau sonore intérieur reçu moyen. La réduction du bruit (*RB*), entre les niveaux extérieurs en

champ libre et les niveaux intérieurs moyens (pièce) est obtenue par la soustraction $L_1 - L_2$. L'angle d'incidence par rapport à la normale de la façade correspond à θ.

Entre deux pièces, dans lesquelles il existe un champ diffus approximatif ainsi qu'une moyenne approximative de tous les angles d'incidence, l'équation suivante est valable :

$$TL = L_1 - L_2 + 10 \log[S / A], \text{ dB} \qquad (2.4)$$

Dans ce cas, L_1 correspond au son incident dans le champ sonore diffus de la pièce source. Cette équation peut être considérée comme identique à la formule d'établissement de la moyenne (2.3) sur toute la valeur θ.

Pour établir ces équations, l'intensité acoustique incidente est associée à la pression acoustique mesurée dans chaque situation. Le rapport entre la pression acoustique mesurée et l'intensité incidente diffère selon un facteur de 4 entre les ondes planes et un champ diffus. Dans un champ diffus, l'incidence du son sur un objet est égale dans toutes les directions. L'établissement de moyenne à partir d'un survol d'aéronef complet ne s'apparente pas à une situation de champ diffus car le son ne peut provenir que d'angles compris dans un hémisphère ou moins. Ainsi, le rapport entre la pression et l'intensité, dont la moyenne est établie à partir d'un survol d'aéronef complet, est censé se situer entre les valeurs des ondes planes et celles du champ diffus.

L'établissement d'une moyenne à partir d'un survol d'aéronef complet était censé être représenté par une équation semblable à la formule 2.4, mais dans laquelle L_1 correspond au niveau sonore incident mesuré en champ libre. Cette dernière équation a servi à tous les calculs parce qu'elle a déjà établi une concordance raisonnable avec les mesures recueillies. Ce principe est particulièrement vrai dans le cas des structures, ou constructions, simples de la section 3.1.1. Dans le présent rapport, d'autres effets possibles, comme ceux de l'angle d'incidence, sont ultérieurement pris en considération comme correctifs de l'application simple de l'équation 2.4.

3. Réductions moyennes du bruit mesurées pour chacune des configurations

Les résultats et analyses de la présente section portent sur les réductions moyennes du bruit, mesurées par rapport aux résultats sur les fréquences. C'est-à-dire qu'il s'agit des moyennes d'un certain nombre de passages d'aéronefs pour chacune des configurations de l'habitation d'essai. Ces réductions moyennes du bruit mesurées sont comparées aux réductions du bruit calculées à partir des mesures en laboratoire des mêmes éléments de façade. Les sections subséquentes analysent ces résultats de façon plus approfondie que juste des valeurs moyennes.

3.1 Configurations des murs

La présente section porte sur les essais n° 1 au n° 5 réalisés avec des murs complets soumis au bruit d'aéronefs. Ces essais touchant des murs fenêtrés sont présentés à la section 3.2 et les essais comprenant des orifices de ventilation à la section 3.3. Les résultats sur les murs sont d'abord comparés aux prévisions simples dans la section 3.1.1. Puis, à la section 3.1.2, différentes corrections sont apportées pour améliorer les prévisions des mesures sur le terrain.

3.1.1 Comparaisons avec les prévisions simples tirées des mesures en laboratoire

Les essais 1, 2, 3 et 5, portant sur les murs sans orifice de ventilation ni fenêtre, sont d'abord étudiés. Les réductions moyennes du bruit entre les mesures du microphone extérieur (champ libre) et les niveaux sonores intérieurs moyens dans chaque pièce sont comparés aux calculs simples tirés des mesures de perte de transmission en laboratoire. Les prévisions simples des réductions du bruit prévues ont été faites de la façon décrite à la section 2.5. Ces calculs sont basés sur les mesures de perte de transmission en laboratoire, temps de réverbération et les surfaces des éléments de façade murs et toit-plafond sans autre correction.

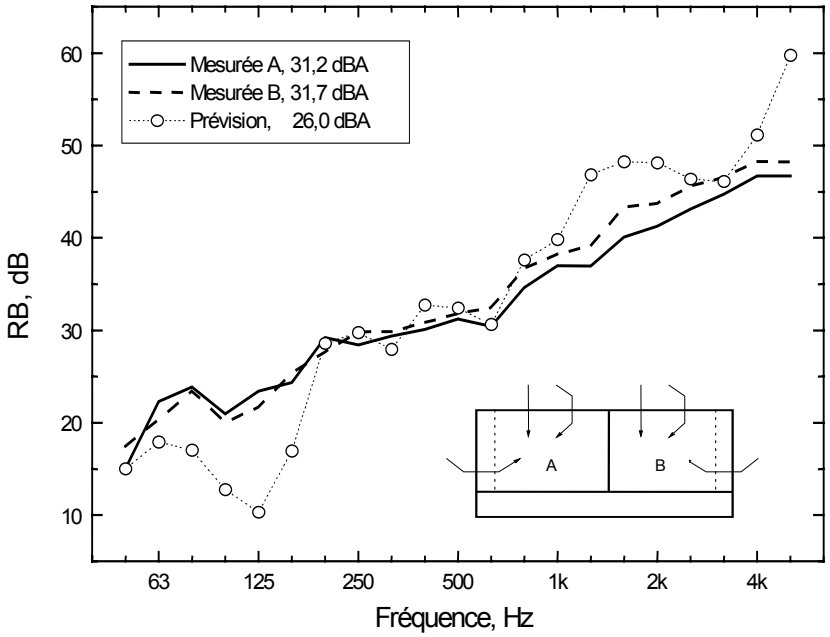


Figure 4. Comparaison de réductions du bruit (RB) mesurées avec les calculs simples des résultats de l'essai n° 2 correspondant aux seuls murs de façade soumis au bruit d'aéronefs. Les chiffres de la légende donnent les réductions du bruit pondérées-A globales. Le schéma du coin inférieur droit illustre la configuration.

La comparaison des réductions du bruit mesurées et prévues est présentée dans la figure 4 pour la configuration de l'essai n° 2. Comme cela a été décrit au tableau II de la section 2.2, cet essai ne correspond qu'aux murs avant de chaque pièce qui sont exposés et non isolés. L'extérieur des murs avant est exposé au survol complet des aéronefs, ce qui constitue l'essai le plus simple. Les réductions du bruit mesurées pour les deux pièces sont assez semblables et les résultats de prévisions simples concordent aux mesures à la plupart des fréquences. Les valeurs RB de la pièce B ont tendance à être plus élevées aux fréquences moyennes et supérieures. (La pièce B correspond au côté de l'immeuble d'approche de l'aéronef. Voir aussi figure 1.) Les calculs prévoient une forte réduction aux environs de 125 Hz, situation qui n'est pas observée dans les résultats mesurés sur le terrain. Inversement, dans la gamme 1,25 kHz à 2 kHz, les prévisions anticipent des réductions du bruit supérieures à ce qui a été mesuré. Les différences dans la bande la plus élevée (5 kHz) étaient habituellement liées à des niveaux de bruits intérieurs non appropriés par rapport aux niveaux de bruit ambiant existants, ce qui empêche d'obtenir des mesures exactes.

Les réductions du bruit pondérées-A globales sont très semblables dans les deux pièces (31,2 et 31,7 dB) et elles sont de beaucoup supérieures à la réduction du bruit pondérée-A prévue de 26,0 dB.

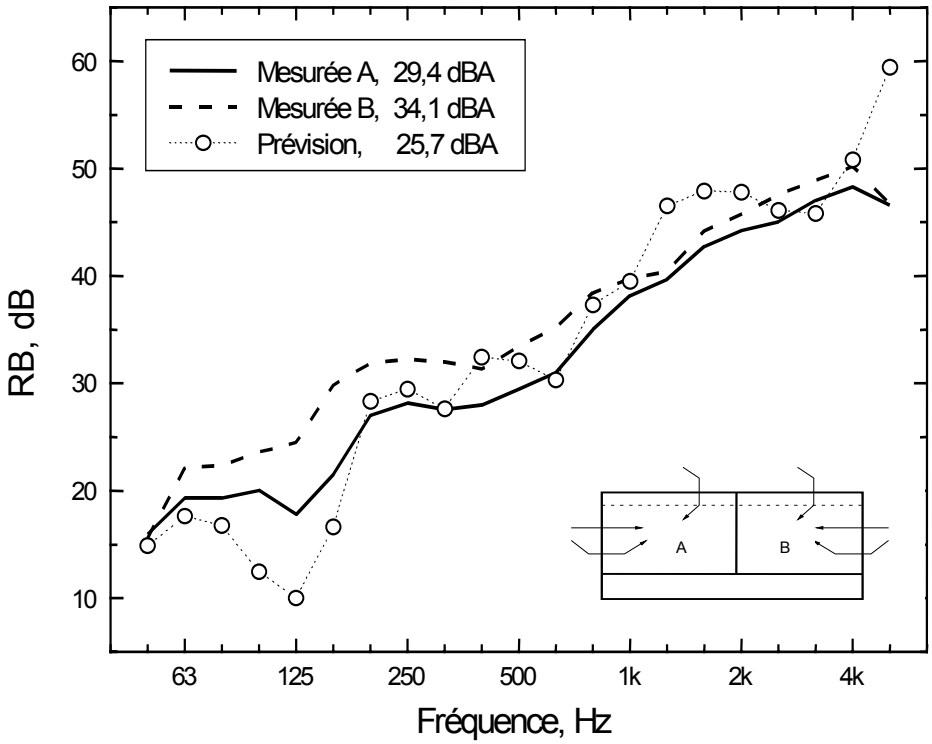


Figure 5. Comparaison des réductions du bruit (RB) mesurées aux calculs simples des résultats de l'essai n° 1 qui ne correspondent qu'aux murs d'extrémité soumis au bruit d'aéronef. Les chiffres de la légende donnent les réductions du bruit pondérées-A globales. Le schéma du coin inférieur droit illustre la configuration.

La comparaison des réductions du bruit mesurées aux résultats de prévisions simples de la configuration de l'essai n° 1 est illustrée dans la figure 5. Cet essai ne touchait que les murs d'extrémité exposés et non isolés. Ces réductions du bruit mesurées dans les deux pièces diffèrent

considérablement des résultats de l'essai n° 2 de la figure 4. Les différences dans les crêtes et les chutes de la fréquence 125 Hz et de la gamme 1,25 à 2 kHz sont semblable à la comparaison précédente illustrée dans la figure 4.

Le mur d'extrémité de la pièce B était soumis au bruit des aéronefs en approche et celui de la pièce A était exposé au bruit des aéronefs qui s'éloignaient de l'habitation d'essai. Comme les aéronefs sont des sources de bruit directionnelles, l'énergie sonore incidente sur les deux extrémités de l'immeuble est censée être différente. Quant à la directivité d'un aéronef moyen (voir annexe II), les niveaux incidents sur l'extrémité d'approche de l'immeuble sont inférieurs à ceux sur l'extrémité d'éloignement du bâtiment. Cela entraîne les différences observées dans les réductions du bruit des deux murs d'extrémité en raison des mêmes niveaux sonores extérieurs à champ libre qui ont été utilisés pour représenter l'énergie sonore incidente dans les deux cas. Ces niveaux sonores extérieurs à champ libre surestiment l'énergie sonore incidente de l'extrémité d'approche de l'immeuble (pièce B) et ont entraîné des réductions du bruit apparemment plus importantes dans la pièce B.

Les réductions du bruit pondérées-A globales mesurées des deux pièces sont différentes (29,4 et 34,1 dBA) et les deux sont supérieures à la réduction du bruit pondérée-A prévue de 25,7 dBA.

La figure 6 établit la comparaison des réductions du bruit mesurées et prévues de la configuration de l'essai n° 3 dans laquelle les murs d'extrémité et avant étaient exposés et n'étaient pas isolés. Comme dans l'essai n° 1, il existe des différences entre les résultats mesurés dans les deux pièces et, de nouveau, les résultats de la pièce B indiquent des réductions du bruit supérieures dans la plupart des fréquences. De même, il existe de nouveau des différences dans les crêtes et les minima des résultats prévus à la fréquence 125 Hz et dans la gamme 1,25 à 2 kHz.

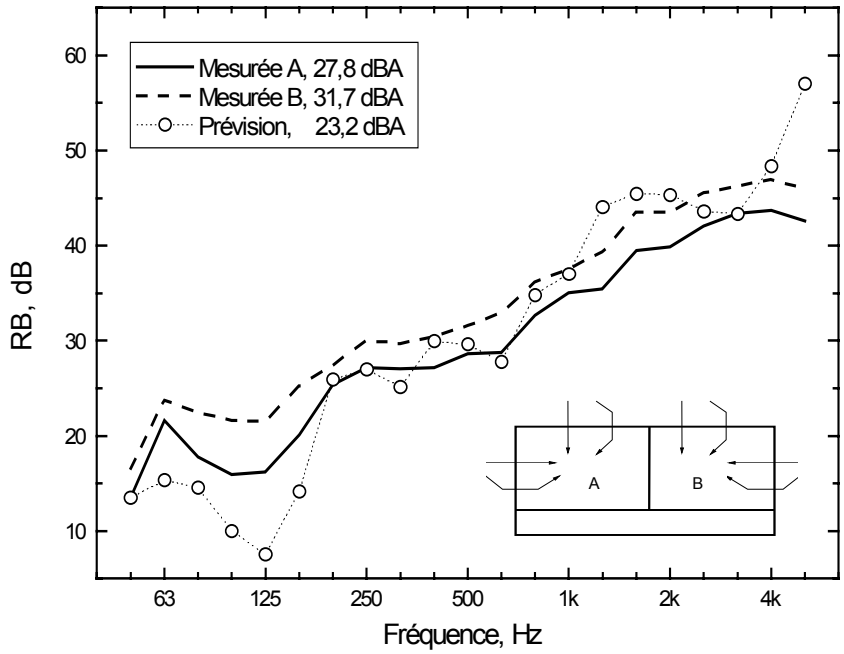


Figure 6. Comparaison des réductions du bruit (RB) mesurées aux calculs simples des résultats de l'essai n° 3 qui correspondent aux murs d'extrémité et de façade soumis au bruit d'aéronefs. Les chiffres de la légende donnent les réductions du bruit pondérées-A globales. Le schéma du coin inférieur droit illustre la configuration.

Les réductions du bruit pondérées-A globales des deux pièces étaient différentes (27,8 et 31,7 dBA) et étaient supérieures à la réduction du bruit pondérée-A prévue de 23,2 dBA.

La comparaison finale des résultats touchant les seuls murs est comprise dans la figure 7 pour ce qui est de l'essai n° 5. Cet essai est semblable au n° 3 car les résultats portent sur les murs d'extrémité et avant exposés et non isolés. Toutefois, la construction de murs et du plafond a été modifiée par rapport à l'essai n° 3 de façon à évaluer des murs améliorés et à créer un essai de base qui convienne davantage aux vérifications subséquentes de l'effet de fenêtres et d'orifices de ventilation. Pour l'essai n° 5, le revêtement des murs constitué d'une couche de placoplâtre de 13 mm posée directement a été remplacé par deux couches de placoplâtre de 13 mm fixées à l'aide de profilés souples. Par la même occasion, l'inverse a été fait au plafond; c.-à-d. que les deux couches de placoplâtre de 13 mm fixées sur profilés souples ont été remplacées par une seule couche posée directement.

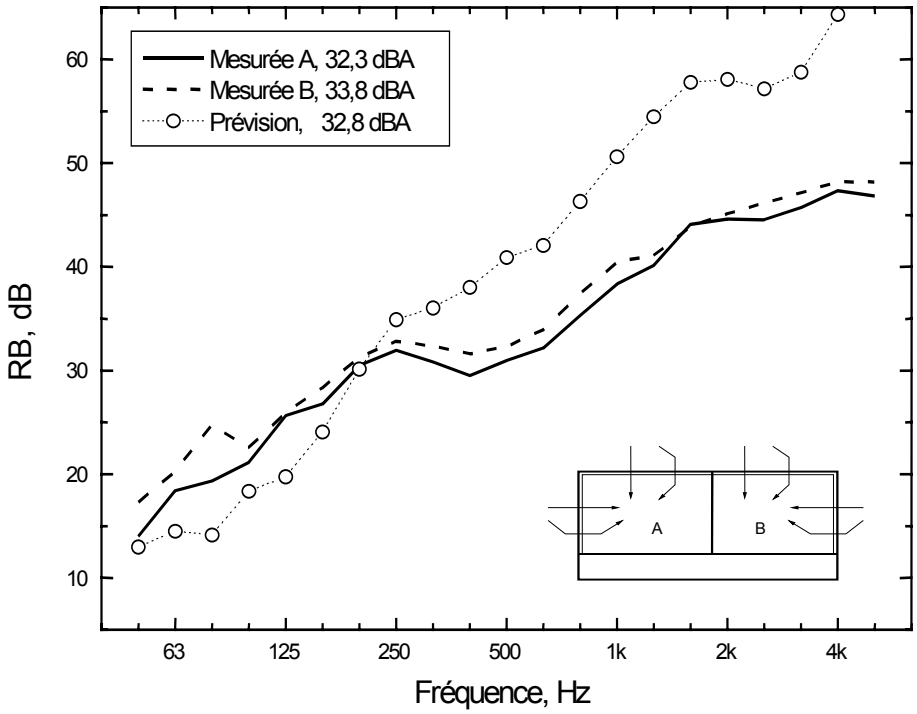


Figure 7. Comparaison des réductions du bruit (RB) mesurées aux simples calculs des résultats de l'essai n° 5 touchant les murs d'extrémité et de façade soumis aux bruits d'aéronefs. Les chiffres de la légende donnent les réductions du bruit pondérées-A globales. Le schéma du coin inférieur droit illustre la configuration.

Les réductions du bruit mesurées dans la figure 7 indiquent des résultats semblables dans les deux pièces, mais les valeurs RB sont légèrement supérieures dans la pièce B du côté d'approche de l'immeuble. Les prévisions diffèrent considérablement des réductions du bruit mesurées. Au-dessus de 200 Hz, les réductions du bruit mesurées sont beaucoup plus faibles que les chiffres des prévisions simples. Au-dessous de 200 Hz, les réductions du bruit mesurées sont nettement supérieures aux prévisions.

Les réductions du bruit pondérées-A globales sont semblables dans les deux pièces (32,3 et 33,8 dBA) et s'apparentent beaucoup au résultat prévu de 32,8 dBA. Ainsi, bien que les

réductions du bruit pondérées-A simples proposent une concordance excellente, les réductions du bruit dans la bande de tiers d'octave indiquent de grandes différences qui correspondent à la moyenne si les réductions ne sont considérées que comme des niveaux pondérés-A globales.

Les grandes différences entre les résultats mesurés et prévus dans la figure 7 permettent facilement d'expliquer les différences dans tous les tracés des essais ne touchant que les murs. Les modifications de la construction selon la configuration de l'essai n° 5 auraient dû rendre identiques les caractéristiques de perte de transmission (PT) des murs et du composant toit-plafond. Les mesures en laboratoire de la perte de transmission du son des différents composants de la construction sont présentées dans la figure 8. Ces résultats illustrent des caractéristiques semblables de perte de transmission du mur recouvert de deux couches de placoplâtre fixées sur des profilés souples (PS) et du plafond à fermes en bois à chevrons relevés (FBCR) revêtu d'une seule couche de placoplâtre posée directement.

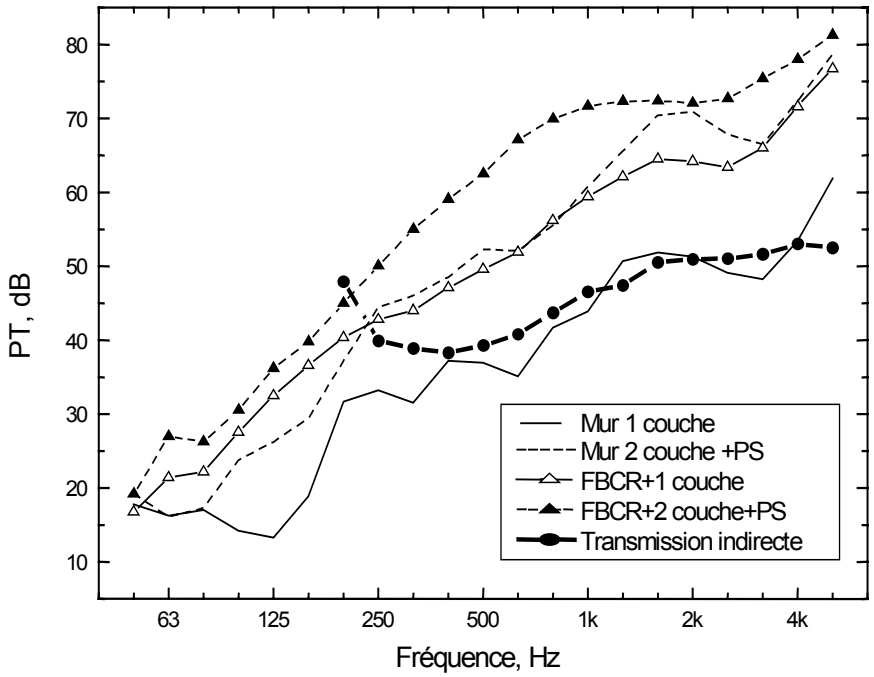


Figure 8. Comparaison des mesures en laboratoire de la perte de transmission du son (PT) des composants de façade et PT efficace totale des voies de transmission indirecte.

Le fait que les résultats de l'essai n° 5 ne font pas état de la forte augmentation des réductions du bruit qui a été prévue au-dessus de 200 Hz indique une voie de transmission indirecte qui a permis à l'énergie sonore de contourner la trajectoire directe par le mur. La figure 9 illustre la forme probable de cette voie de transmission indirecte. Le bruit d'aéronefs incident sur les surfaces externes des murs est transmis sous forme d'énergie de vibration par les poteaux des murs et les solives du plancher, énergie qui est rayonnée dans la pièce à partir de la surface du plancher. Une voie semblable empruntant les solives du plafond et rayonnée à partir de la surface du plafond peut aussi contribuer aux niveaux sonores intérieurs mesurés. Il en résulte que la modification de la construction du mur, soit la pose de deux couches de placoplâtre sur des profilés souples, pour cette structure particulière est inefficace et n'entraîne que des améliorations mineures.

Pareils résultats sont tirés des mesures en laboratoire de murs à poteaux en chicane avec ou sans profilés souples [8]. Sans profilés souples, il existe une voie de transmission indirecte de structure par la rive de la semelle du mur en poteaux en chicane. Lorsque des profilés souples sont ajoutés, cette voie de transmission indirecte de structure est éliminée. Le changement de perte de transmission obtenu s'apparente beaucoup aux effets apparents de transmission indirecte au-dessus de 200 Hz illustrés dans la figure 7.

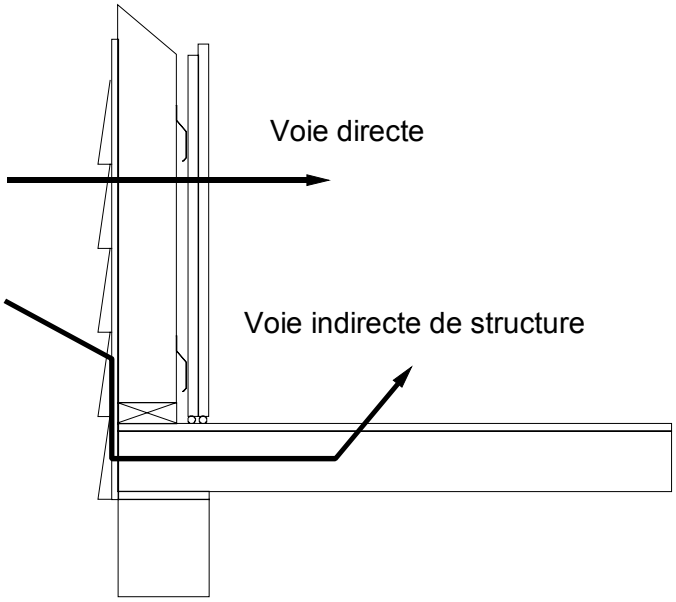


Figure 9. Coupe transversale des particularités des murs et des plafonds de l'essai n° 5 illustrant les voies de transmission directe et indirecte.

Il est possible d'estimer la perte de transmission efficace de la voie de transmission indirecte (sans égard à sa cause matérielle) à partir de la différence entre les résultats mesurés et prévus de la figure 7. Cette opération a été effectuée à partir de l'hypothèse que cette voie de transmission indirecte était associée à la superficie totale des deux murs extérieurs de chaque pièce. Les résultats des deux pièces étaient légèrement différents et la moyenne des deux résultats est représentée dans la figure 8 de pair avec les valeurs de perte de transmission des autres éléments. La perte de transmission efficace prévue de la voie de transmission indirecte est plutôt semblable, aux fréquences supérieures, aux valeurs du mur revêtu d'une seule couche de placoplâtre posée directement. Il n'était pas possible d'estimer les valeurs de perte de transmission de la voie de transmission indirecte au-dessous de 200 Hz parce que les résultats de la figure 7 n'étaient pas réduits aux fréquences inférieures. Les valeurs de perte de transmission efficace de la voie de transmission indirecte semblent pouvoir limiter sensiblement l'isolation acoustique totale de l'immeuble. En outre, la voie de transmission indirecte limite probablement la réduction du bruit dans la gamme de 1,25 kHz à 2kHz dans les résultats des essais n° 1, n° 2 et n° 3 et l'inclusion de la voie de transmission indirecte dans les prévisions entraîne de meilleures prévisions dans cette gamme de fréquences.

Les différences entre les mesures et les prévisions de la figure 7 sont inversées aux fréquences inférieures (sous les 200 Hz). Dans cette gamme de fréquences, il existe deux effets complexes différents qui, combinés, produisent les différences observées entre les mesures et les prévisions découlant des résultats en laboratoire. Les mesures en laboratoire de perte de transmission du mur revêtu d'une seule couche de placoplâtre posée directement accusent une chute prononcée à

125 Hz. Cette situation est causée par la résonance structurale primaire des panneaux nervurés formés par les couches de surface rigidement fixées au système de poteaux [9]. Les prévisions tirées des mesures en laboratoire donnent lieu de croire que cet état de fait limite considérablement la réduction du bruit globale du mur. Toutefois, l'ampleur de cette résonance peut être assujettie à l'angle d'incidence du son. (Les essais réalisés avec un haut-parleur source, voir section 4.1, ont démontré que cela est vrai dans le cas de la résonance masse-air-masse des fenêtres). Il est probable que la résonance dans les murs à 125 Hz est mieux excitée lorsqu'il existe une énergie sonore d'incidence normale. L'incidence normale est comprise dans les essais en laboratoire, mais elle ne l'est pas dans les essais sur le terrain. Le bruit d'aéronefs n'est jamais normalement incident et les aéronefs qui ont survolé l'habitation d'essai passaient, en moyenne, à un angle vertical de 55 degrés par rapport à l'horizontale. Ainsi, le bruit d'aéronefs peut ne pas exciter cette résonance de la façon prévue et la réduction du bruit d'aéronefs est meilleure que cela a été prévu à partir des résultats de laboratoire. Cela explique partiellement la grande différence entre les réductions du bruit mesurées et prévues par rapport aux résultats des figures 4, 5 et 6 pour les essais n° 1, n° 2 et n°3. Toutefois, cette chute de résonance n'est pas prévue pour les résultats de l'essai n° 5 parce que, lorsque le placoplâtre est posé sur des profilés souples, le système de panneaux nervurés est rompu. Ainsi, la différence entre les mesures et la prévision des résultats de l'essai n° 5 n'est pas causée par les effets de l'angle d'incidence sur la résonance structurale primaire des murs.

Un autre phénomène présent explique les différences aux fréquences inférieures entre les réductions du bruit mesurées et prévues des résultats de l'essai n° 5. Les différences, après l'élimination de l'effet de la voie de transmission indirecte, sont représentées graphiquement dans la figure 10 et culminent à environ 80 Hz. Les calculs ont démontré (voir annexe III) que cette situation est conforme à l'annulation prévue de l'énergie sonore incidente en raison de l'interférence du son direct et réfléchi au sol. Par conséquent, les réductions du bruit mesurées à basses fréquences, centrées à environ 80 Hz, sont toutes censées être supérieures aux prévisions en raison de cette modification de l'énergie sonore incidente totale sur l'habitation d'essai. Les résultats des essais n° 1, n° 2 et n° 3 comprennent la combinaison de cet effet et les différences de la résonance structurale primaire des murs. Comme la construction de l'essai n° 5 ne possède pas cette résonance, les différences entre les réductions du bruit mesurées et prévues de cet essai peuvent être entièrement attribuées à l'effet des déflexions au sol. (Cela pourrait être confirmé par des mesures effectuées à un étage supérieur, mais l'habitation d'essai ne comptait malheureusement qu'un étage.)

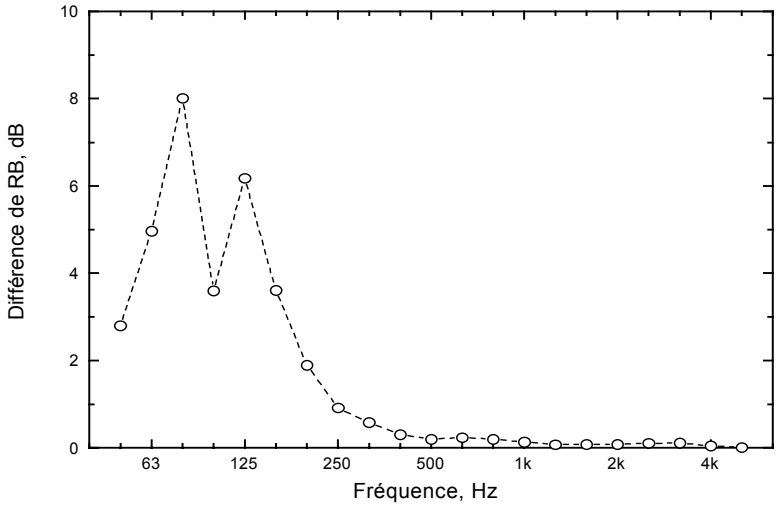


Figure 10. Différences entre les réductions du bruit mesurées et calculées à basse fréquence à partir des résultats de l'essai n° 5.

3.1.2 Effets des réflexions au sol et des voies de transmission indirecte

Les prévisions des réductions du bruit prévues des essais n° 1, n° 2 et n° 3 pouvaient être améliorées en ajoutant les effets supplémentaires des voies de transmission indirecte (au-dessus de 200 Hz) et des réflexions au sol (au-dessous de 200 Hz). C'est ce qui a été fait et les résultats sont présentés dans la présente section. À partir des résultats de l'essai n° 5, les corrections sont mises en application dans les trois autres essais. Les résultats sont comparés en termes de niveaux sonores intérieurs pondérés-A parce que cela illustre directement les composants les plus importants des bruits d'aéronefs intérieurs. La perte de transmission (PT) totale comprenant la voie de transmission indirecte (telle que décrite dans la figure 9) a d'abord été calculée. Puis, à l'aide du spectre standard des bruits d'aéronefs (voir chapitre 6), les niveaux sonores intérieurs ont été calculés. Les niveaux ont ensuite été modifiés par la réduction prévue des niveaux sonores incidents à basse fréquence en raison de l'effet des réflexions au sol illustrées dans la figure 10. Enfin, les niveaux sonores intérieurs ont tous été pondérés-A de façon à mieux refléter les composants des fréquences qui semblaient les plus bruyants. Comme la PT de la voie de transmission indirecte efficace était quelque peu différente pour les pièces A et B, les résultats sont présentés séparément pour chaque pièce et chaque configuration d'essai.

Les niveaux sonores intérieurs mesurés ont été obtenus par l'application des réductions du bruit mesurées aux mêmes niveaux sonores extérieurs du spectre standard. Ainsi, les niveaux sonores intérieurs mesurés et prévus sont directement comparables au spectre de source extérieure théorique.

Les figures 11a et 11b établissent la comparaison des niveaux sonores intérieurs pondérés-A prévus et mesurés tirés des résultats de l'essai n° 2 pour les pièces A et B respectivement. Les résultats de la figure 11 démontrent que les prévisions simples surestiment les niveaux sonores intérieurs à une crête de résonance de 125 Hz et à fréquences inférieures. Comme cela a été vu dans la figure 4, les prévisions simples sous-estiment les niveaux sonores intérieurs mesurés dans la gamme de 1,25 kHz à 2 kHz. L'ajout du rôle de la voie de transmission indirecte améliore la concordance entre les valeurs mesurées et les valeurs prévues au-dessus de 200 Hz, dans le cas des résultats de l'essai n° 2. La correction des réflexions au sol basses fréquences (tirée de la figure 10) améliore la concordance entre les valeurs mesurées et les prévisions améliorées au-dessous de 200 Hz. Toutefois, les prévisions améliorées ne corrigent pas les différences à la chute de résonance à 125 Hz.

Pour les deux pièces, les résultats de l'essai n° 2 sont beaucoup mieux prévus par les prévisions améliorées. Les atténuations de niveau pondérées-A global sont améliorées de 26,0 dBA dans le cas des prévisions simples à 28,5 dBA dans le cas de la pièce A et à 28,9 dBA dans le cas de la pièce B. Dans les deux pièces, ces prévisions sous-estiment encore les résultats mesurés par presque 3 dBA. Les figures 11a et 11b illustrent que cet état de fait est causé par les différences dominantes à la crête de résonance de 125 Hz.

Les figures 12a et 12b comparent les niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus pour les résultats de l'essai n° 1 dans lequel seuls les murs d'extrémité étaient exposés et n'étaient pas isolés. Les tendances d'ensemble sont semblables aux résultats de l'essai n° 2 pour ce qui est des chiffres, mais il existait des différences entre les deux pièces. Ici encore, l'ajout du rôle de la voie de transmission indirecte améliore la concordance au-dessus de 200 Hz et l'addition de l'effet de la réflexion sur le sol améliore encore la concordance au-dessous de 200 Hz. Comme les différences à la résonance de 125 Hz ne sont pas prises en compte dans les calculs, ces différences sont de nouveau présentées dans les figures 12a et 12b.

Les réductions du bruit pondérées-A globales concordent mieux dans la pièce A du côté de l'habitation d'essai dont les aéronefs s'éloignent et où la prévision améliorée n'est inférieure que

de 1,1 dBA au résultat mesuré. Toutefois, quant aux résultats de la pièce B du côté d'approche de l'immeuble, les nivaux pondérés-A globaux mesurés sont surestimés d'environ 5 dBA. Ces différences dans le succès des prévisions pour les deux pièces sont associées à la direction de rayonnement du bruit d'aéronefs. La direction des aéronefs types (voir annexe II) indique que les appareils ont tendance à rayonner moins de bruit de l'avant que de l'arrière. Le mur d'extrémité de la pièce A (côté éloignement) est soumis à des niveaux sonores incidents supérieurs mais seulement pendant environ la moitié du survol de l'aéronef. Les niveaux accrus des aéronefs qui s'éloignent et la vue angulaire réduite, combinés aux différentes plages d'angles d'incidence, semblent être compris dans la moyenne et les prévisions qui en découlent sont plutôt exactes. Du côté d'approche ou d'atterrissage de l'immeuble, les niveaux incidents réduits des aéronefs en approche et la vue angulaire moindre se combinent pour réduire l'énergie incidente totale pour le mur d'extrémité de la pièce B (côté approche). Cette situation entraîne une réduction apparente accrue des réductions du bruit mesurées parce que l'énergie incidente est obtenue d'une intégration du survol complet des aéronefs. Ainsi, des corrections supplémentaires sont nécessaires pour prendre en compte les effets combinés de l'orientation de la façade et de la direction de la source du bruit d'aéronefs.

Les comparaisons des niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus sont présentés dans les figures 13a et 13b des résultats de l'essai n° 3. L'essai n° 3 utilise la même construction que dans les essais n° 1 et n° 2, mais les deux murs extérieurs de chacune des pièces étaient exposés et non isolés. Les résultats s'apparentent beaucoup à ceux de l'essai n° 1. L'ajout du rôle de la voie de transmission indirecte et de l'effet de la réflexion au sol permet d'améliorer la prévision des effets mesurés, mais il existe d'importantes différences entre les deux pièces. Ici encore, l'ajout du rôle de la voie de transmission indirecte a permis d'améliorer les prévisions au-dessus de 200 Hz et l'ajout de la correction de réflexion au sol a amélioré la concordance au-dessous de 200 Hz.

La réduction pondérée-A globale a été prévue à 1,4 dBA pour la pièce A (côté éloignement de l'immeuble). En raison des effets combinés de la direction des aéronefs et de la façade, la différence pour la pièce B (côté approche de l'immeuble) entre les réductions de niveau pondérées-A mesurées et prévues était d'environ 5 dBA.

Les figures 14a et 14b comparent les réductions du bruit pondérées-A mesurées et prévues pour la configuration de l'essai n° 5. Ces comparaisons ne comprennent que les résultats mesurés et des prévisions simples. Comme les corrections supplémentaires comprises dans les prévisions améliorées étaient tirées de cet essai, elles ne peuvent servir à prévoir les résultats de cet essai. (Il va de soi qu'elles semblent donner une concordance parfaite.) Comme cela a été mentionné précédemment, les réductions de niveau pondérées-A concordaient étroitement avec les valeurs mesurées compte tenu de différences d'à peine 0,5 dBA (pièce A) et de 1 dBA (pièce B).

Ces résultats ont expliqué les principales différences entre les résultats en laboratoire et ceux sur le terrain pour des constructions comportant des murs sans fenêtre ni orifice de ventilation. La voie de transmission indirecte théorique a été confirmée par la concordance améliorée entre la prévision et les mesures des résultats des essais n° 1, n° 2 et n° 3 lorsqu'elle a été incluse dans les prévisions améliorées. De même, la correction de l'effet des réflexions au sol semblait améliorer les réductions du bruit prévues pour tous ces résultats de mesure. D'autres corrections tenant compte des effets de la direction des aéronefs et de l'orientation de la façade seront abordées dans le chapitre 6.

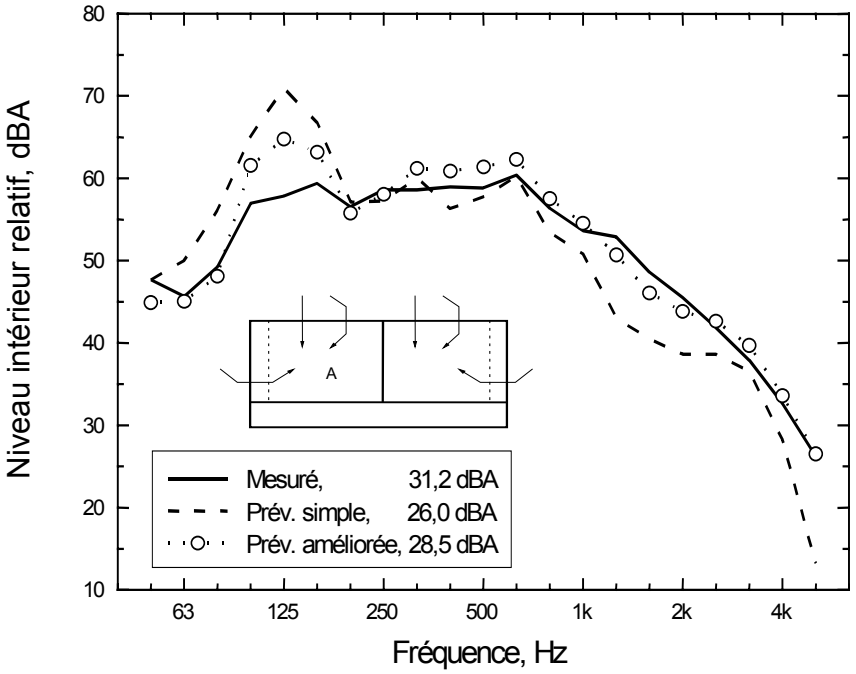


Figure 11a. Comparaison des niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus pour la pièce A (côté éloignement) – Essai n° 2 (murs de façade exposés).

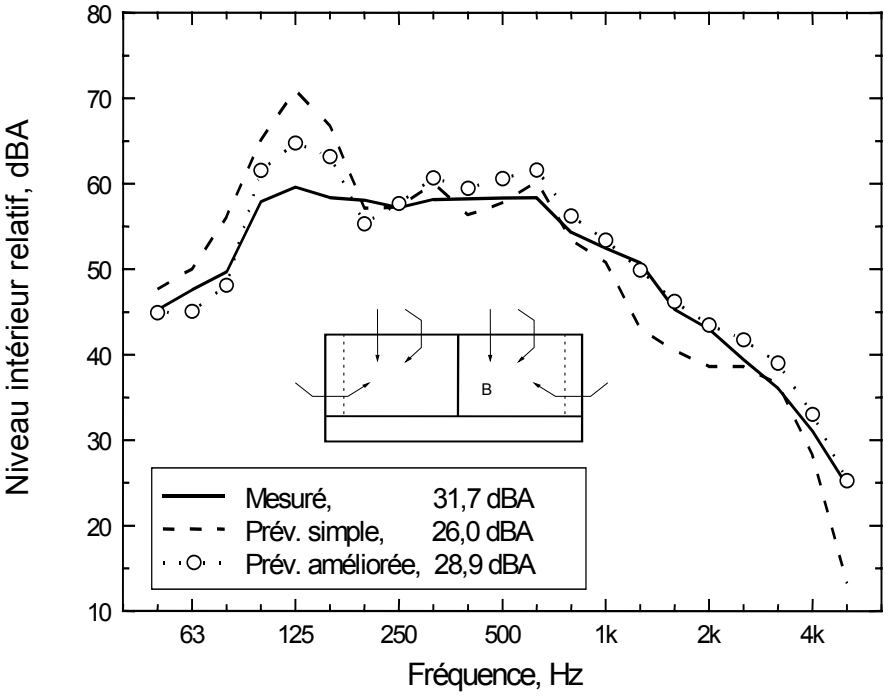


Figure 11b. Comparaison des niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus pour

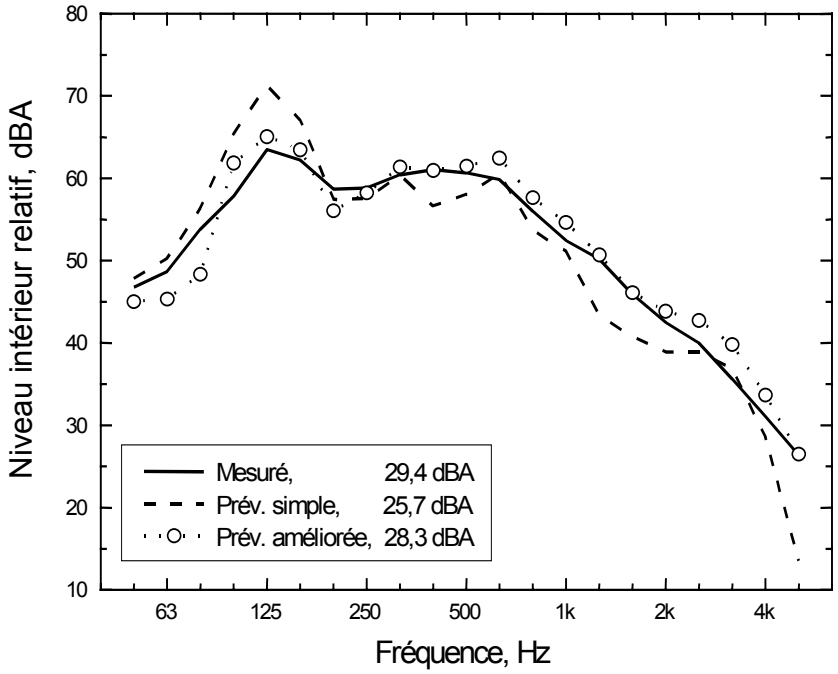


Figure 12a. Comparaison des niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus pour la pièce A (côté éloignement) – Essai n° 1 (murs d'extrémité exposés).

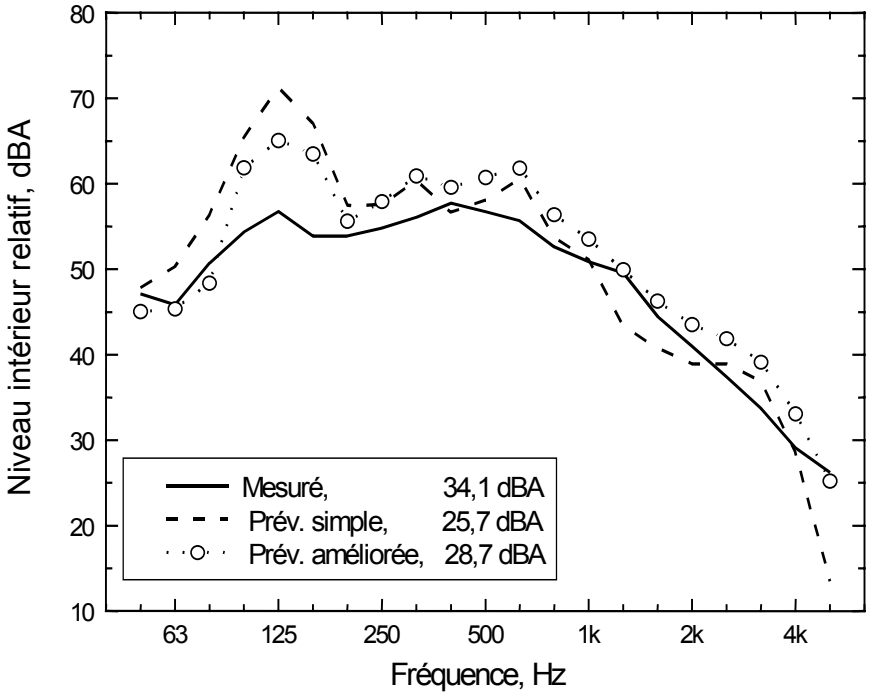


Figure 12b. Comparaison des niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus pour la pièce B (côté approche) – Essai n° 1 (murs d'extrémité exposés).

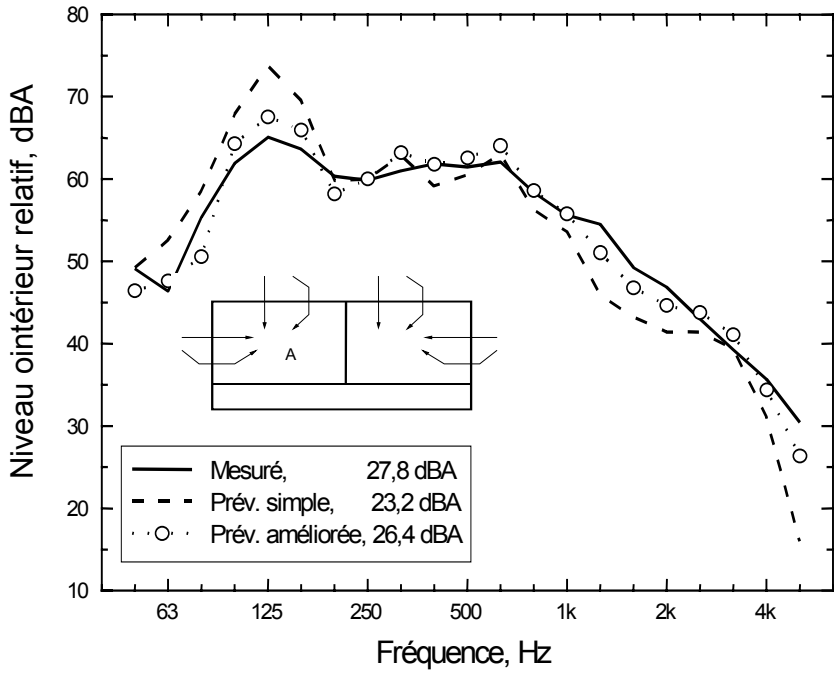


Figure 13a. Comparaison des niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus pour la pièce A (côté éloignement) – Essai n° 3 (deux murs exposés).

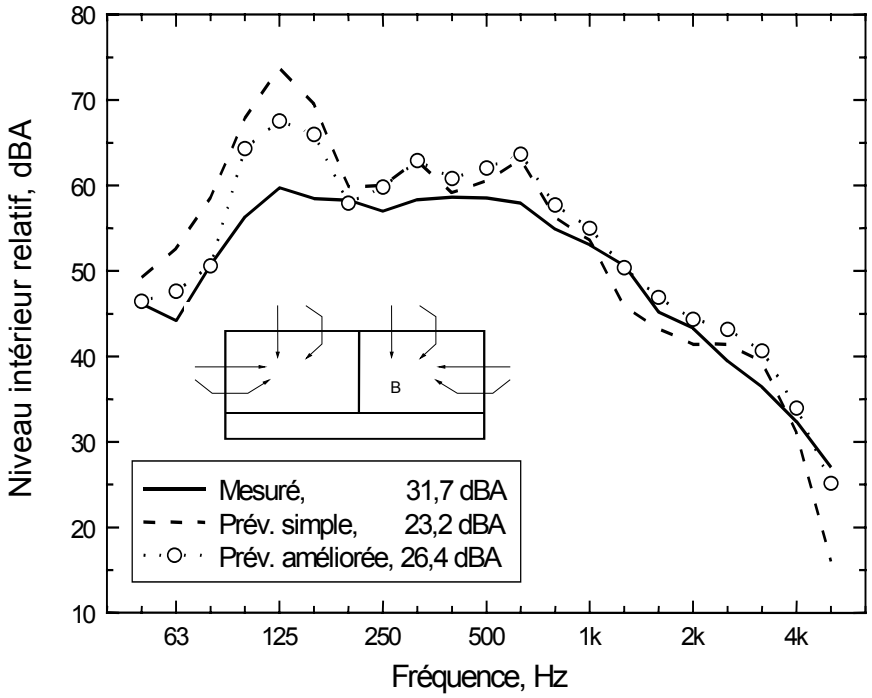


Figure 13b. Comparaison des niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus pour la pièce B (côté approche) – Essai n° 3 (deux murs exposés).

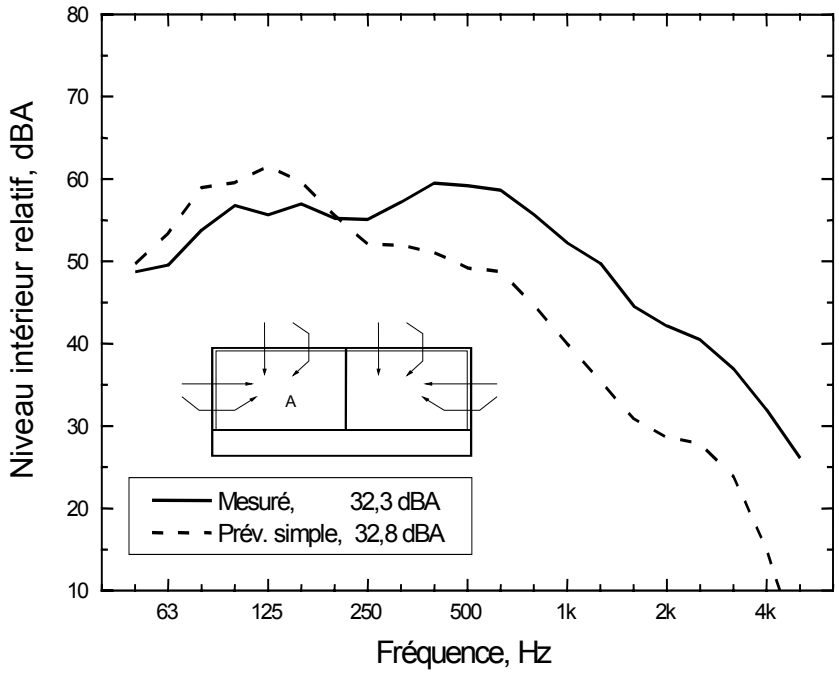


Figure 14a. Comparaison des niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus pour la pièce A (côté éloignement) – Essai n° 5 (deux murs exposés).

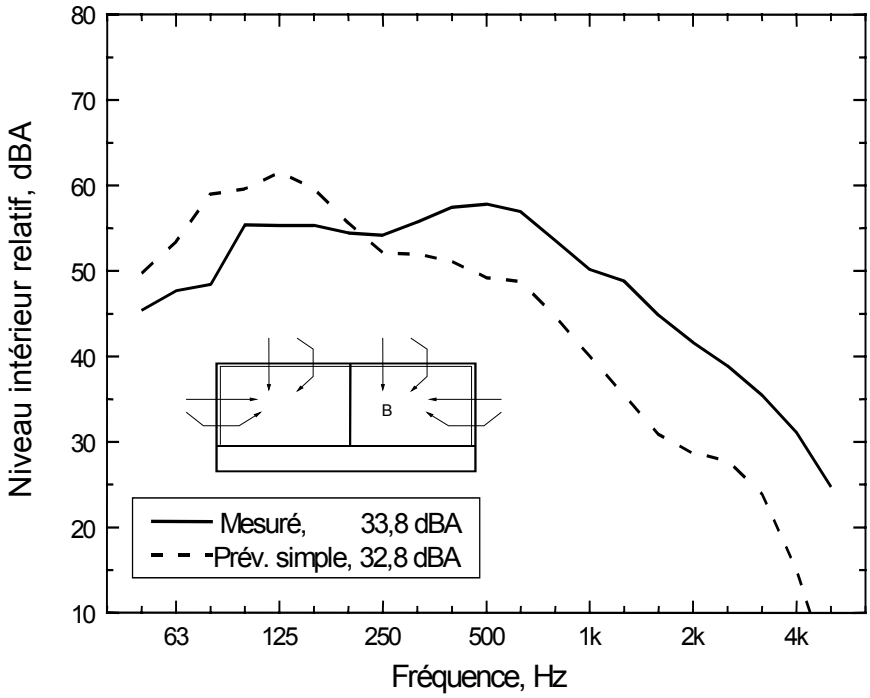


Figure 14b. Comparaison des niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus pour la pièce B (côté approche) – Essai n° 5 (deux murs exposés).

Les réductions de niveau pondérées-A globales sont résumées dans le graphique à barres de la figure 15. On y compare les valeurs mesurées aux résultats des prévisions simples et des prévisions améliorées qui tiennent compte des corrections établies pour les voies de transmission indirecte et les réflexions au sol. Les comparaisons touchent les pièces A et B, ainsi que tous les essais visant des murs sans fenêtre ni orifice de ventilation. Les réductions de niveau pondérées-A globales mesurées oscillent entre presque 28 dBA (essai n° 3, pièce A) et environ 34 dBA (essai n° 1, pièce B). Les prévisions améliorées étaient toujours de meilleures variables explicatives des valeurs mesurées que les prévisions simples. Les prévisions simples faisaient état de valeurs mesurées avec écart-type de –6,4 dBA et présentaient des différences de –8,7 à –4,3 dBA. Les prévisions améliorées indiquaient des valeurs mesurées avec écart-type de –3,1 dBA et présentaient des différences de –5,4 à –1,1 dBA. Les réductions mesurées étaient presque toujours supérieures aux prévisions et les prévisions améliorées offraient un progrès de 3 dBA par rapport aux prévisions simples. Les résultats des figures 11 à 14 indiquent que la surestimation des niveaux sonores intérieurs autour de 125 Hz constitue la principale cause de l'erreur restante.

3.2 Murs fenêtrés

Les essais de mesure 10, 11 et 12 tiennent compte des fenêtres posées dans les murs de l'habitation d'essai. Pour l'essai n° 10, seuls les murs de chaque pièce étaient fenêtrés et les autres murs étaient isolés (voir aussi figure 1). Quant à l'essai n° 11, seuls les murs de façade de chacune des pièces étaient fenêtrés. L'essai n° 12 touchait les deux murs extérieurs de chaque pièce de l'habitation d'essai qui étaient fenêtrés. Comme dans les essais portant sur les murs sans fenêtre, les réductions du bruit mesurées ont d'abord été comparées aux réductions du bruit prévues à partir des mesures en laboratoire de la même combinaison d'éléments de façade. Compte tenu du même spectre standard de source d'aéronefs, des niveaux sonores intérieurs pondérés-A ont aussi été prévus pour chaque pièce et selon chacune des configurations.

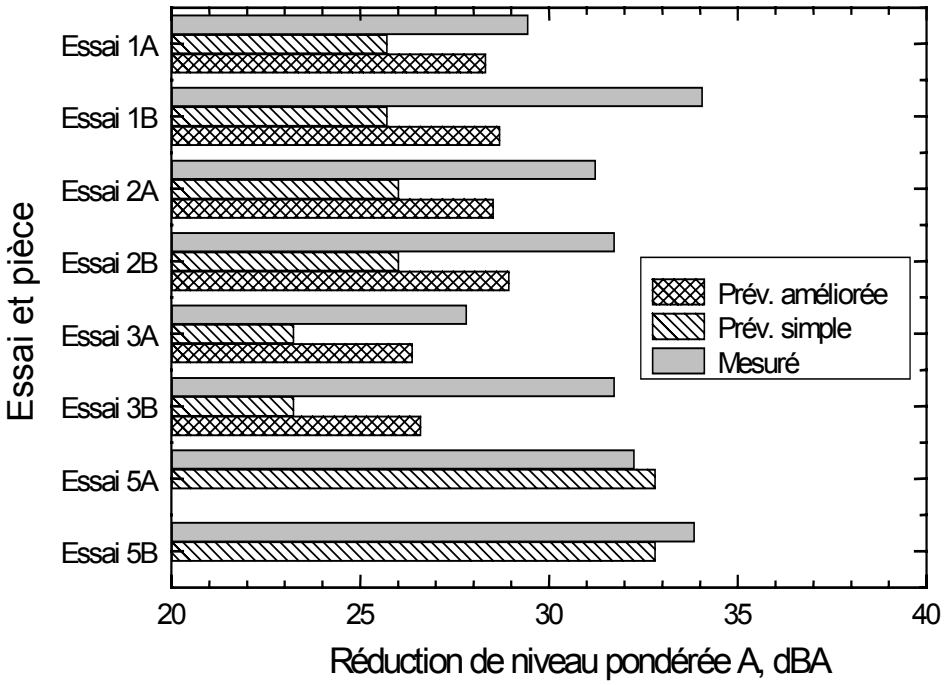


Figure 15. Comparaison des réductions de niveau pondérées-A globales des essais touchant des murs sans fenêtre ni orifice de ventilation.

Les prévisions simples sont basées sur les surfaces et les mesures en laboratoire de la perte de transmission de chaque composant de façade, selon la description de la section 2.5. Comme dans les essais ne touchant que les murs, les prévisions « améliorées » tenaient compte des corrections propres aux effets des voies de transmission indirecte efficaces et des réflexions au sol. Ces prévisions améliorées sous-estimaient encore les niveaux sonores haute fréquence. On croyait que cette situation était partiellement causée par la fuite acoustique au niveau des ventilations de faîte et d'avant-toit. Les fenêtres ont été mises à l'essai après l'installation de ces ventilations qui ont indiqué qu'elles entraînaient de faibles augmentations des niveaux sonores intérieurs à hautes fréquences. Ces résultats sont abordés à la section 3.3. Les différences entre les résultats de l'essai n° 5 et de l'essai n° 8 ne sont causées que par l'ajout des orifices de ventilation de faîte et d'avant-toit. Par conséquent, ces différences mesurées peuvent servir à déterminer une PT efficace des trajectoires acoustiques par les orifices de ventilation. Cette PT efficace des orifices de ventilation a été ajoutée à titre de dernière correction des résultats prévus « améliorés » précédents. Les mesures et différentes prévisions sont comparées dans les parties « a » et « b » des figures 16 à 21.

Les figures 16 et 17 établissent la comparaison des mesures de la configuration de l'essai n° 11, respectivement pour les pièces A et B. L'essai n° 11 portait sur des fenêtres posées sur les murs d'extrémité uniquement. Ces résultats indiquent que les prévisions simples n'étaient pas exactes parce qu'elles sous-estimaient les réductions du bruit mesurées à basses fréquences et surestimaient les réductions du bruit mesurées à hautes fréquences. Les prévisions « améliorées » ont entraîné une meilleure concordance à basses fréquences principalement en raison de l'ajout d'une estimation de l'effet des réflexions au sol. L'ajout de l'effet des voies de transmission indirecte (dans les prévisions « améliorées ») et de l'effet des orifices de ventilation a amélioré la concordance des valeurs mesurées et prévues avec une amélioration combinée maximale de 5 dB aux hautes fréquences.

Les réductions du bruit pondérées-A globales illustrées dans chaque graphique indiquent que ces mesures de l'essai n° 11 ont été prévues à moins d'un décibel pour les deux pièces.

Les résultats de l'essai n° 10 sont présentés pour les pièces A et B dans les figures 18 et 19 respectivement. Cette configuration de mesure comportait des fenêtres posées sur les murs d'extrémité uniquement. Dans le cas de ces résultats, les prévisions simples étaient beaucoup plus justes que dans le cas précédent. Les prévisions simples concordaient plus étroitement avec les résultats mesurés aux fréquences plus hautes pour les deux pièces et estimaient mieux les résultats aux basses fréquences dans la pièce A du côté éloignement de l'immeuble. Aux fréquences plus hautes, à la fois les prévisions « améliorées » et la correction supplémentaire de l'effet des orifices de ventilation accroissaient la concordance avec les valeurs mesurées. L'ajout de l'effet estimé des réflexions au sol améliorait aussi la concordance aux basses fréquences dans la pièce B du côté approche de l'immeuble. La concordance aux fréquences plus basses était un peu moins exacte dans le cas des résultats de la pièce A présentés à la figure 18.

Les réductions de niveau pondérées-A globales ont été prévues à moins de 1,6 dBA.

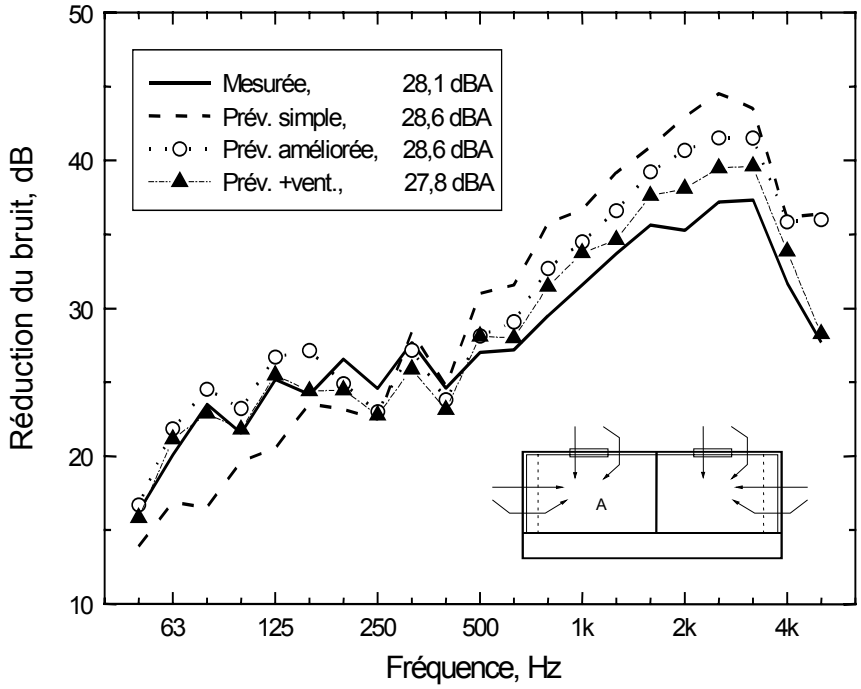


Figure 16a. Comparaison de la réduction du bruit (RB) mesurée et prévue pour la pièce A (côté éloignement) – Essai n° 11 (fenêtres de façade exposées).

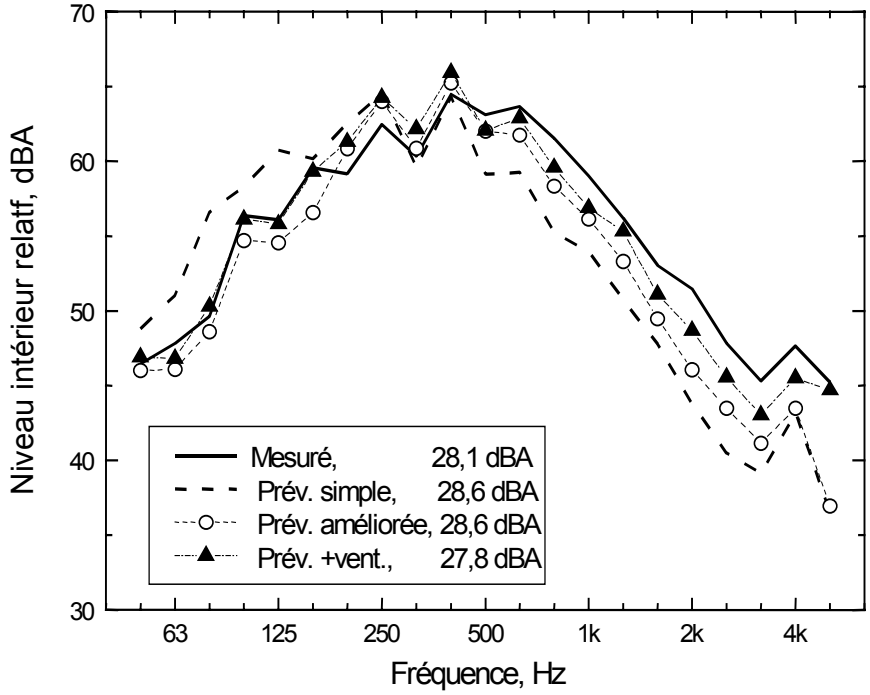


Figure 16b. Comparaison des niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus pour la pièce A (côté éloignement) – Essai n° 11 (fenêtres de façade exposées).

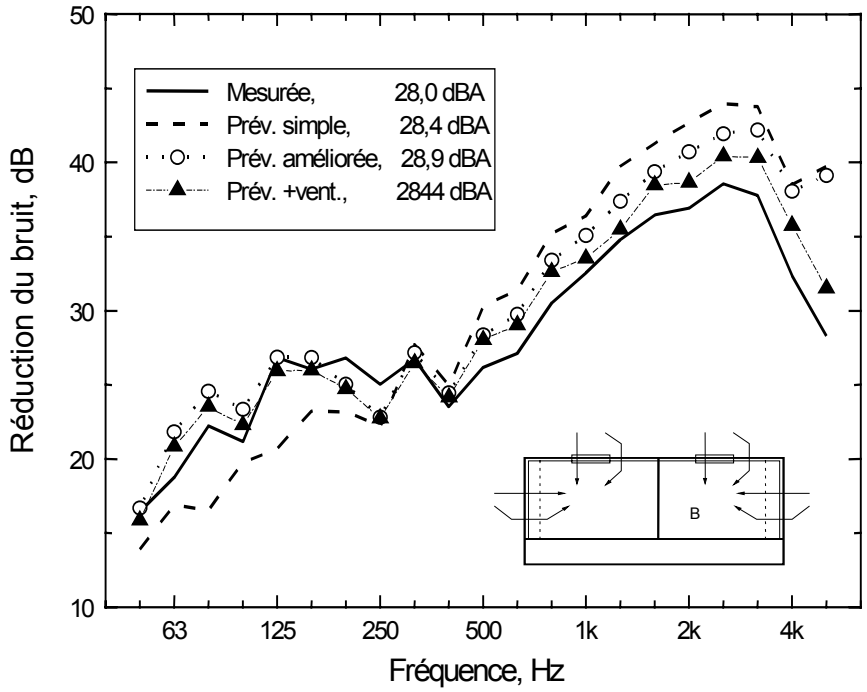


Figure 17a. Comparaison de la réduction du bruit (RB) mesurée et prévue pour la pièce B (côté approche) – Essai n° 11 (fenêtres de façade exposées).

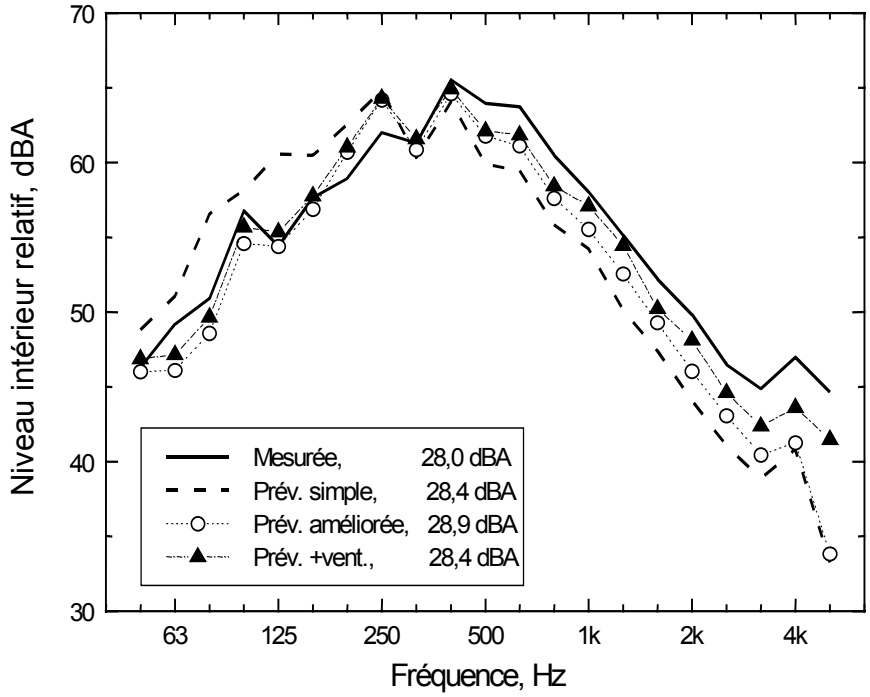


Figure 17b. Comparaison des niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus pour la pièce B (côté approche) – Essai n° 11 (fenêtres de façade exposées).

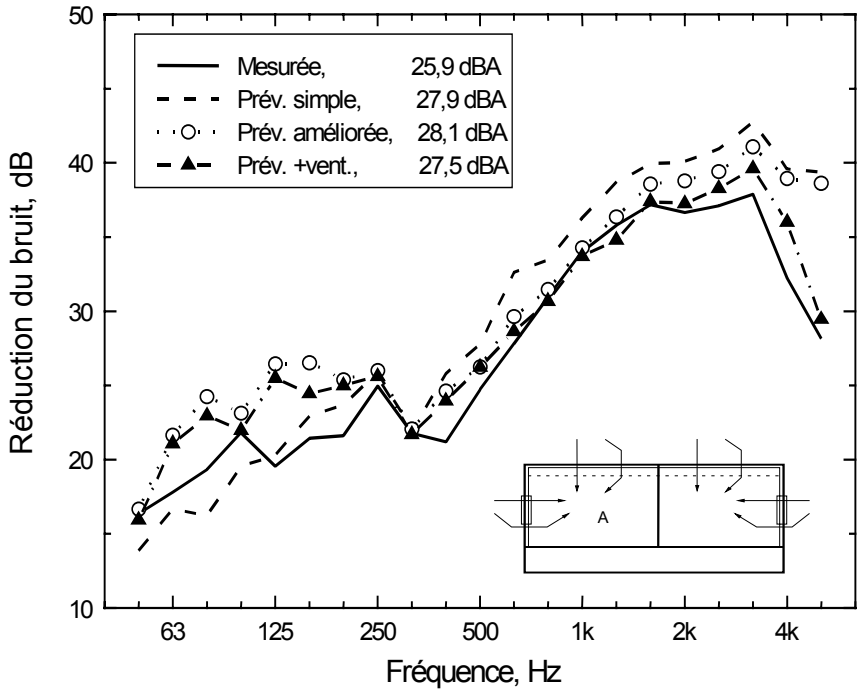


Figure 18a. Comparaison de la perte de transmission du son (PT) mesurée et prévue pour la pièce A (côté éloignement) – Essai n° 10 (fenêtres d'extrémité exposées).

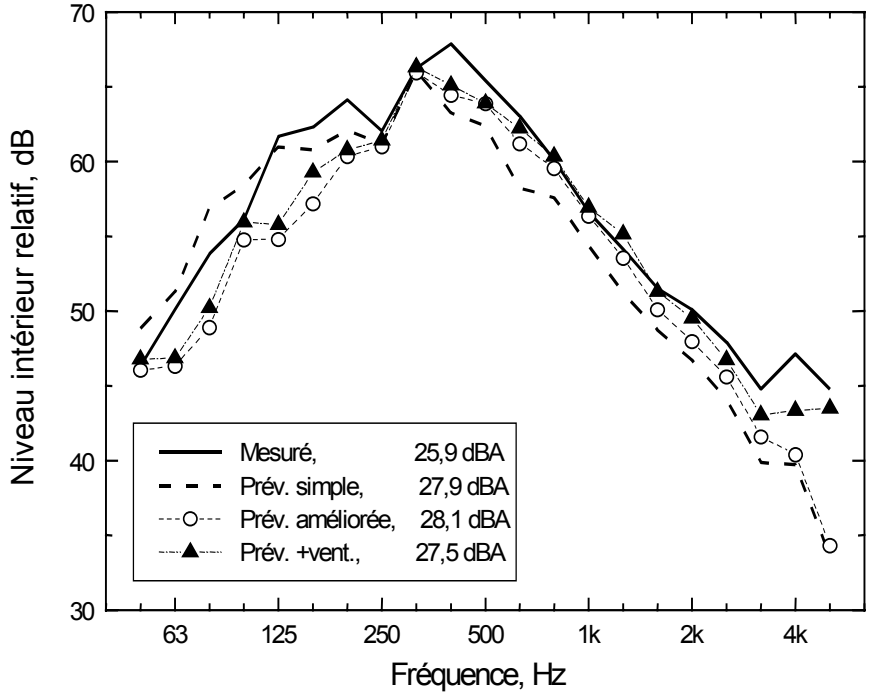


Figure 18b. Comparaison des niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus pour la pièce A (côté éloignement) – Essai n° 10 (fenêtres d'extrémité exposées).

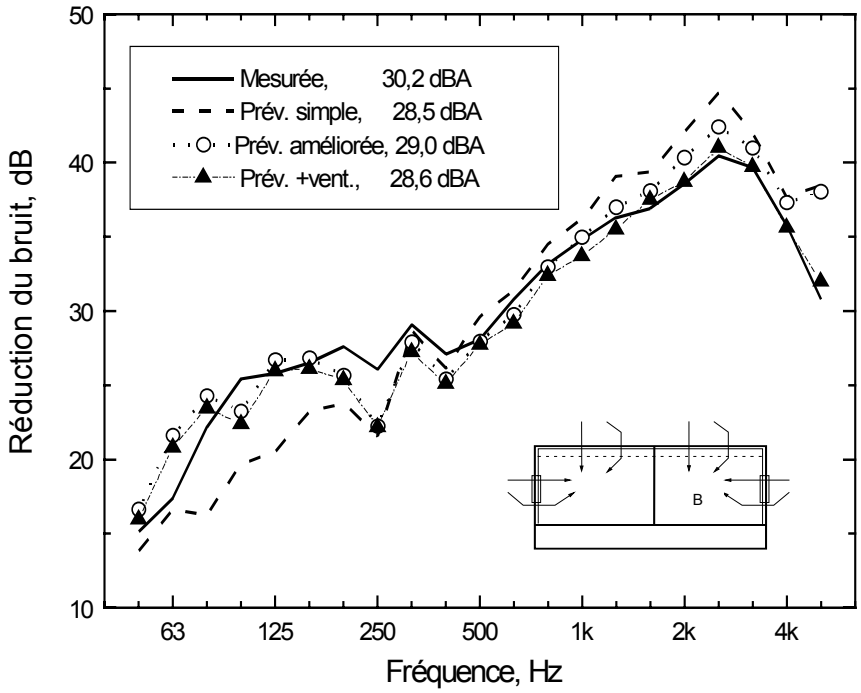


Figure 19a. Comparaison de la réduction du bruit (RB) mesurée et prévue pour la pièce B (côté approche) – Essai n° 10 (fenêtres d'extrémité exposées).

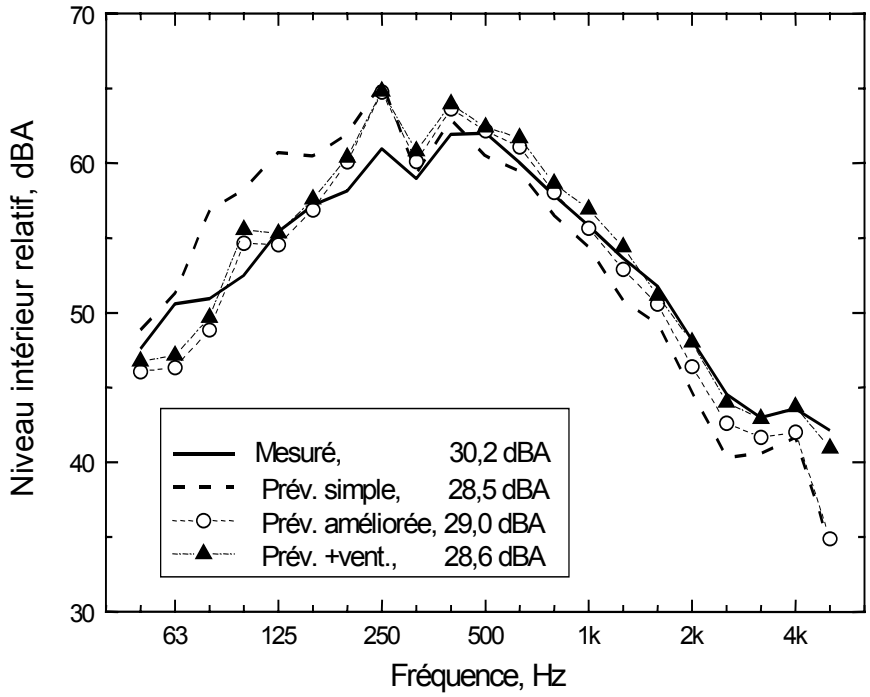


Figure 19b. Comparaison des niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus pour la pièce B (côté approche) – Essai n° 10 (fenêtres d'extrémité exposées).

Les figures 20 et 21 comparent les réductions du bruit mesurées et prévues selon les résultats de l'essai n° 12 dans lesquels les deux murs de chaque pièce étaient fenêtrés. Toutefois, une fenêtre était d'un modèle différent de celui utilisé dans les autres essais avec fenêtres. Les mesures de la configuration n° 12 ont été effectuées avant celles des configurations n° 10 et n° 11 et des cloisons insonorisantes ont été érigées pour éliminer une bonne partie de la transmission du son par l'autre fenêtre. Après les mesures de l'essai n° 12, la fenêtre d'extrémité (côté éloignement) de la pièce A a été remplacée parce que le cadre était défectueux, créant une fuite acoustique évidente. Les mesures en laboratoire de cette fenêtre indiquaient également des joints d'étanchéité de mauvaise qualité et les valeurs de perte de transmission du son obtenues en laboratoire et utilisées dans ces prévisions constituaient la moyenne de deux essais présentant de légères différences. Quant aux résultats de l'essai n° 10 de la pièce A, cette fenêtre a été remplacée par une fenêtre d'un autre modèle qui assuraient des caractéristiques d'isolation acoustique légèrement supérieures.

Les résultats de la figure 20 indiquent une réduction du bruit inférieure aux hautes fréquences en raison de la qualité moins satisfaisante de cette fenêtre. Malgré ces problèmes pratiques, les prévisions étaient encore exactes par rapport aux réductions du bruit mesurées. L'ajout de la correction des réflexions au sol dans les prévisions « améliorées » a accru la concordance entre les valeurs mesurées et prévues aux fréquences inférieures. Les corrections propres aux voies de transmission indirecte et aux orifices de ventilation permettent encore d'améliorer la concordance aux fréquences supérieures.

Pour la pièce A, les niveaux pondérés-A globaux mesurés ont été prévus à moins de 0,6 dBA et, pour la pièce B, à moins de 2,5 dBA.

En général, les différences les plus importantes entre les valeurs mesurées et prévues tendent à se produire dans la pièce B aux environs de 250 Hz. La pièce B se trouve du côté approche de l'immeuble et l'énergie sonore incidente est censée être inférieure à la mesure réalisée à la position du microphone éloigné en champ libre. Cela concourt aux différences accrues entre les valeurs mesurées et prévues pour la pièce B. Les grandes différences vers les 250 Hz sont probablement causées par la résonance masse-air-masse de la fenêtre qui correspond à peu près à cette fréquence. Les essais exécutés avec un haut-parleur source (voir section 4.1) ont révélé que la transmission du son à cette résonance variait selon l'angle d'incidence du son et qu'elle était supérieure pour le son normalement incident. Ainsi, les mesures en laboratoire permettent de prévoir une légère chute de la réduction du bruit à 250 Hz, ce qui est constaté dans les résultats prévus des figures 17a, 19a et 21a, mais est absent des réductions du bruit mesurées pour ces résultats. Par conséquent, il existe une tendance généralisée selon laquelle la réduction du bruit mesurée est inférieure aux valeurs prévues aux alentours de cette fréquence.

Bien que la prise en compte de l'effet prévu des orifices de ventilation de toit améliore la prévision de réductions du bruit à des fréquences supérieures, ce paramètre n'augmente pas beaucoup l'exactitude de la prévision des réductions de niveau pondérées-A globales.

Les réductions de niveau pondérées-A globales mesurées et prévues sont résumées dans la figure 22 dans le cas des essais comportant des fenêtres. Les réductions de niveau pondérées-A globales étaient de 2 à 4 dBA inférieures à celles des murs simples sans fenêtre, mais de 3 à 7 dBA inférieures à celles des murs améliorés de l'essai n° 5, construction à laquelle des fenêtres ont été ajoutées. Les valeurs mesurées ont été prévues avec un écart-type de 0,5 dBA, soit avec des différences de –2,4 à +1,6 dBA établies à l'aide des prévisions « améliorées » tenant compte de corrections supplémentaires propres à l'effet des orifices de ventilation. Les résultats sont aussi exacts que ceux des prévisions simples. Bien que les corrections tenant compte de l'effet des orifices de ventilation produisent une concordance accrue aux fréquences supérieures dans les figures 16 à 21, elles n'influent que légèrement sur les niveaux sonores intérieurs pondérés-A.

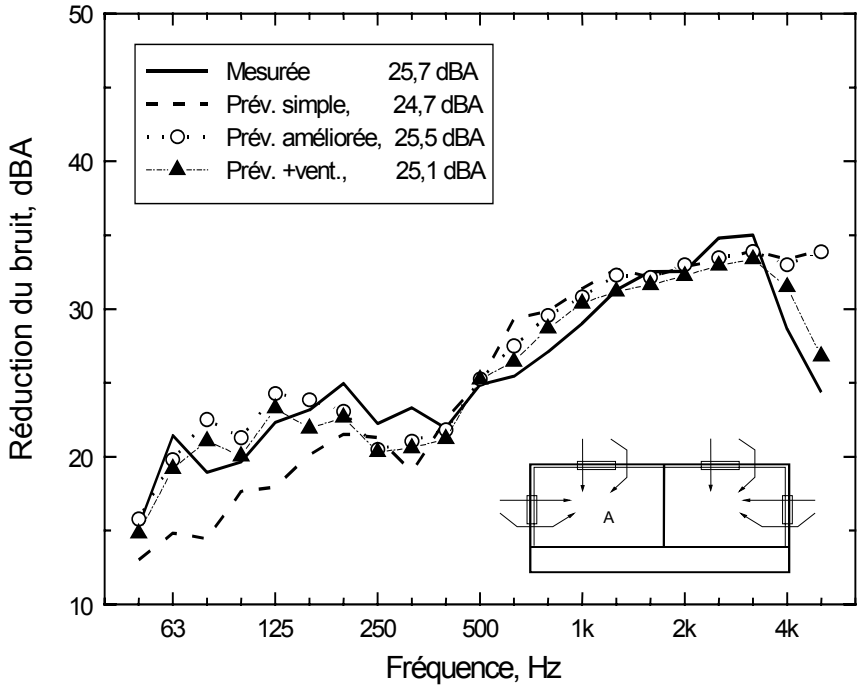


Figure 20a. Comparaison de la réduction du bruit (RB) mesurée et prévue pour la pièce A (côté éloignement) – Essai n° 12 (deux fenêtres exposées).

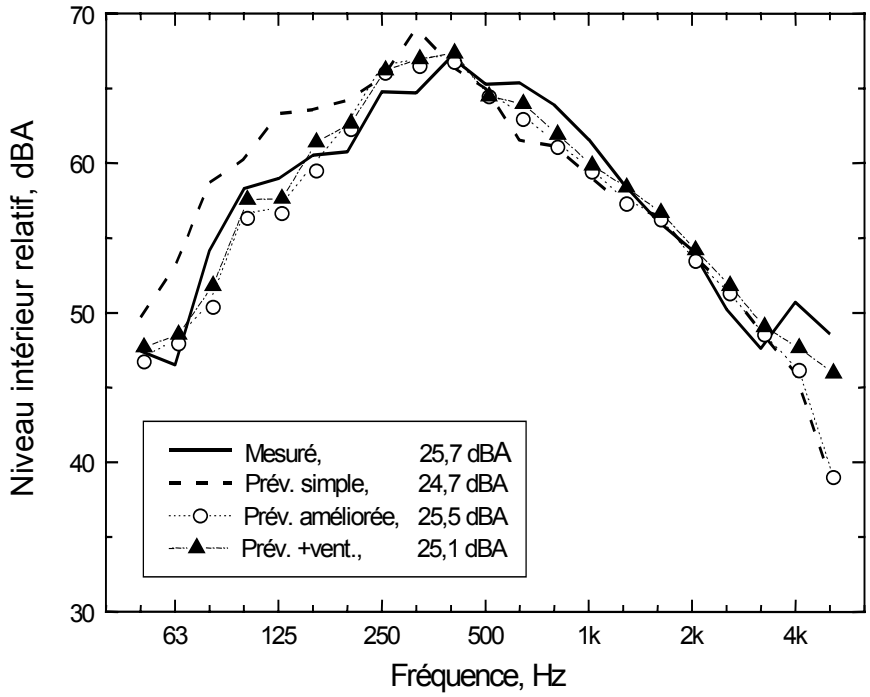


Figure 20b. Comparaison des niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus pour la pièce A (côté éloignement) – Essai n° 12 (deux fenêtres exposées).

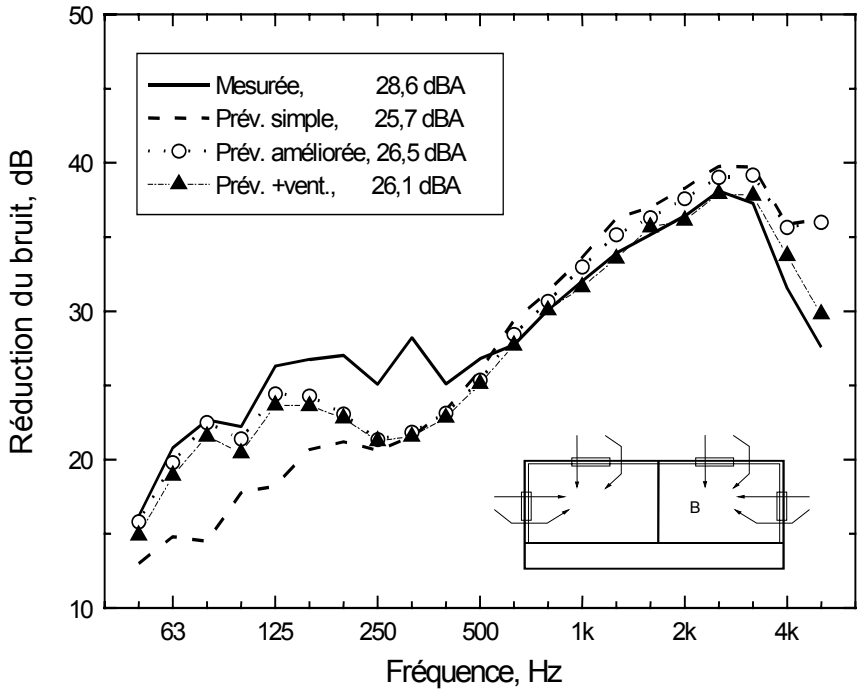


Figure 21a. Comparaison de la réduction du bruit (RB) mesurée et prévue pour la pièce B (côté approche) – Essai n° 12 (deux fenêtres exposées).

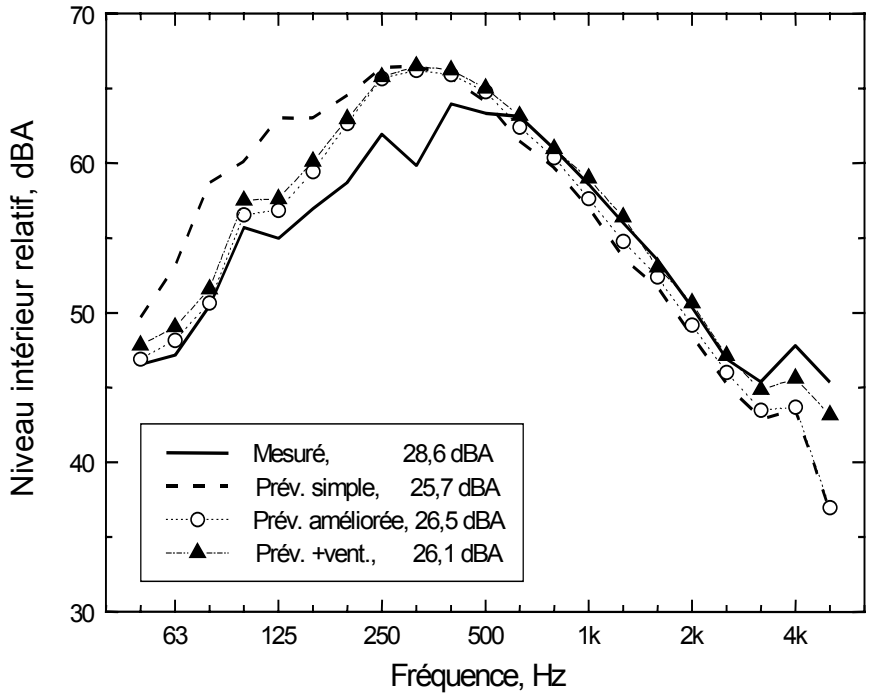


Figure 21b. Comparaison des niveaux sonores intérieurs pondérés-A mesurés et prévus pour la pièce B (côté approche) – Essai n° 12 (deux fenêtres exposées).

globaux. Les niveaux pondérés-A globaux sont surtout touchés par des changements mineurs dans la gamme de 200 à 630 Hz, comme ceux qui sont liés à la résonance masse-air-masse des fenêtres. Par conséquent, les effets à basses fréquences des réflexions au sol sont moins importants pour les murs fenêtrés.

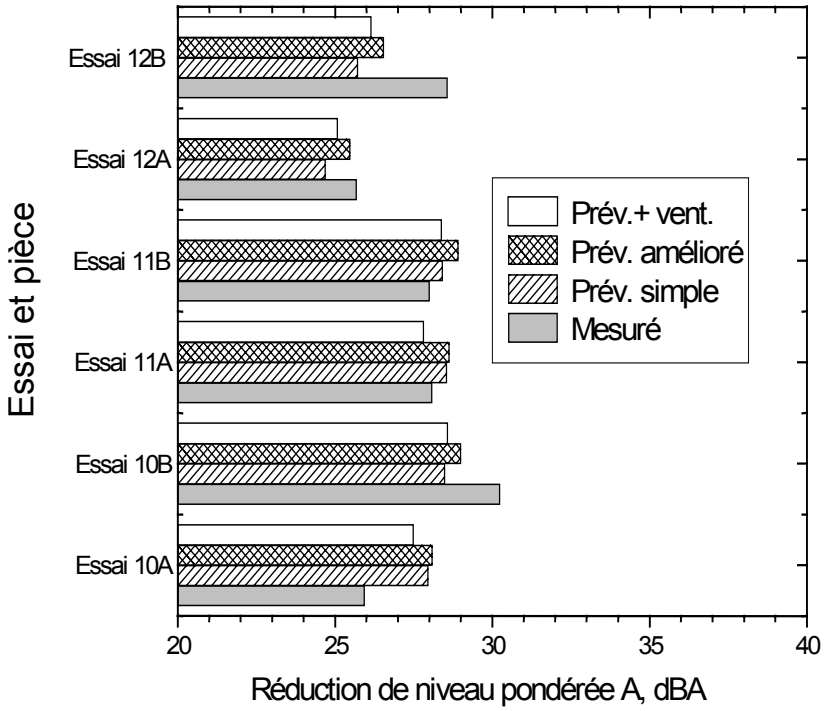


Figure 22. Comparaison des réductions de niveau pondérées-A globales des essais des murs fenêtrés.

3.3 Orifices de ventilation

3.3.1 Dispositifs de toit, de faîte et d'avant-toit

Les règles de l'art de la construction prévoient généralement la ventilation des entretoits non chauffés pour éviter l'accumulation d'humidité. Cette pratique comprend habituellement l'installation de ventilation de faîte le long du toit ou d'orifices de ventilation de toit distincts près du faîte, ainsi que des orifices de ventilation dans l'avant-toit sous le débord du toit. La combinaison des orifices d'avant-toit et de la ventilation de toit ou de faîte est censée favoriser la circulation d'air dans l'entretoit. Toutefois, ces dispositifs de ventilation sont influent aussi sur l'isolation acoustique du toit. Différents essais sur les effets de l'ajout d'orifices de ventilation ont été inclus dans les essais en laboratoire sur différentes toitures ainsi que dans les essais effectués à la SEAO.

Les mesures en laboratoire ont pris en considération des combinaisons de constructions de toit avec ventilation de toit ou de faîte beaucoup plus nombreuses que ne le permettait la SEAO. Bien que les résultats des essais en laboratoire aient été présentés dans un rapport précédent [1], un résumé de l'incidence des orifices de ventilation de toit a été intégré au présent rapport pour faciliter les comparaisons avec les résultats des essais sur le terrain. La ventilation de faîte fait toute la longueur du faîte du toit tant pour les mesures en laboratoire que sur le terrain. La coupe transversale du dispositif de ventilation de faîte est présentée à la figure 23. La figure 24 constitue un plan et la coupe transversale de l'un des dispositifs de ventilation de toit en plastique qui ont été utilisés lors des essais en laboratoire et à la SEAO. La surface de l'ouverture de cette figure est de 0,053 m^2.

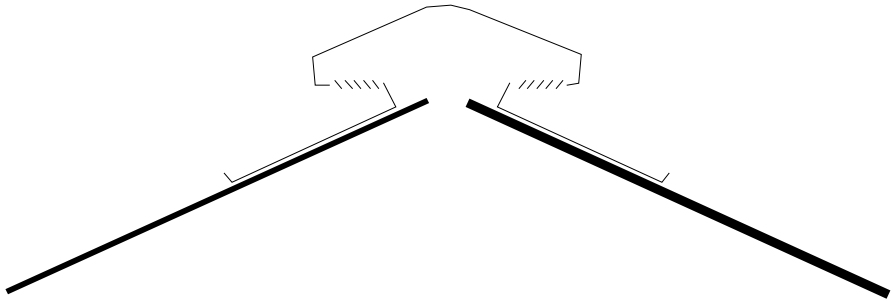


Figure 23. Coupe transversale du dispositif de ventilation de faîte en aluminium utilisé à la fois dans les essais en laboratoire et à la SEAO.

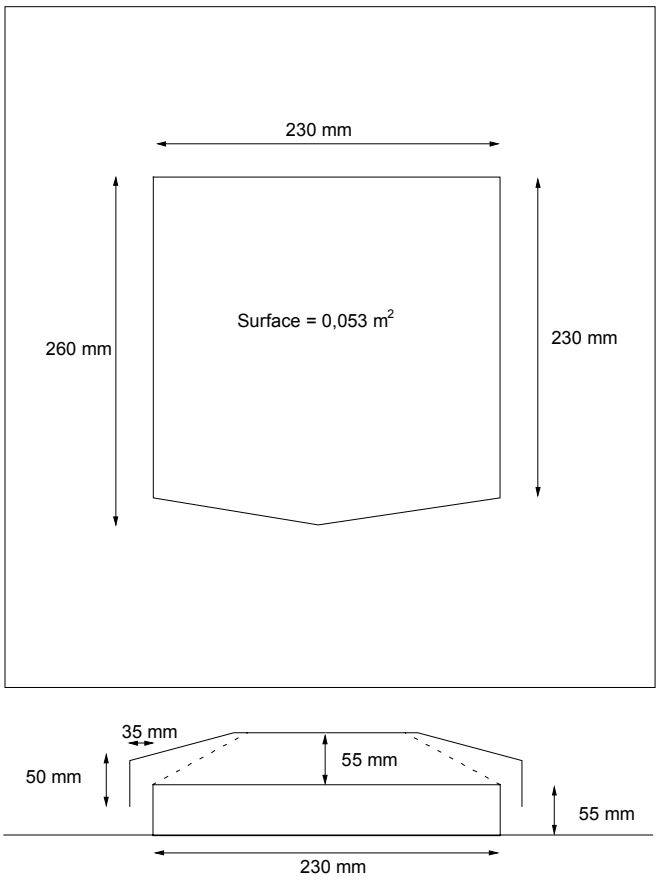


Figure 24. Plan et coupe transversale de l'un des dispositifs en plastique utilisés lors des essais en laboratoire et à la SEAO.

Le tableau IIIa résume les résultats de l'addition de ventilation de faîte et de toit lors des essais en laboratoire. Il était impossible d'ajouter des orifices de ventilation d'avant-toit en laboratoire parce que les toits ont été construits dans l'ouverture entre deux enceintes de réverbération destinées aux essais de planchers. Les réductions du bruit pondérées-A globales pour chaque essai de perte de transmission du son ont d'abord été calculées à l'aide du spectre de source standard de bruit d'aéronefs (voir chapitre 6). Le tableau IIIa présente les différences de réduction de niveau pondérée-A globale lorsque les orifices de ventilation ont été ajoutés à chacun des toits.

Ces résultats d'essais en laboratoire comprennent différentes combinaisons de constructions de trois types de toits, notamment : (1) toits plats construits sur des solives de 2 x 10, (2) toits plats construits sur des fermes en bois de 14 po de profondeur et (3) toits inclinés sur fermes en bois à chevrons relevés (FBCR). Bien que les deux premiers soient décrits comme des toits plats, ils sont aussi considérés comme des toits de type dit à « plafond cathédrale » quand les couches intérieures et extérieures sont parallèles et quand l'entretoit est inexistant. Les résultats font état de différents types d'isolation thermique dans l'espace entre les solives, de nombres différents de couches et de différentes méthodes de fixation du placoplâtre. Ils comprennent aussi quelques constructions partielles qui permettent de mieux comprendre les effets de chaque paramètre.

Dans le cas des toits plats sur solives en bois de 2 x 10, la réduction du bruit pondérée-A globale a diminué de -1 à –2,1 dBA lorsque six (6) orifices de ventilation ont été installés. Lorsque les orifices de ventilation restaient ouverts sans être couverts par les évents en plastique, la réduction du bruit diminuait de –2,3 dBA. Des résultats semblables ont été obtenus dans le cas des toits à fermes en bois de 14 po.

Le toit à fermes en bois à chevrons relevés est essentiellement construit comme le toit de la SEAO. Lorsque cette construction a été mise à l'essai sans plafond, l'ajout de six (6) orifices de ventilation de toit a diminué la réduction de niveau pondérée-A globale de –7,8 dBA. Quand un plafond sans isolation thermique a été installé pour fermer le comble du toit, l'addition de six (6) orifices de ventilation de toit a entraîné une diminution de la réduction de niveau pondérée-A globale de –5,1 dBA. Après la pose de fibre de verre isolante R20 (151 mm), l'incidence des orifices de ventilation est passée à –2,4 dBA et, après l'installation de fibre de verre isolante R40 (256 mm d'épaisseur), l'incidence des orifices de ventilation est passée à –1,3 dBA. Ces deux valeurs ont été obtenues dans le cas d'un plafond recouvert d'une seule couche de placoplâtre directement posée. L'ajout d'une deuxième couche de placoplâtre directement fixée au plafond isolé de la même fibre R40 a permis de faire passer les effets de l'addition de six orifices de ventilation à –0,8 dBA.

Dans le cas des toits FBCR dont le placoplâtre est fixé au moyen de profilés souples, les changements suivant l'ajout des orifices de ventilation ont été légèrement supérieurs. L'addition des six (6) orifices de ventilation au toit auquel une couche de placoplâtre a été fixée sur profilés souples et qui a été isolé thermiquement à l'aide de fibre de verre R40 a entraîné un changement de –2,5 dBA. La pose d'une deuxième couche de placoplâtre (sur les mêmes profilés souples) a fait passer le changement à –1,7 dBA.

Des tendances semblables ont été relevées lorsque la ventilation de faîte a été ajoutée aux toits d'essai en laboratoire. Des changements des réductions du bruit pondérées-A globales aussi importants que –6,9 dBA, dans le cas d'un toit sans plafond, et –4,7 dBA, pour un toit avec plafond, mais sans isolation thermique, sont présentés dans le tableau IIIa. Ces valeurs sont passées à –2,4 et à –1,3 dBA lorsque la ventilation de faîte a été ajoutée à des toits FBCR isolés de fibre de verre R20 et R40 respectivement.

Les six orifices de ventilation de toit correspondent au double de ce qui serait normalement nécessaire, mais ils ont été posés ici pour produire des effets distincts. Le tableau IIIa présente également les résultats d'autres essais sur des toits FBCR équipés de différents nombres d'orifices de ventilation. L'utilisation d'un orifice de ventilation n'a diminué les réductions du bruit pondérées-A globales que de -0,3 dBA, l'emploi de trois orifices a entraîné un changement de –1,4 dBA comparativement au changement de –2,4 dBA causé par l'addition des six orifices.

Change-ment (dBA)	Description
	Solives en bois 2 po x 10 po avec contre-fiches
	six orifices de ventilation en place
-1,0	SHN_BPAP0.7_OSB13_WS38(406)_WJ235(406)_GFB203_G13
-2,1	SHN_BPAP0.7_OSB13_WS38(406)_WJ235(406)_GFB203_RC13(610)_G13
-1,4	SHN_BPAP0.7_OSB13_WS38(406)_WJ235(406)_GFB203_RC13(610)_2G13
	six ouvertures de ventilation, mais aucun dispositif de ventilation en place
-2,3	SHN_BPAP0.7_OSB13_WS38(406)_WJ235(406)_GFB203_RC13(610)_2G13
	Fermes en bois de 14 po de profondeur
	six orifices de ventilation en place
-0,4	SHN_BPAP0.7_OSB13_WT356(406)_GFB264_G13
-1,2	SHN_BPAP0.7_OSB13_WT356(406)_GFB264_RC13(610)_2G13
	Fermes en bois à chevrons relevés
	six orifices de ventilation en place
-7,8	SHN_BPAP0.7_OSB11_RHWT1626
-5,1	SHN_BPAP0.7_OSB11_RHWT1626_G13
-2,4	SHN_BPAP0.7_OSB11_RHWT1626_GFB152_G13
-1,3	SHN_BPAP0.7_OSB11_RHWT1626_GFB264_G13
-0,8	SHN_BPAP0.7_OSB11_RHWT1626_GFB264_2G13
-2,5	SHN_BPAP0.7_OSB11_RHWT1626_GFB264_RC13(610)_G13
-1,7	SHN_BPAP0.7_OSB11_RHWT1626_GFB264_RC13(610)_2G13
	ventilation de faîte en place
-6,9	SHN_BPAP0.7_OSB11_RHWT1626
-4,7	SHN_BPAP0.7_OSB11_RHWT1626_G13
-2,4	SHN_BPAP0.7_OSB11_RHWT1626_GFB152_G13
-1,3	SHN_BPAP0.7_OSB11_RHWT1626_GFB264_RC13(610)_2G13
	différents nombres d'orifices de ventilation de toit
-0,3	SHN_BPAP0.7_OSB11_RHWT1626_GFB152_G13 - un (1) orifice
-1,4	SHN_BPAP0.7_OSB11_RHWT1626_GFB152_G13 - trois (3) orifices
-2,4	SHN_BPAP0.7_OSB11_RHWT1626_GFB152_G13 - six (6) orifices
	toit de tôle, ventilation de faîte en place
-0,5	STE0.3_WFUR19(406)_RHWT1626_GFB152_G13
-0,4	STE0.3_WFUR19(406)_RHWT1626_GFB264_G13
-0,4	STE0.3_WFUR19(406_RHWT1626_GFB264_RC13(610)_2G13

Tableau IIIa. Changements des réductions de niveau pondérées-A globales en présence d'orifices de ventilation; spectre de source standard de bruit d'aéronefs utilisés pour les résultats des mesures en laboratoire. Les symboles décrivant la construction figurent au tableau IIIb.

BPAP	Papier de construction
G13	Placoplâtre ordinaire de 13 mm (1/2 po)
GFB	Natte de fibre de verre isolante
OSB	Panneau de copeaux orientés
RC	Profilés souples
RHWT	Ferme en bois à chevrons relevés
SHN	Bardeaux de toiture
STE	Toit en tôle ondulée
WFUR(xxx)	Tasseaux de bois de xxx mm de centre à centre
WJ	Solives en bois
WS(xxx)	Poteaux en bois espacés de xxx mm de centre à centre
WT	Fermes en bois

Tableau IIIb. Symboles des composants de construction du tableau IIIa.

Enfin, le tableau IIIa présente les résultats de l'ajout de ventilation de faîte aux toits FBCR recouverts de tôle plutôt que de bardeaux d'asphalte. En présence de ventilation de faîte, la modification de l'isolation thermique ou l'addition d'une deuxième couche de placoplâtre sur des profilés souples a entraîné des changements mineurs similaires, soit de –0,4 à –0,5 dBA.

En général, les résultats d'essais en laboratoire laissent entendre que l'installation de ventilation de faîte ou d'orifices de ventilation de toit influe peu sur la réduction du bruit pondérée-A globale lorsque l'entretoit est isolé avec de la fibre de verre présentant un coefficient d'au moins R20 (152 mm). En présence d'un nombre plus réaliste d'orifices de ventilation de toit et d'isolation thermique, l'ajout de ventilation devrait diminuer la réduction de niveau pondérée-A globale d'au plus 2 dBA.

Les incidences des orifices de ventilation de toit ont été étudiées à la SEAO pour ce qui est de la différence des réductions du bruit entre l'essai de base n° 5 sans orifice de ventilation et les essais n° 6, n° 7 et n° 8 avec orifices de ventilation.

Lors de l'essai n° 6, six orifices de ventilation de toit ont été installés. Quant à l'essai n° 7, des orifices de ventilation d'avant-toit ont été ajoutés aux six orifices de toit. Dans le cas de l'essai n° 8, les orifices de ventilation de toit ont été remplacés par un dispositif de ventilation de faîte et les orifices d'avant-toit ont été conservés. Les effets de l'addition de ces dispositifs de ventilation ont été déterminés séparément selon les mesures des deux pièces de l'habitation d'essai.

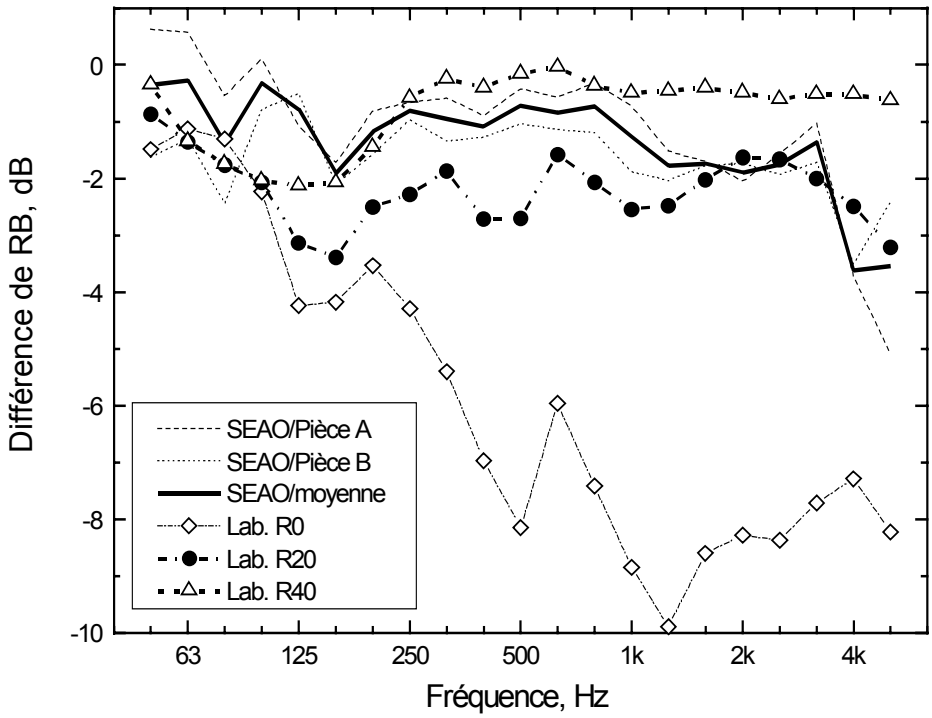


Figure 25. Changements des réductions du bruit (RB) mesurées après ajout de 6 orifices de ventilation de toit pour les essais en laboratoire et à la SEAO.

La figure 25 illustre les changements mesurés suite à l'ajout des six orifices de ventilation sur le toit de la SEAO. Les résultats des essais dans les pièces A et B sont assez semblables; ainsi la moyenne des deux pièces peut être utilisée. Cette moyenne est également comparée aux mesures en laboratoire de l'incidence d'orifices de ventilation posés sur un toit de type FBCR. Les résultats moyens à la SEAO se trouvent à mi-chemin des résultats d'essais en laboratoire portant sur un entretoit à isolation thermique R20 et R40. Bien que l'entretoit de la SEAO soit isolé à la fibre de verre R40, les mesures sur le terrain ont révélé, après l'installation d'orifices de ventilation de toit, une diminution de la RB aux fréquences moyennes qui est légèrement supérieure aux résultats d'essais en laboratoire correspondants avec isolation thermique R40. Cependant, l'incidence totale reste minime. Le changement moyen de la réduction de niveau pondérée-A globale était de –1,0 dBA à la SEAO, ainsi que de –2,4 et de –1,3 dBA pour des toits semblables respectivement isolés à l'aide de fibre de verre R20 et R40 dans les essais en laboratoires (voir tableau IIIa).

Les changements mesurés des réductions du bruit après l'installation d'orifices de ventilation d'avant-toit sont présentés à la figure 26 de pair avec les résultats de l'essai précédent avec les orifices de toit seulement. De nouveau, les résultats des deux pièces sont généralement assez semblables mais, curieusement, l'ajout d'orifices de ventilation d'avant-toit semble favoriser la réduction du bruit plutôt que la diminuer. Cet aspect sera abordé plus tard, mais semble être causé par les angles d'incidence moyens différents du bruit d'aéronefs dans les deux cas.

La figure 27 comporte les résultats mesurés de l'essai pour lequel un dispositif de ventilation de faîte et des orifices de ventilation d'avant-toit ont été ajoutés à la SEAO. Il existe des différences légèrement supérieures entre les résultats des deux pièces aux fréquences inférieures, mais des résultats généralement semblables ont été obtenus dans les deux pièces. La combinaison de la

ventilation de faîte et des orifices d'avant-toit semble diminuer la réduction du bruit davantage que dans les essais touchant les autres types de ventilation au-dessus de 500 Hz. Les changements pondérés-A globaux des trois essais réalisés à la SEAO sont compris dans le tableau IV et varient entre –0,7 et –1,9 dBA.

L'étude approfondie des mesures permet d'expliquer les effets imprévus de l'ajout d'orifices de ventilation dans l'avant-toit à la configuration d'essai avec ventilation de toit. Lorsque les réductions du bruit mesurées pour chaque passage d'aéronef sont représentées graphiquement en fonction de l'angle vertical de l'aéronef, on constate, à hautes fréquences, que les réductions du bruit mesurées diminuent proportionnellement à l'augmentation de l'angle vertical de l'aéronef. La figure 28 illustre les mesures à 2 kHz. Dans la gamme d'angles de 30 à 60 degrés, les réductions du bruit mesurées lors des trois essais différents touchant les orifices de ventilation et la réduction de l'essai de référence n° 5 variaient d'environ 3 dB. Ainsi, pour comparer les constructions avec exactitude, les bruits incidents d'aéronefs devraient avoir le même angle d'incidence vertical moyen. L'angle d'incidence moyen des résultats de l'essai n° 6 (orifices de toit seulement) est d'environ 50 degrés, mais celui des résultats de l'essai n° 7 (orifices de ventilation de toit et d'avant-toit) est d'environ 35 à 40 degrés. Cela pourrait facilement expliquer l'effet néfaste apparent de l'addition d'orifices de ventilation dans l'avant-toit, représenté figure 26. Par conséquent, il semble que l'effet réel de l'ajout des orifices de ventilation dans l'avant-toit aux orifices de toit était probablement minime et l'écart observé était causé par les différents angles d'incidence des bruits d'aéronefs.

Il est nettement souhaitable de mettre à l'essai chacune des configurations de la SEAO au moyen d'un plus grand nombre de passage d'aéronefs. Cela n'était malheureusement pas possible en raison des contraintes financières qui limitaient les mesures sur le terrain à une saison. En général, les effets de l'ajout d'orifices de ventilation étaient trop infimes pour être mesurés avec exactitude sur le terrain. Comme il n'existe aucun élément prouvant que l'addition d'orifices de ventilation de toit influe considérablement sur les réductions du bruit mesurées, il est probablement plus exact d'estimer les effets prévus de l'ajout des orifices de ventilation

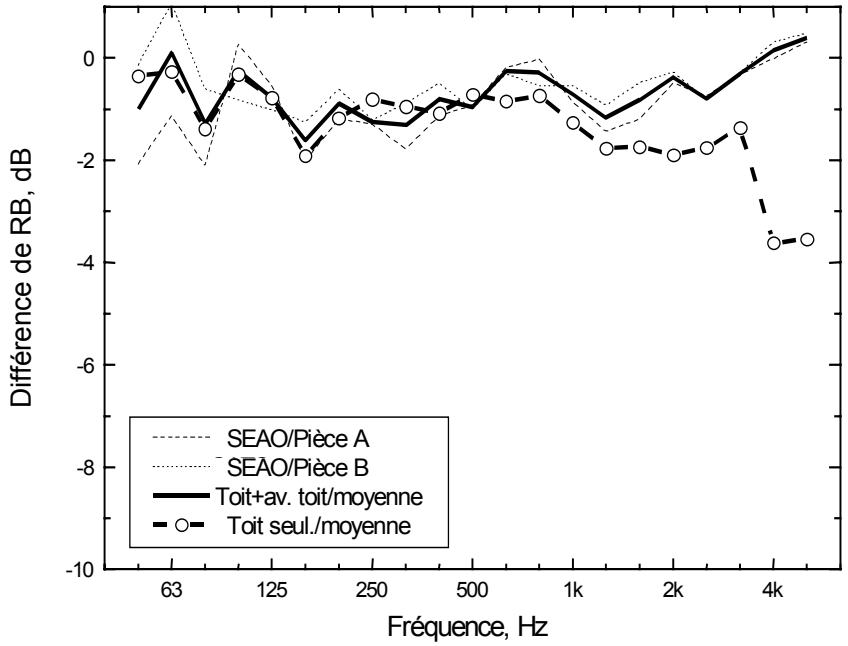


Figure 26. Changements aux réductions du bruit (RB) mesurées après ajout d'orifices de ventilation d'avant-toit aux 6 orifices de toit pour les essais en laboratoire et à la SEAO.

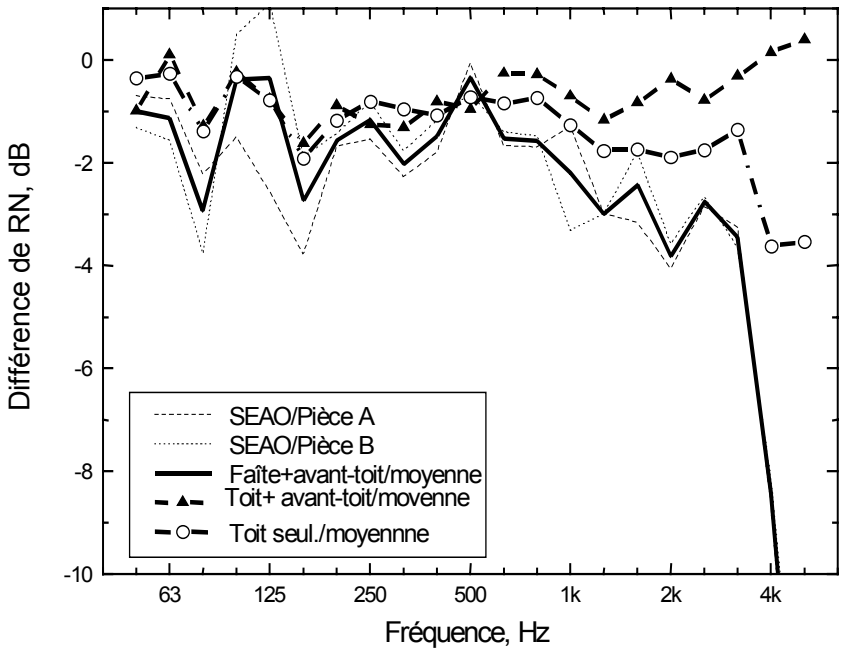


Figure 27. Changements des réductions du bruit (RB) mesurées après ajout de ventilation de faîte et d'avant-toit pour les essais en laboratoire et à la SEAO.

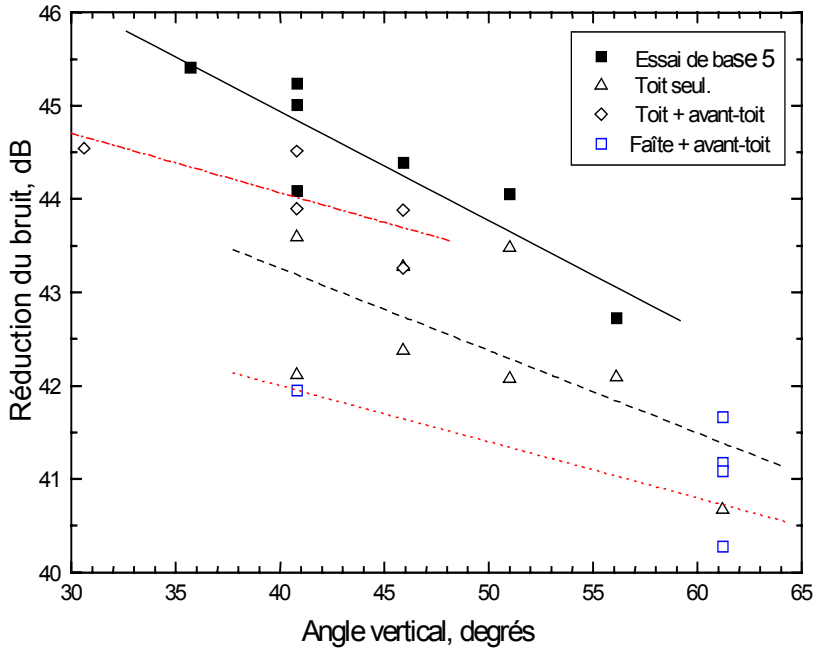


Figure 28. Variation des réductions du bruit mesurées à 2 kHz selon l'angle vertical des aéronefs.

à partir des résultats d'essai en laboratoire. Les différences entre les résultats de l'essai n° 5 (sans ventilation) et de l'essai n° 8 ont servi à déterminer la perte de transmission efficace des dispositifs de ventilation de faîte. Ces valeurs de PT efficace ont été calculées à l'aide des réductions du bruit mesurées et de l'aire du composant toit-plafond à titre de surface associée. Ces résultats, illustrés à la figure 29, ont servi à corriger les réductions du bruit calculées selon les effets de la ventilation de faîte dans les configurations des murs fenêtrés de la section précédente.

Le tableau IV résume les changements des réductions de niveau pondérées-A globales lorsque des dispositifs de ventilation de faîte, de toit et d'avant-toit ont été ajoutés à la SEAO. L'ajout d'orifices dans le toit a entraîné des réductions du bruit globales d'environ 1 dBA (-0,7 et –1,3 dBA). L'addition de ventilation de faîte a diminué la réduction du bruit globale de 1 à 2 dBA (-1,9 et –1,2 dBA). Dans les résultats d'essais en laboratoire du tableau IIIa, l'ajout d'orifices de toit ont entraîné un changement de –1,3 dBA qui s'apparente beaucoup aux réductions de –0,7 et de –1,3 dBA à la SEAO (voir tableau IV). Les essais en laboratoire ne comprenaient pas la même construction à ventilation de faîte mais, quand un dispositif de faîte a été ajouté aux toits FBCR possédant la même quantité de fibre de verre isolante mais dont le plafond était constitué de deux couches de placoplâtre sur profilés souples, le changement était de –1,3 dBA (voir tableau IIIa). Ainsi, les tendances globales des résultats de la SEAO s'apparentent considérablement à celles qui ont été relevées dans les essais en laboratoire.

Change-ment, dBA	Description
-0,7	Orifices de ventilation de toit, pièce A
-1,3	Orifices de ventilation de toit, pièce B
-1,0	Orifices de ventilation de toit et d'avant-toit, pièce A
-0,8	Orifices de ventilation de toit et d'avant-toit, pièce B
-1,9	Ventilation de faîte et d'avant-toit, pièce A
-1,2	Ventilation de faîte et d'avant-toit, pièce B

Tableau IV. Réductions mesurées des niveaux sonores pondérés-A globaux dans chaque pièce et pour chaque addition de ventilation de faîte, de toit et d'avant-toit à SEAO.

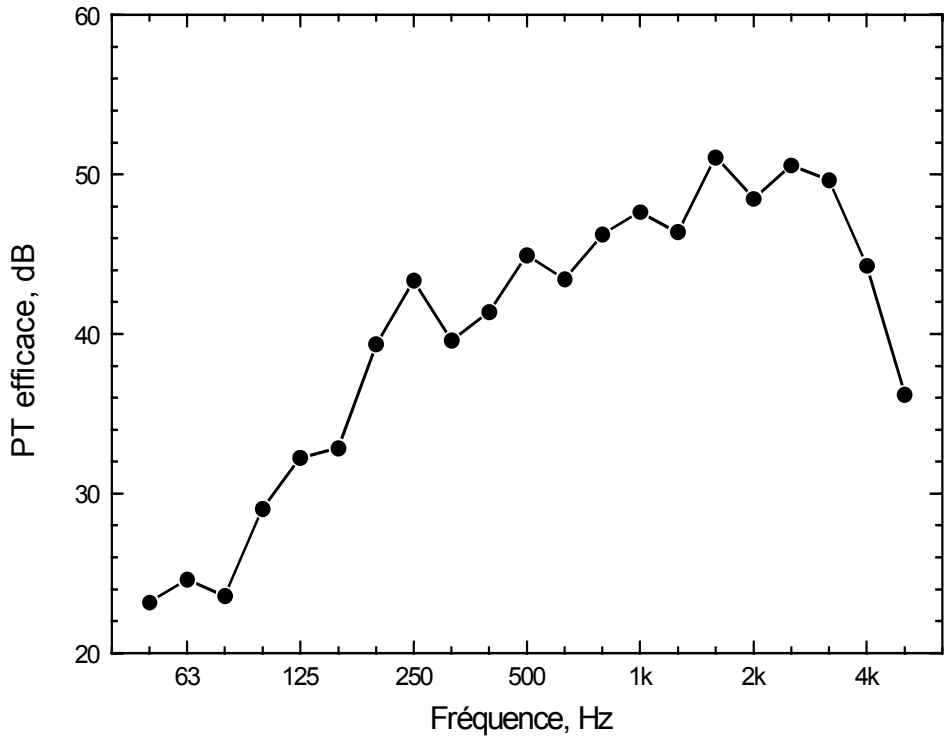


Figure 29. Perte de transmission (PT) efficace de la ventilation de faîte calculée à l'aide des réductions du bruit mesurées selon l'aire totale du plafond et dont la moyenne est établie selon les deux pièces.

3.3.2 Orifices de ventilation muraux

La section précédente traitait des effets des orifices de ventilation dans le vide sous toit. Ces dispositifs ne provoquent pas de fuite acoustique directe vers l'intérieur de l'immeuble et, par conséquent ont habituellement des effets minimes. Dans la présente section, l'effet d'un nombre limité d'essais des orifices de ventilation muraux est pris en compte. Il s'agissait d'orifices de ventilation qui reliaient directement l'extérieur à l'intérieur des pièces d'essai et ont entraîné des effets acoustiques beaucoup plus importants. Deux types d'orifices de ventilation muraux ont été mis à l'essai à la SEAO et l'un d'eux a aussi fait l'objet d'un essai en laboratoire. La figure 30 illustre les principales dimensions des orifices de ventilation installés dans les pièces d'essai de la SEAO. Une hotte de cuisine classique qui devrait normalement surplomber une cuisinière pour extraire les vapeurs de cuisson a été installée dans la pièce A. Celle-ci communiquait directement avec l'extérieur par un conduit d'extraction court qui traversait le mur de l'immeuble. Ce conduit était doté de deux volets de métal légers de chaque côté du mur extérieur pour réduire la circulation d'air indésirable de l'extérieur vers l'intérieur. La même hotte de cuisine a été mise à l'essai dans un mur à forte perte de transmission en laboratoire. L'autre orifice de ventilation était constitué d'un tuyau rond d'une longueur totale de 0,91 m dans la pièce B et correspondait approximativement à un orifice de ventilation de salle de bain. Comme l'autre dispositif, l'orifice était couvert d'une trappe antipluie intérieure sur l'ouverture extérieure et doté d'un volet en métal léger pour bloquer la circulation d'air indésirable.

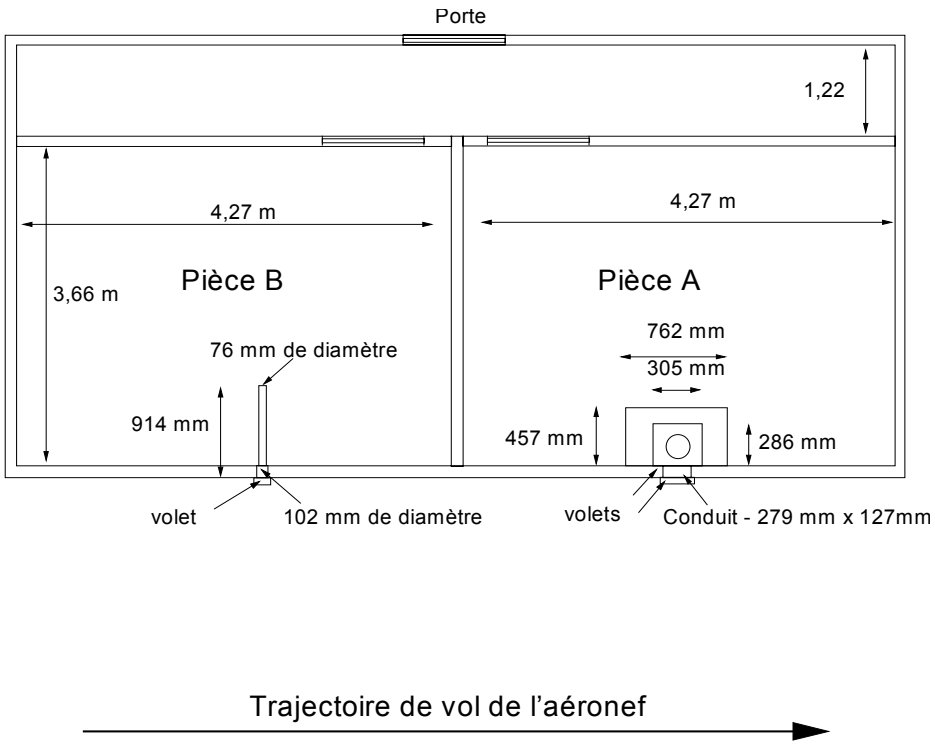


Figure 30. Plan de la SEAO portant les détails des deux orifices muraux.

La figure 31 représente graphiquement les valeurs de perte de transmission (PT) mesurées dans le mur à forte PT du laboratoire et pour le même mur équipé de la hotte d'extraction. Au-dessus de 125 Hz, il existe des différences importantes des valeurs PT mesurées lorsque l'orifice d'extraction est en place. Les figures 32 et 33 présentent des tracés semblables tenant compte de l'ajout de deux orifices de ventilation différents à la SEAO. Les valeurs PT de la SEAO sans orifice de ventilation ne sont pas aussi élevées que pour le mur d'essai en laboratoire, mais les effets de l'ajout d'orifices muraux sont assez importants. Au-dessus de 160 à 200 Hz, l'ajout d'orifices de ventilation diminue considérablement la réduction du bruit de l'immeuble. Au-dessous de ces fréquences, l'addition d'orifices de ventilation a peu d'effet.

Une estimation simple de l'effet des orifices de ventilation qui communiquent directement avec l'extérieur permet de supposer qu'ils présentent une perte de transmission de 0 dB. Ainsi, il est possible de calculer l'effet prévu de l'ajout de dispositifs de ventilation à partir de l'aire des ouvertures et de supposer une PT de 0 dB. Quant aux résultats actuels, nous pouvons calculer les valeurs PT efficace de chacun des dispositifs muraux mis à l'essai et de les comparer à la prévision simple d'une ouverture à PT de 0 dB.

L'aire de chaque dispositif mural correspond à l'aire des conduits qui traversent le mur, soit 0,0355 m^2 dans le cas de la hotte d'extraction et de 0,0081 m^2 dans le cas du tuyau rond. La figure 34 illustre les valeurs PT calculées dans les essais de la hotte d'extraction. Les résultats des essais à la SEAO et en laboratoire sont assez semblables. Ils laissent entendre que la PT efficace de ce dispositif s'approche de 0 dB dans une bandes de fréquences de 315 à 800 Hz. La PT était censée augmenter aux fréquences inférieures parce que l'ajout d'orifices de ventilation n'influe pas sur les résultats de mesure. Aux fréquences supérieures, la PT accrue semble se stabiliser vers 10 à 15 dB.

La figure 35 montre des résultats pour l'orifice à tuyau qui n'a été mis à l'essai que dans la pièce B de la SEAO. De nouveau, les résultats s'apparentent à une PT de 0 dB dans une bande de fréquences qui, dans ce cas, varie de 315 Hz à 1250 Hz. Pour cet orifice, les valeurs PT aux fréquences supérieures se stabilisent vers 7 ou 8 dB.

Les deux orifices semblent réagir comme un filtre passe-bande ils permettent le passage d'une certaine bande de fréquences mais atténuent d'autres fréquences. Les effets à basses fréquences de ces orifices sont conformes aux résultats d'études précédentes sur les effets de fissures et de trous sur la transmission du son par des panneaux [8]. Les effets à hautes fréquences peuvent être liés aux propriétés des volets en métal légers de ces dispositifs d'aération. On suppose que les valeurs PT à hautes fréquences sont plus importantes dans le cas du ventilateur d'extraction de la hotte de cuisine parce qu'il comporte deux volets.

L'installation de grands orifices de ventilation muraux influe considérablement sur les réductions du bruit globales mesurées.

L'ajout de l'orifice d'extraction de hotte de cuisine dans la pièce A a changé la réduction du bruit globale de –8,7 dBA. L'addition du tuyau de ventilation dans la pièce B a changé la réduction du bruit globale de –7,7 dBA. Il est clairement inacceptable d'installer des orifices de ventilation sans dispositif insonorisant qui relient directement l'extérieur aux espaces intérieurs. Quand pareils conduits sont nécessaires, ils doivent faire l'objet d'un traitement acoustique, comme de la doublure insonorisante pour conduit, et être installés du côté calme de l'immeuble, loin des sources de bruit d'aéronefs.

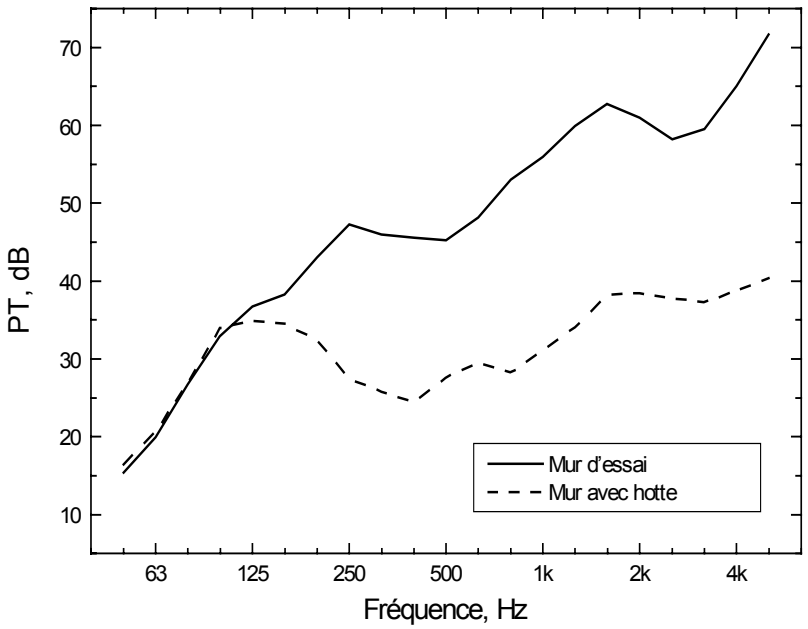


Figure 31. Mesures en laboratoire de la perte de transmission du son (PT) d'un mur d'essai à forte PT avec et sans orifice d'extraction de hotte de cuisine.

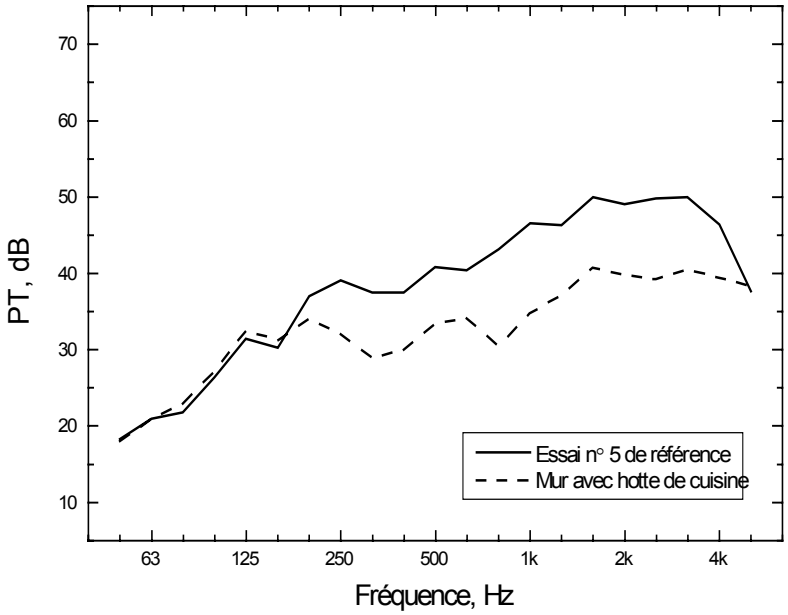


Figure 32. Mesures de la perte de transmission du son (PT) à la SEAO avec ou sans hotte d'extraction murale dans la pièce A.

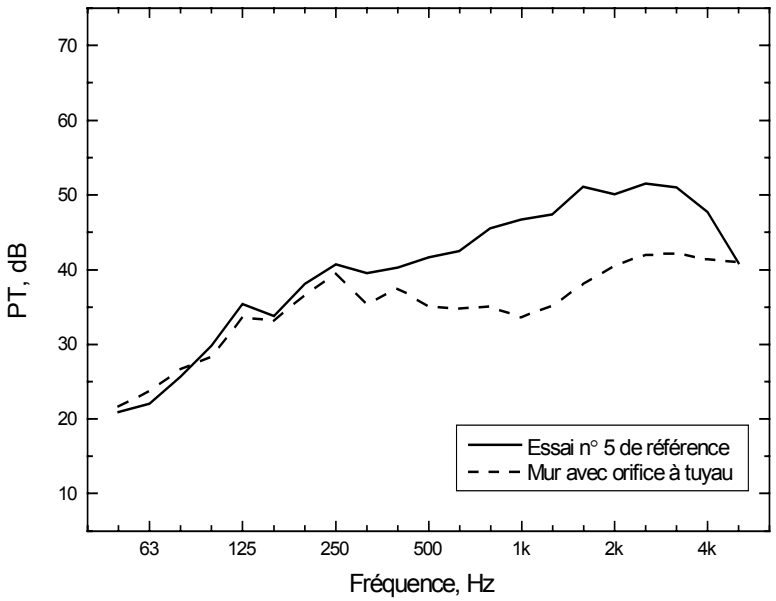


Figure 33. Mesures de la perte de transmission du son (PT) à la SEAO avec et sans orifice d'extraction murale à tuyau de la pièce B.

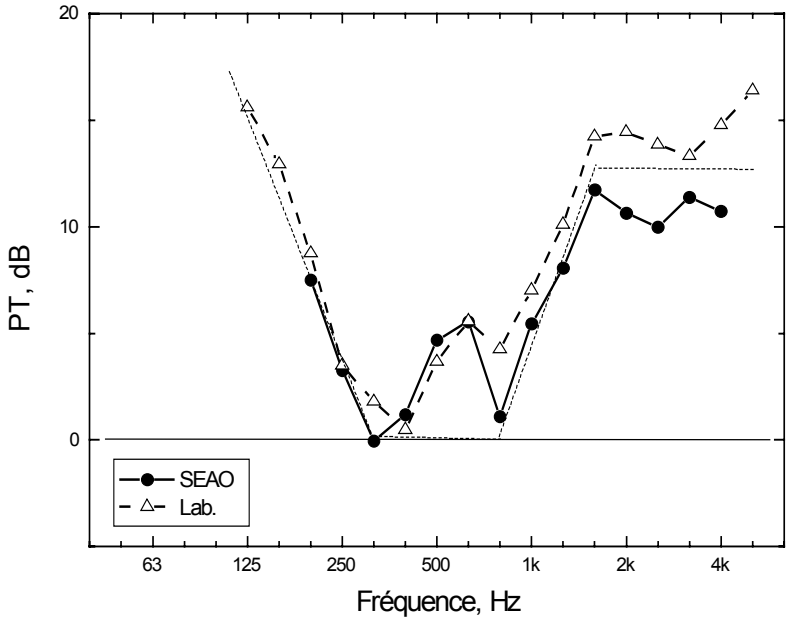


Figure 34. Perte de transmission du son (PT) efficace calculée avec hotte d'extraction murale dans la pièce A et en laboratoire.

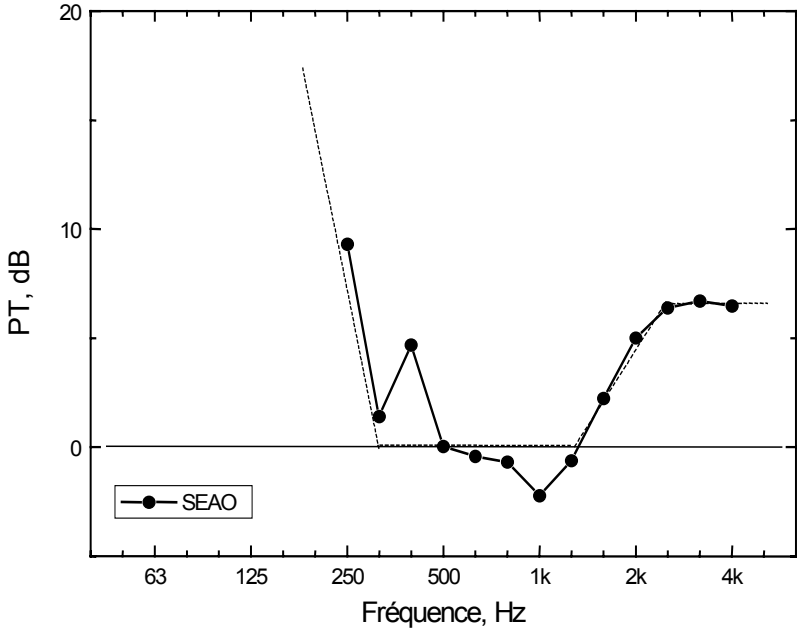


Figure 35. Perte de transmission du son (PT) efficace calculée de l'orifice d'extraction mural à tuyau de la pièce B.

4. Effets de l'angle d'incidence

La présente section comprend les différents essais et analyses qui tiennent compte des effets de l'angle d'incidence du son sur les réductions du bruit obtenues. Il est question des essais réalisés avec un haut-parleur source placé à différentes positions de façon à varier l'angle d'incidence du son, ainsi que des analyses d'une série de passages d'aéronefs en termes d'angle vertical des aéronefs qui survolaient l'habitation d'essai.

4.1 Essais du haut-parleur source

Un haut-parleur source a été placé à différentes positions illustrées dans la figure 36 de façon à varier systématiquement les angles d'incidence horizontal et vertical. Les réductions du bruit ont ensuite été mesurées à partir de la position du microphone de façade en fonction de la moyenne des mesures aux trois positions de microphone dans chaque pièce. La source sonore était un appareil Tracoustics monté sur une tour pneumatique, qui était placé sur la surface gelée du marécage adjacent. La figure 36 indique l'existence de cinq angles verticaux et de trois angles verticaux de la source. Toutefois, les 15 combinaisons n'ont pas été utilisées. Les trois angles verticaux n'ont servi qu'aux positions horizontales 1, 3 et 5. Aux deux autres positions horizontales, seule la source de la position basse a été employée.

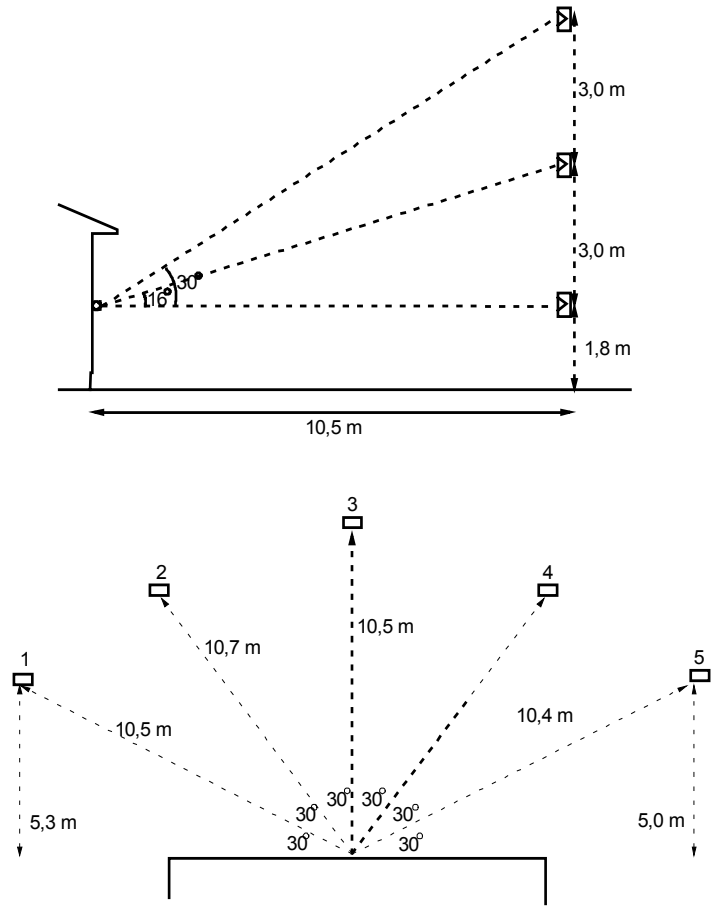


Figure 36. Positions des sources des sons Tracoustics par rapport à la SEAO.

La configuration de la SEAO était identique à celle de l'essai n° 11 dont les résultats sont illustrés dans le tableau II, ce qui comprend les fenêtres des murs avant exposées et des cloisons insonorisantes érigées devant les murs d'extrémité de chaque pièce de l'habitation d'essai.

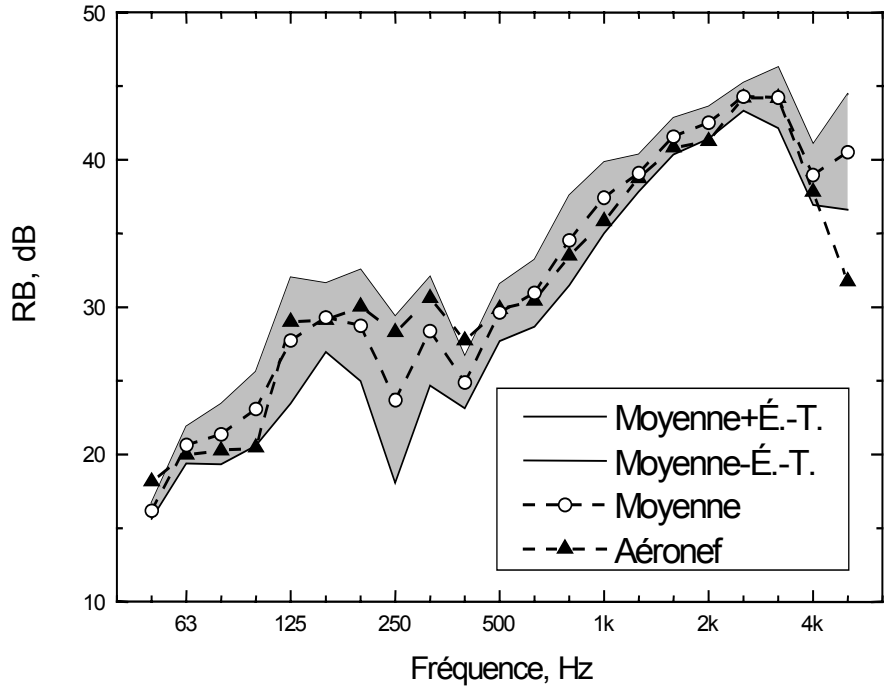


Figure 37. Comparaison des mesures de réduction du bruit par rapport au microphone de façade pour le haut-parleur source et les aéronefs. La moyenne (Moy.) et l'écart-type de ± 1 (É.-T.) des mesures du haut-parleur source sont indiqués dans la zone ombrée.

Les réductions du bruit mesurées à l'aide du microphone de façade révèlent de nombreux changements détaillés selon l'angle d'incidence. Il n'a été possible que d'obtenir des niveaux sonores intérieurs adéquats à l'aide du haut-parleur source placé à une distance maximale de 10,5 m de la façade de la SEAO. Il aurait été préférable de le placer à une distance nettement supérieure de façon à mieux estimer les bruits d'aéronefs distants. En raison de la distance relativement courte de la source, le son produit ne pouvait se rapprocher des ondes planes et différents éléments de la façade recevaient différentes intensités de son incident. Les résultats permettent toujours d'étudier certains effets de l'angle d'incidence.

La figure 37 établit la comparaison des réductions du bruit moyennes mesurées pour toutes les mesures du haut-parleur source et des résultats moyens des aéronefs sources. La zone ombrée comprend l'écart-type de ± 1 par rapport à la moyenne des résultats propres au haut-parleur source. Les résultats moyens des aéronefs concordent plutôt bien avec les résultats moyens du haut-parleur source de sorte que les résultats des aéronefs peuvent être considérés comme représentant une moyenne acceptable d'une vaste gamme d'angles d'incidence. Les différences à 5 kHz sont causées par des niveaux sonores intérieurs inadéquats par rapport aux niveaux sonores ambiants.

Les différences les plus importantes ont été relevées dans la bande de 250 Hz et la zone ombrée de la figure 37 indique que les réductions du bruit mesurées varient le plus selon l'angle d'incidence dans cette bande de fréquences. La fréquence de résonance masse-air-masse du vitrage double des fenêtres se trouve dans cette bande de fréquence. La variation de la réduction

du bruit mesurée à la fréquence de résonance masse-air-masse est approfondie dans la figure 38. Cette dernière compare les réductions moyennes du bruit d'aéronefs et deux groupes de mesures du haut-parleur source. Il s'agit de moyennes des positions basses et hautes du haut-parleur source. Les deux résultats moyens du haut-parleur source assurent une concordance raisonnable avec les résultats des sources de bruit d'aéronefs à la plupart des fréquences. Toutefois, il existe de fortes différences dans la bande de 250 Hz. Lorsque le haut-parleur source était à la position basse et lorsque le son se rapprochait davantage de l'incidence normale, la chute à 250 Hz était supérieure. Lorsque la source est à la position haute, les réductions du bruit mesurées s'apparentent davantage aux résultats des aéronefs. La résonance masse-air-masse semble la plus excitée et la chute à 250 Hz est la plus forte lorsque le son incident se rapproche davantage de l'incidence normale. Comme l'angle vertical moyen des aéronefs était de 55 degrés, les réductions du bruit mesurées étaient plus marquées dans le cas de bruit d'aéronefs à 250 Hz. Ainsi, en général, les réductions du bruit dans les immeubles soumis au bruit d'aéronefs réels sont supérieures aux résultats que les essais en laboratoire laissent entendre à proximité des fréquences de résonance masse-air-masse.

La même relation de la perte de transmission du son par rapport à l'angle d'incidence est également censée être présente à la résonance structurale primaire qui se produit dans le cas de murs à poteaux en bois sans profilé souple. Cette résonance a entraîné une chute marquée à environ 125 Hz dans les mesures en laboratoire, ce qui était beaucoup moins flagrant dans les essais sur le terrain illustrés dans les figures 4, 5 et 6. Cela expliquerait ensuite la différence entre les mesures en laboratoire et sur le terrain à cette fréquence et laisse encore entendre que des réductions du bruit supérieures sont prévues dans les immeubles soumis au bruit d'aéronefs réels à cette fréquence de résonance. Cela est important parce que les mesures en laboratoire de perte de transmission du son permettent de prévoir que cette chute limite la réduction du bruit globale du mur. Malheureusement, les essais touchant le haut-parleur source n'ont pu être réalisés sur les autres configurations d'essai pour confirmer ce fait.

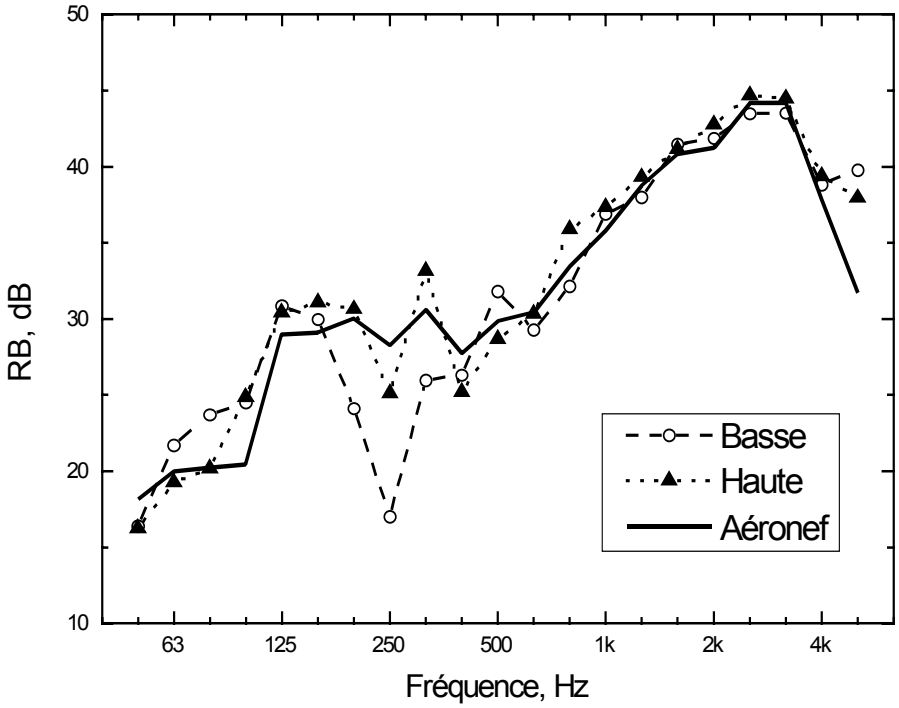


Figure 38. Comparaison des réductions du bruit d'aéronefs mesurées à la moyenne des positions hautes et basses du haut-parleur source.

4.2 Variation des effets de façade

Au moins deux normes de mesure [10, 11] suggèrent qu'il est acceptable d'utiliser un microphone monté sur la façade pour évaluer la réduction du bruit d'une façade d'immeuble par rapport aux bruits extérieurs comme le bruit d'aéronef. Il est habituellement beaucoup plus pratique de monter un microphone sur la façade que de l'installer sur un grand mât. Cette dernière configuration élimine l'influence du son réfléchi et, de là, permet d'estimer l'énergie incidente en champ libre. Dans le cas d'un microphone sur la façade, on suppose généralement que, comme les sons direct et réfléchi sont exactement en phase à la surface réfléchissante de la façade, la double pression entraîne une augmentation de 6 dB des niveaux sonores intérieurs par rapport à une mesure en champ libre. Cette augmentation simple de 6 dB se produit hypothétiquement à toutes les fréquences. La plupart des enregistrements de passages d'aéronefs à la SEAO ont été réalisés à l'aide d'un microphone extérieur en champ libre et d'un microphone monté sur la façade. Par conséquent, de nombreuses données peuvent servir à vérifier si cette hausse de 6 dB se produit réellement.

Il existe une troisième option de mesure des niveaux sonores extérieurs incidents qui consiste à placer le microphone extérieur à deux mètres de la façade. Bien que l'on suppose un effet de double pression de 6 dB, un effet de double pression de 3 dB est prévu à la position de 2 m. Certaines mesures ont aussi été réalisées à l'aide d'un microphone placé à 2 m de la façade.

La figure 39 établit la comparaison des effets de façade moyens d'un certain nombre de passages d'aéronefs. Les différences moyennes entre les résultats du microphone en champ libre et du microphone de façade à la SEAO sont présentées de pair avec des résultats semblables touchant les mesures effectuées à des maisons proches de l'aéroport Pearson (YYZ). (Des mesures d'isolation acoustique ont été réalisées dans plusieurs maisons neuves de la région de Meadowvale Village, à l'ouest de l'aéroport de Toronto.) La troisième courbe de la figure 39 montre les différences entre les mesures moyennes prises par un microphone placé à 2 m du centre de la façade et par un microphone en champ libre. Comme cela a été décrit à la section 2.3, le microphone en champ libre était placé sur un mât à 8,5 m du sol. Le microphone de façade et le microphone installé à 2 m de la façade étaient placés au centre de la façade de l'immeuble, à 1,65 m au-dessus du sol. Quant aux mesures effectuées aux maisons voisines de l'aéroport Pearson, le microphone de façade était à 2,1 m du sol et placé sur la surface extérieure d'une construction en briques.

Aucun des résultats du microphone de façade n'indique d'augmentation de 6 dB sans égard à la fréquence. L'effet de façade moyen (microphone de façade – microphone extérieur) à la SEA est d'environ 6 dB aux fréquences supérieures, mais il est moindre à d'autres fréquences. Aux fréquences très basses, les niveaux du microphone de façade microphone étaient, en moyenne, d'au moins 8 dB inférieurs à la différence prévue de +6 dB. Des résultats semblables d'effet de façade ont été obtenus aux maisons voisines de l'aéroport de Toronto. Les différences aux fréquences moyennes entre les résultats des microphones de façade et en champ libre s'apparentent à celles comprises dans les résultats de la SEAO. Toutefois, aux fréquences supérieures, les différences sont moindres et n'atteignent pas la valeur prévue de +6 dB. De nouveau, aux fréquences très basses, il existe des écarts supérieurs à la différence prévue de +6 dB et la chute de la courbe est décalée davantage à la baisse dans la fréquence que dans les résultats de la SEA. Les écarts mesurés au microphone placé à 2 m de la façade sont aussi inférieurs à la différence prévue de +3 dB. On a relevé d'importants écarts par rapport aux attentes dans les fréquences très basses et les différences mesurées se rapprochent des valeurs prévues de +3 dB aux fréquences supérieures.

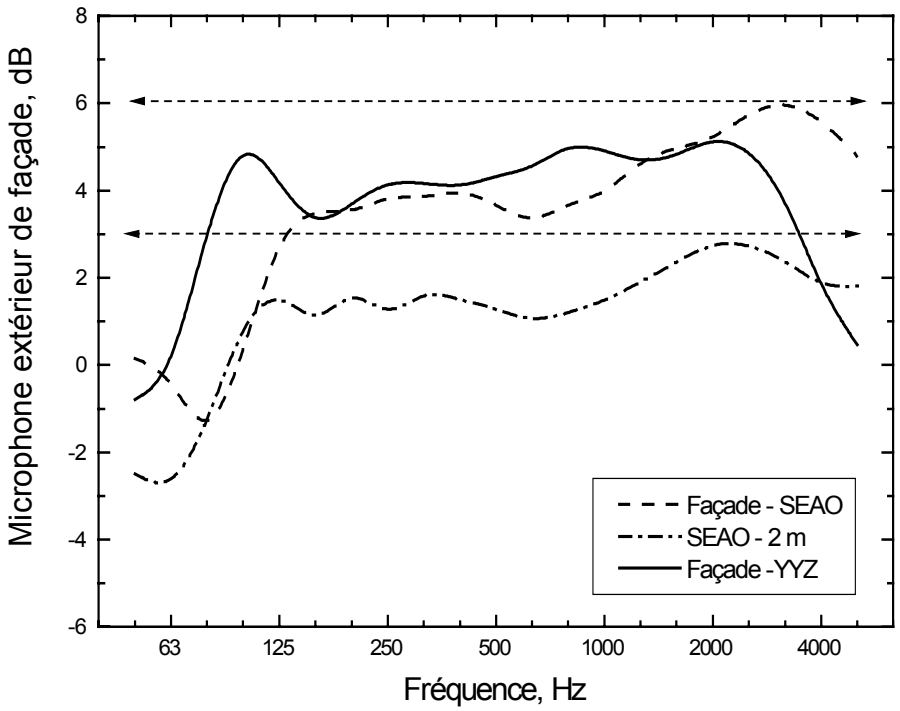


Figure 39. Différences mesurées moyennes entre les microphones de façade ou un microphone se trouvant à 2 m de la façade et les mesures du microphone extérieur en champ libre.

Deux phénomènes différents influent sur les résultats de la figure 39. À basses fréquences, la combinaison des sons direct et réfléchi au sol entraîne des niveaux sonores réduits aux positions proches du sol, y compris les positions du microphone de façade. Cette situation est causée par l'interférence destructive des sons direct et réfléchi au sol qui sont déphasés parce qu'ils ont parcouru une trajectoire légèrement supérieure. Comme les niveaux sonores à basse fréquence au microphone de façade sont réduits, les différences par rapport au microphone en champ libre indiquées dans la figure 39 indiquent une chute prononcée à basses fréquences. La chute est légèrement plus marquée dans les résultats propres aux maisons voisines de l'aéroport de Toronto parce que le microphone de façade était légèrement plus haut par rapport au sol.

Le deuxième phénomène qui influe sur les résultats du microphone de façade est l'effet de l'énergie sonore diffractée des bords des façades à dimensions finies. Il est établi que cet effet varie selon l'angle d'incidence du son. La figure 40 indique que les effets de façade mesurés à la SEAO varient indubitablement selon l'angle d'incidence. Ce graphique a été créé à la suite des effets de façade mesurés pour un seul type d'aéronef de façon à éliminer les différences dues au type d'aéronef. La moyenne des effets de façade mesurés pour 23 survols différents d'aéronefs F28 a été établie par groupes conformément à l'angle vertical des aéronefs au moment du survol de l'habitation d'essai. Il existe d'importantes variations complexes de l'effet de façade qui sont nettement causées par l'angle vertical des aéronefs. Ces résultats portent à croire que, pour les angles verticaux d'incidence moindre, les effets de façade mesurés se rapprochent des augmentations prévues de +6 dB au-delà de la fréquence minimum à cause des réflexions au sol. Ainsi, on peut s'attendre, dans le cas de sources au sol, à ce que l'effet de façade s'approche de la prévision simple de +6 dB. Toutefois, aux angles verticaux types de passages d'aéronefs, l'effet de façade n'équivaut pas à +6 dB et varie considérablement selon la fréquence.

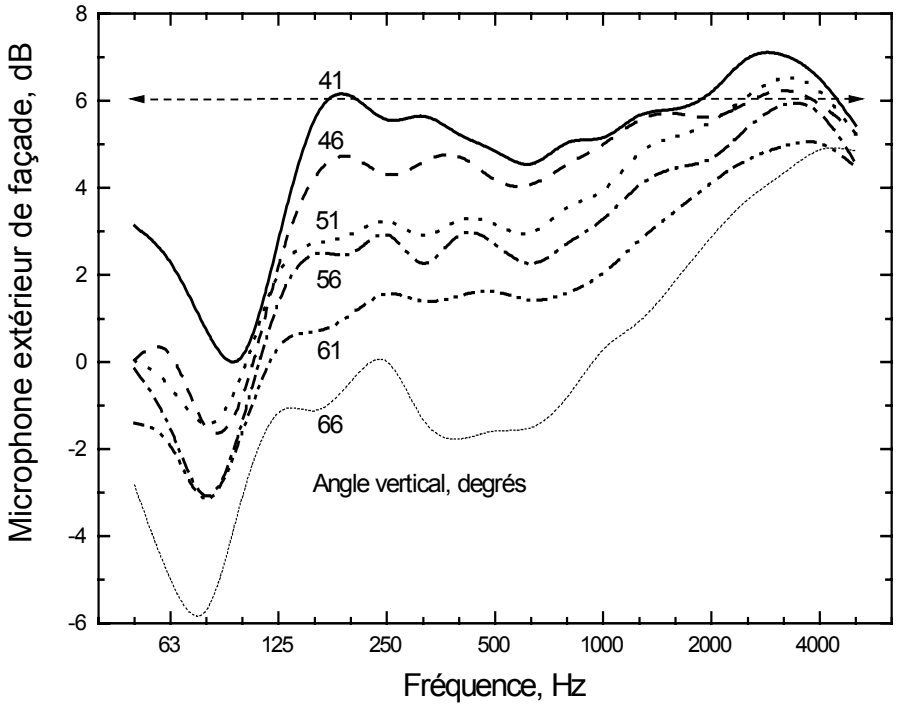


Figure 40. Effet de façade mesuré à la SEAO pour des aéronefs F28 – moyenne calculée pour des groupes d'angles verticaux.

Certains éléments indiquent que les effets de façade mesurés varient légèrement d'un type d'aéronef à l'autre. Cela peut être le fruit des différences de direction des sons émis par chaque type d'aéronef. Cependant, bien qu'il existe des données sur la directionalité horizontale du bruit d'aéronefs (voir annexe II), on ne possède aucun renseignement concret sur la directionalité du bruit d'aéronefs sur le plan vertical perpendiculaire à la longueur des aéronefs.

Pour déterminer si des variations semblables liées à l'angle vertical de ces effets de façade étaient présentes pour les autres types d'aéronefs, une analyse similaire à celle qui est illustrée à la figure 40 a été réalisée pour tous les types d'aéronefs. Les effets de façade moyens obtenus en fonction de l'angle vertical des aéronefs sont représentés graphiquement dans la figure 41. Le tracé des résultats est généralement le même que pour le F28. Ici encore, on a relevé des effets importants de l'angle vertical et non une simple augmentation de +6 dB des niveaux sonores sur la façade. Il y a également des différences précises entre les résultats recueillis pour les aéronefs F28 de la figure 40 et les moyennes de tous les types d'aéronefs de la figure 41. Les détails de la directionalité des différents types d'aéronefs semblent compliquer davantage les effets mesurés.

Les mesures de l'isolation acoustique sur le terrain, qui ont été recueillies à l'aide d'un microphone de façade pour évaluer l'énergie sonore incidente et qui permettent de supposer une augmentation de +6 dB sur la façade, sous-estiment l'énergie sonore incidente et les réductions du bruit calculées. Des erreurs de 6 dB ou plus sont possibles aux fréquences moyennes et des erreurs supérieures sont relevées aux fréquences inférieures.

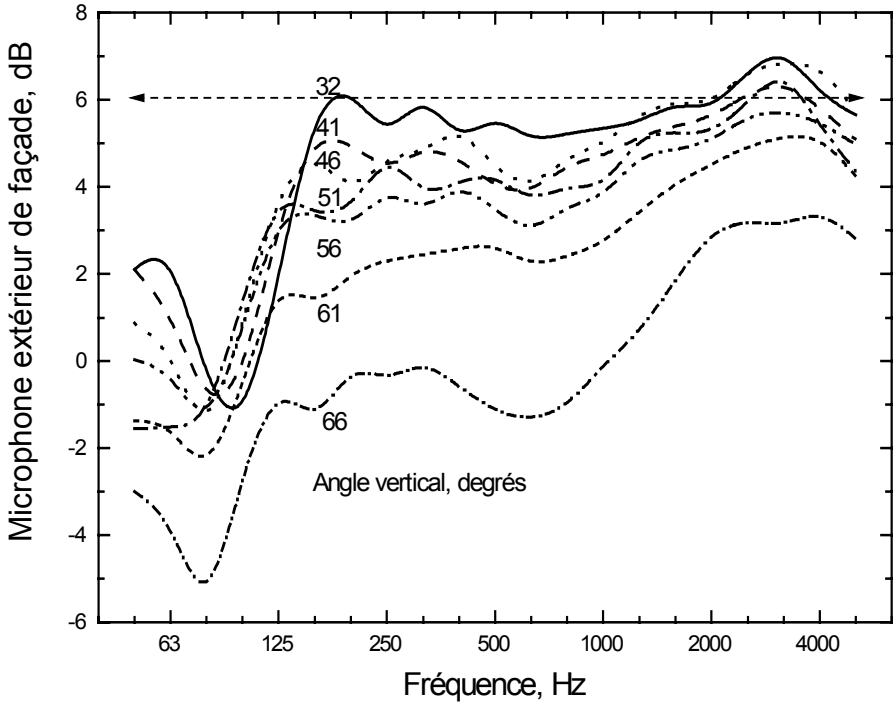


Figure 41. Effet de façade mesuré à la SEAO pour tous les types d'aéronefs – moyenne calculée pour des groupes d'angles.

Pour confirmer l'influence des effets de diffraction et de la variation de ces effets selon l'angle d'incidence, on a réalisé des mesures sur un modèle de façade dans une pièce anéchoïque. Le modèle de façade était à l'échelle ¼ par rapport à la façade réelle de l'habitation d'essai de l'aéroport d'Ottawa. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'une source sonore omnidirectionnelle et d'un microphone placé au centre du modèle de façade et affleurant la surface. La source sonore omnidirectionnelle a été déplacée par rapport au microphone de mesure d'une façon simulant le passage d'un aéronef. Ce mouvement a été répété à plusieurs angles d'incidence verticaux. Les effets de façade ont été obtenus par la soustraction des mesures de façade des mesures enregistrées aux mêmes positions sans façade.

Les effets de façade mesurés sur le modèle sont présentés à la figure 42. Comme il s'agissait d'un modèle à l'échelle ¼, les mesures ont été effectuées au quadruple des fréquences à l'échelle réelle. Toutefois, les valeurs de la figure 42 sont représentées graphiquement en fréquences équivalentes à l'échelle réelle et peuvent donc être comparées directement à celles des deux figures précédentes. Il n'était pas possible d'inclure les résultats aux fréquences supérieures parce que le microphone de mesure ne permettait pas d'enregistrer correctement les hautes fréquences utilisées dans les mesures du modèle.

Les résultats de la figure 42 pour le modèle de façade indiquent de nouveau des variations complexes selon l'angle vertical de la source sonore et tendent à s'approcher de la simple prévision de +6 dB pour l'incidence normale de la source sonore de passage. Le modèle correspond à une situation simplifiée de la façade réelle de l'immeuble. Le modèle ne comporte pas de surface au sol et la chute d'interférence à basses fréquences des résultats des figures 40 et

41 est absente. Les effets de diffraction sont aussi différents parce que le modèle était constitué d'un simple panneau rectangulaire en champ libre sans surfaces adjacentes. La base de la façade de la SEAO touchait le sol et la partie supérieure était partiellement protégée par le surplomb du toit. Par conséquent, on ne pouvait prévoir que les particularités de la figure 42 correspondaient à celles de la figure 40 mais, ici encore, les variations de 6 dBA ou plus par rapport aux prévisions de +6 dBA sont évidentes.

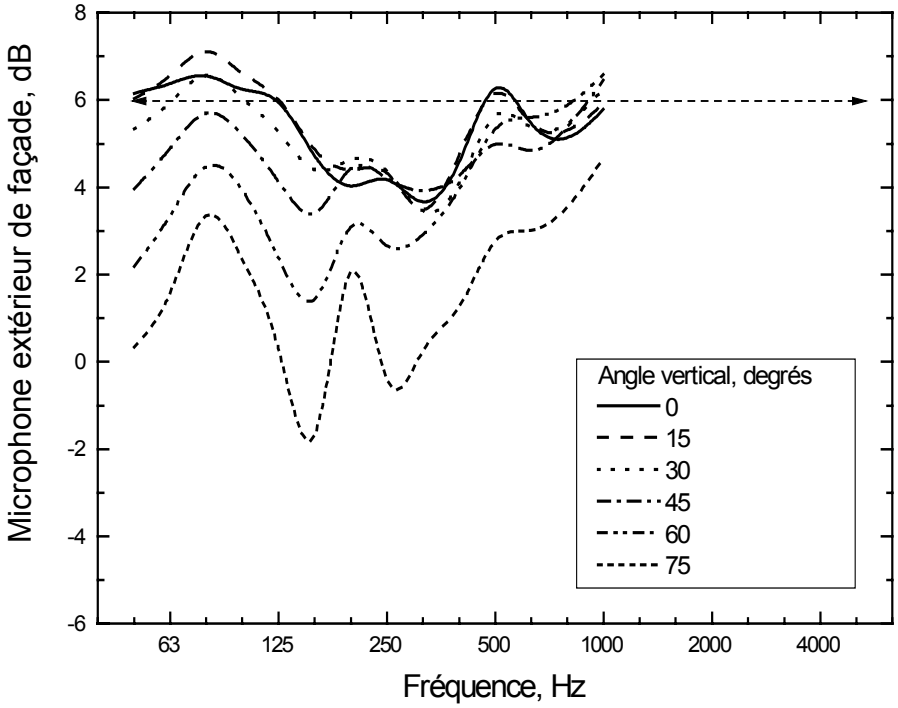


Figure 42. Effet de façade mesuré pour une façade à l'échelle ¼ pour différents angles verticaux. (Tracé par rapport aux fréquences à l'échelle réelle).

Les figures 43 à 48 traitent de la variation de l'effet de façade en fonction de l'angle vertical. Ces graphiques servent à comparer les mesures de groupes d'aéronefs F28 à chacun des angles verticaux aux mesures du modèle de façade. Ils indiquent également la prévision d'un effet de façade variant selon une relation cosinusoïdale simple avec l'angle vertical. C'est-à-dire que l'effet de façade est calculé comme suit :

10 log (COS(angle vertical)) +6 dB (4.1)

Cette formule permet de prévoir une augmentation de 6 dB à une incidence normale et des effets de façade décroissants à mesure que l'angle vertical augmente.

Les résultats des figures 43 à 48 pour les fréquences 63 Hz à 2 000 Hz par intervalle d'un octave indiquent une concordance grossière avec une relation cosinusoïdale simple qui comprend un décalage aux fréquences inférieures. Le décalage à basses fréquences est causé par l'annulation de l'énergie sonore à basses fréquences en raison de l'interférence avec le son réfléchi au sol. Si l'on détermine l'ampleur de ce décalage dans chaque bande de tiers d'octave, on obtient une estimation du spectre de l'effet des réflexions au sol semblable à celui de la figure 10. Les

résultats mesurés laissent aussi entendre que la variation selon l'angle décroît avec l'augmentation de fréquence.

Les différences entre les niveaux sonores incidents d'aéronefs en champ libre et les niveaux incidents mesurés sur la façade varient selon la fréquence, le type d'aéronef et l'angle vertical de l'aéronef.

Ces différences ne s'apparentent à la simple prévision de +6 dB qu'aux angles proches de l'incidence normale et qu'aux fréquences supérieures. De même, les mesures des niveaux sonores incidents à une position située à 2 m de la façade sont probablement touchées par les mêmes facteurs et ne correspondent pas à un simple doublage d'énergie de 3 dB par rapport à l'essai en champ libre. Les mesures en champ libre des niveaux sonores incidents doivent être privilégiées parce qu'elles ne comprennent pas ces effets complexes et qu'il est improbable que des méthodes pratiques les corrigent avec exactitude.

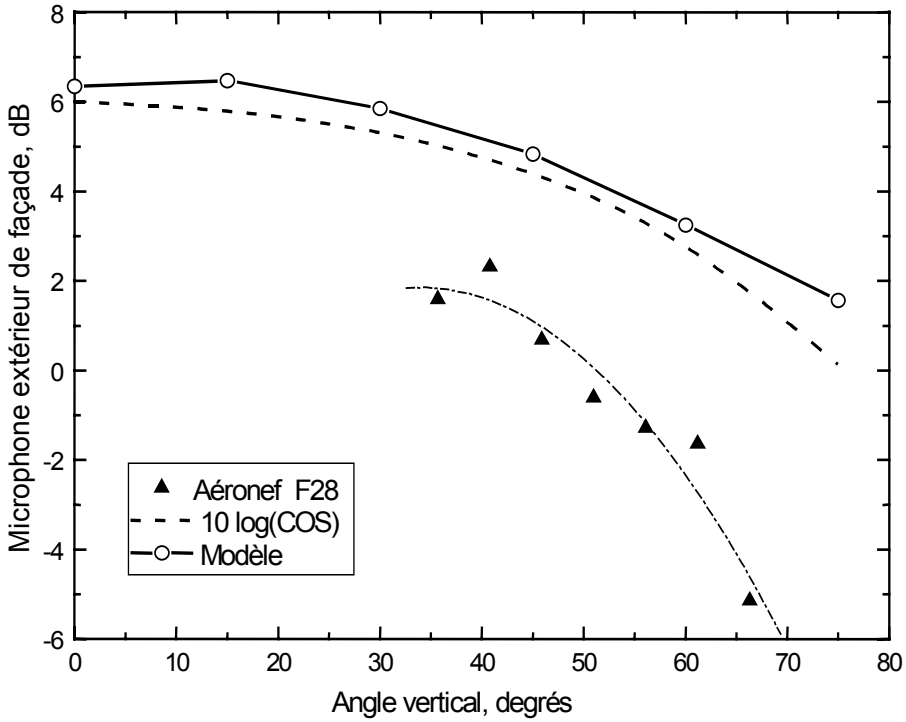


Figure 43. Effet de façade par rapport à l'angle vertical à 63 Hz.

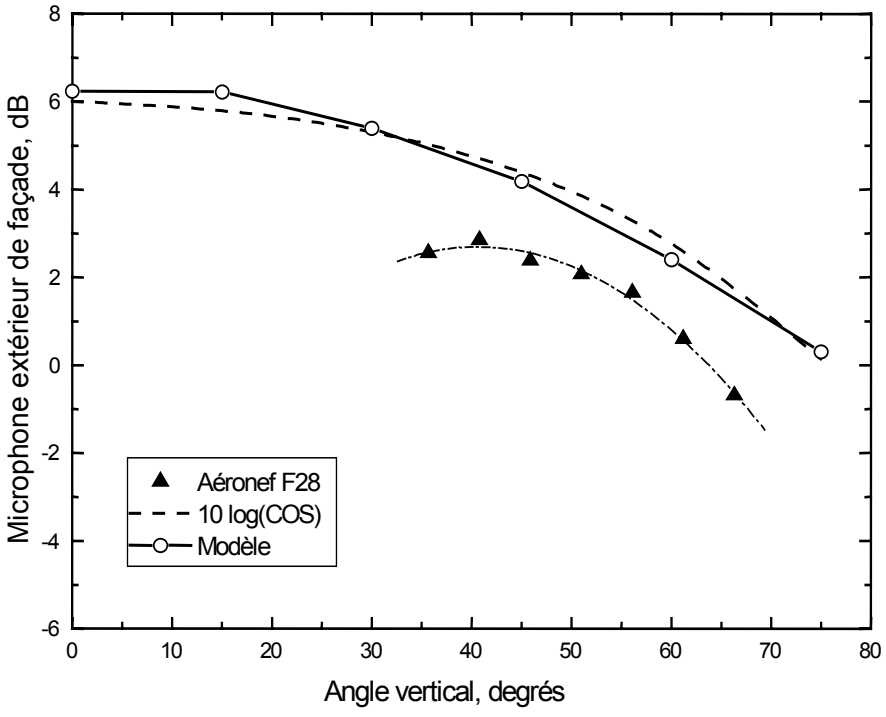


Figure 44. Effet de façade par rapport à l'angle vertical à 125 Hz.

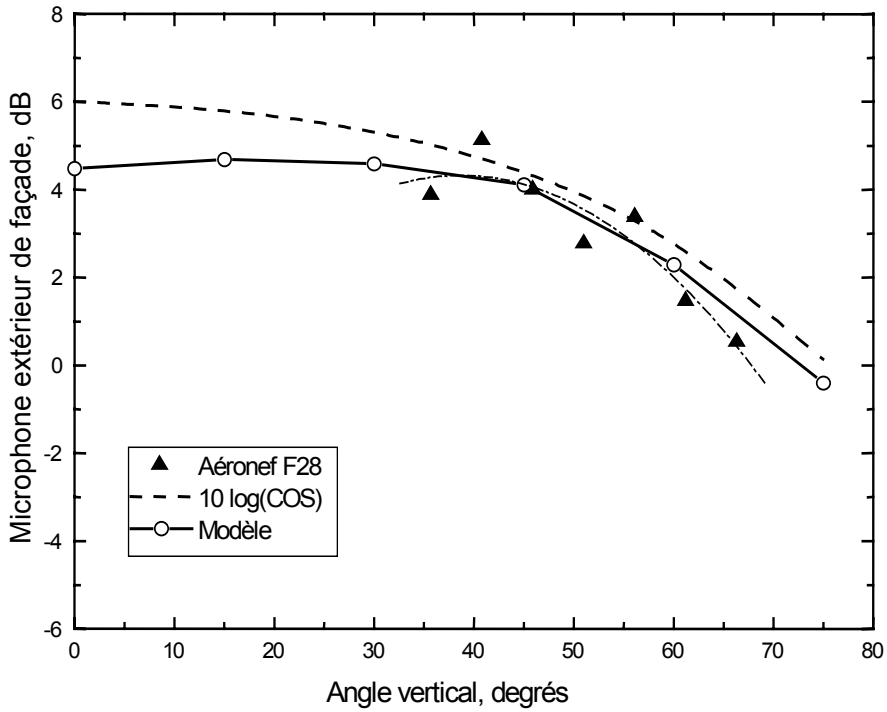


Figure 45. Effet de façade par rapport à l'angle vertical à 250 Hz.

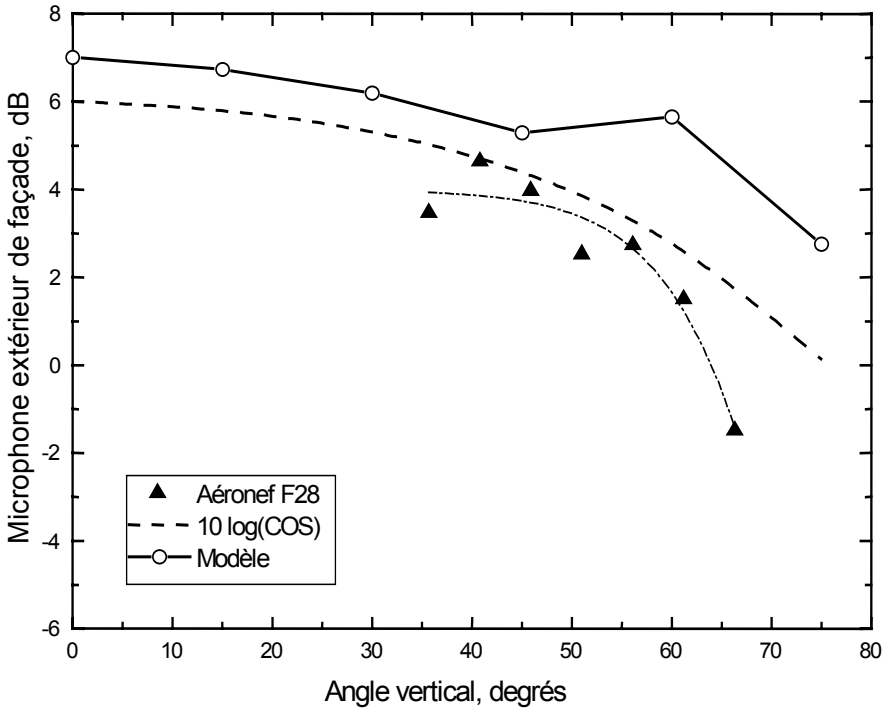


Figure 46. Effet de façade par rapport à l'angle vertical à 500 Hz.

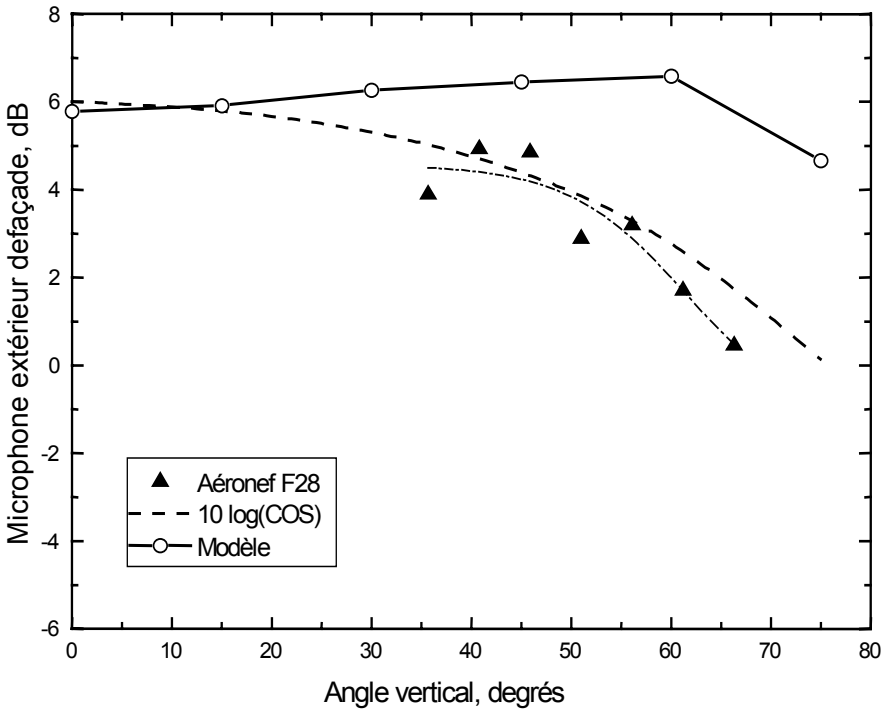


Figure 47. Effet de façade par rapport à l'angle vertical à 1 000 Hz.

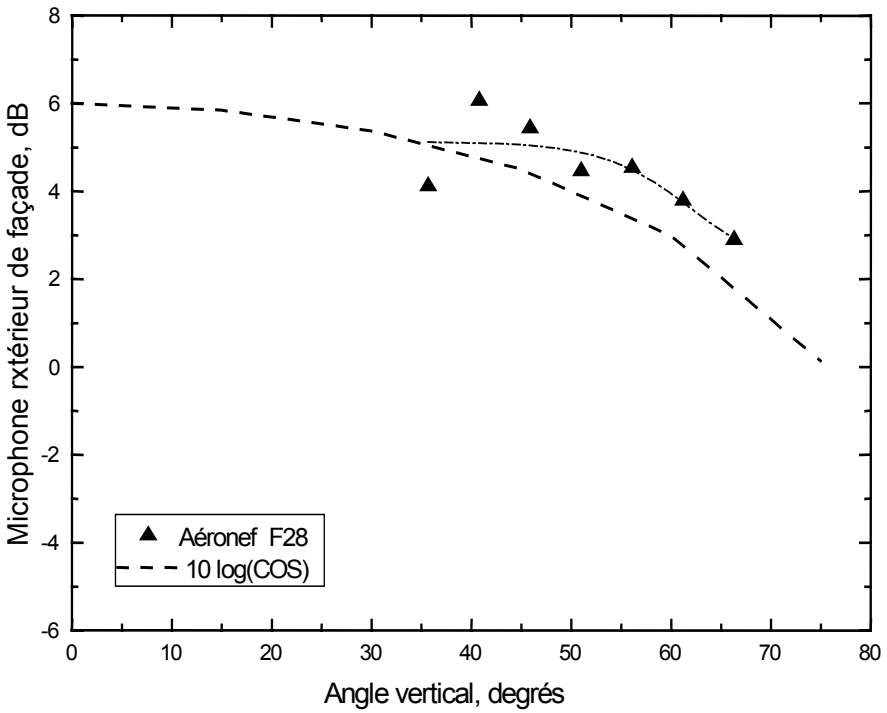


Figure 48. Effet de façade par rapport à l'angle vertical à 2 000 Hz.

4.3 Variation des réductions du bruit

La section précédente traitait des mesures de la variation des niveaux sonores enregistrés sur la façade de l'immeuble. Par comparaison aux mesures en champ libre du bruit incident des aéronefs, les niveaux sonores sur la façade variaient à cause des effets à la fois du son réfléchi au sol et du son diffracté à partir des bords de la façade. Toutefois, ces phénomènes différents n'influent pas tous les deux sur la quantité de son transmis dans l'immeuble. Il est donc important de se pencher directement sur la façon dont les réductions du bruit mesurées varient selon l'angle vertical de l'avion en vol ce dont traite la présente section.

Comme l'équation (2.3) de la section 2.5 l'indique, les réductions mesurées du bruit sont censées varier comme suit : 10 log{COS(θ)}, la valeur θ correspondant à l'angle d'incidence du son. Lors du survol d'aéronefs, l'angle d'incidence horizontal varie selon une vaste gamme d'angles. Cependant, l'angle vertical varie selon une gamme moindre d'angles en raison du changement d'altitude à mesure que l'aéronef monte après le décollage. Comme les niveaux sonores d'aéronefs mesurés équivalent à une intégration dans une vaste gamme d'angles (sur le plan horizontal), il est possible que la moyenne des effets de l'angle d'incidence soit établie. En outre, la variation de l'angle vertical entre les passages d'aéronefs à un endroit particulier varie généralement dans une gamme relativement réduite. Ainsi, les effets observés causés par des angles d'incidence différents sont censés être négligeables, s'ils sont perceptibles.

Les données de quatre essais de construction à la SEAO devaient porter sur les effets possibles de l'angle d'incidence sur les réductions du bruit mesurées. Il s'agissait des essais n° 1, n° 2, n° 10 et n° 11, qui correspondent respectivement à ce qui suit : murs d'extrémité exposés seulement, murs avant exposés seulement, fenêtres d'extrémité exposées seulement et fenêtres avant exposées seulement. (Voir aussi les particularités des essais au tableau II.) Pour chacune de ces configurations de l'habitation d'essai, les réductions du bruit mesurées à partir de passages d'aéronefs distincts ont été représentées graphiquement en fonction de l'angle vertical consigné de l'aéronef au moment de survoler l'habitation d'essai. Les données recueillies dans chaque pièce réceptrice de la SEAO ont fait l'objet de représentations graphiques distinctes, et ce, dans chaque fréquence de bande de tiers d'octave. Ces résultats de mesure ont été comparés à une variation calculée selon l'angle qui comportait le redressement suivant des réductions du bruit précédemment calculées, basées sur les niveaux intégrés en fonction des survols complets.

$$RB_c = RB + 10 \log\{COS(\theta) / COS(60)\}, \text{ dB} \qquad (4.2)$$

C'est-à-dire que les réductions du bruit corrigées (RB_c) ont été redressées à partir de l'hypothèse d'une variation cosinusoïdale selon l'angle vertical. La correction a été normalisée à 60 degrés parce que, à cet angle d'incidence, les résultats sont censés correspondre approximativement aux résultats d'incidence diffuse obtenus lors des essais en laboratoire [8]. Pour ces mesures, la correction maximale n'était que de 1,5 dB.

La figure 49 représente graphiquement les réductions du bruit mesurées dans l'essai de configuration n° 2 dont les murs avant sont soumis au bruit d'aéronefs. Bien que certains éléments indiquent que les réductions du bruit mesurées pourraient augmenter avec l'accroissement de l'angle d'incidence, la dispersion des données est probablement aussi grande que celles des effets prévus. Pour vérifier si les valeurs mesurées indiquaient précisément une variation selon l'angle vertical, les réductions du bruit mesurées ont fait l'objet de corrélation avec les angles verticaux mesurés. Ces corrélations linéaires ont révélé que seulement 17 des 42 séries de résultats de mesures (21 fréquences dans 2 pièces) de la figure 48 étaient liées à l'angle vertical de façon appréciable, même au niveau de signification $p < 0,1$. Ainsi, on ne possède que des éléments peu probants à l'appui de la variation prévue selon l'angle d'incidence vertical.

Les résultats de la figure 50 pour la configuration de l'essai n° 1, ne mettant en présence que les murs d'extrémité exposés, indiquent moins de relations significatives entre les réductions du bruit mesurées et l'angle vertical. Cette situation est partiellement causée par le nombre réduit de passages d'aéronefs. Seulement 12 des 42 séries de résultats de mesure ont indiqué des relations significatives au niveau $p < 0,1$ et 11 d'entre elles présentaient un niveau de signification de $p < 0,05$.

La figure 51 présente les tracés des réductions du bruit mesurées par rapport à l'angle vertical des aéronefs pour la configuration d'essai n° 11 dont seules les fenêtres avant étaient exposées. Des quatre essais pris en compte, les résultats de ce dernier révèlent les variations les plus nettes selon l'angle vertical. Sur les 42 séries de réductions du bruit mesurées, 30 étaient liées à l'angle vertical au niveau de signification $p < 0,1$ et 23 l'étaient au niveau de signification $p < 0,05$.

Les réductions du bruit mesurées sont représentées graphiquement en fonction de l'angle vertical pour la configuration de l'essai n° 10 à la figure 52. Selon cette configuration, les fenêtres d'extrémité étaient exposées au bruit d'aéronefs et les murs avant étaient insonorisés. À peine deux des 43 séries de données mesurées de cette figure étaient liées à l'angle vertical au niveau de signification $p < 0,1$. De nouveau, cet état de fait est, en partie, dû au nombre limité de passages d'aéronefs visés par dans ces comparaisons.

Les essais n° 2 et n° 11, lors desquels le mur ou les fenêtres avant étaient soumis au bruit d'aéronefs, exposés, sont peut-être les cas les plus simples dans lesquels la façade est exposée au passage ou survol complet des aéronefs. Lors de ces essais, il existe certaines preuves selon lesquelles les réductions du bruit mesurées varient en fonction de l'angle d'incidence vertical des survols d'aéronefs. Dans les essais où les murs et les fenêtres d'extrémité sont exposés, peu d'éléments confirment les effets prévus. Comme les effets prévus sont minimes et ne dépassent pas une ampleur de 1 dB, il serait très ardu de confirmer avec précision les effets par rapport aux mesures sur le terrain. Il faudrait une augmentation appréciable du nombre de passages d'aéronefs enregistrés pour chaque configuration de l'habitation d'essai pour pouvoir confirmer avec certitude pareils effets mineurs. Cela ne pourrait être justifié par l'ampleur négligeable de ces effets.

En l'absence de confirmation solide des effets prévus, ces derniers sont basés sur des arguments physiques valables. Par conséquent, les résultats actuels sont interprétés comme n'invalidant pas la variation prévue de la réduction du bruit avec rapport cosinusoïdal de l'angle d'incidence vertical.

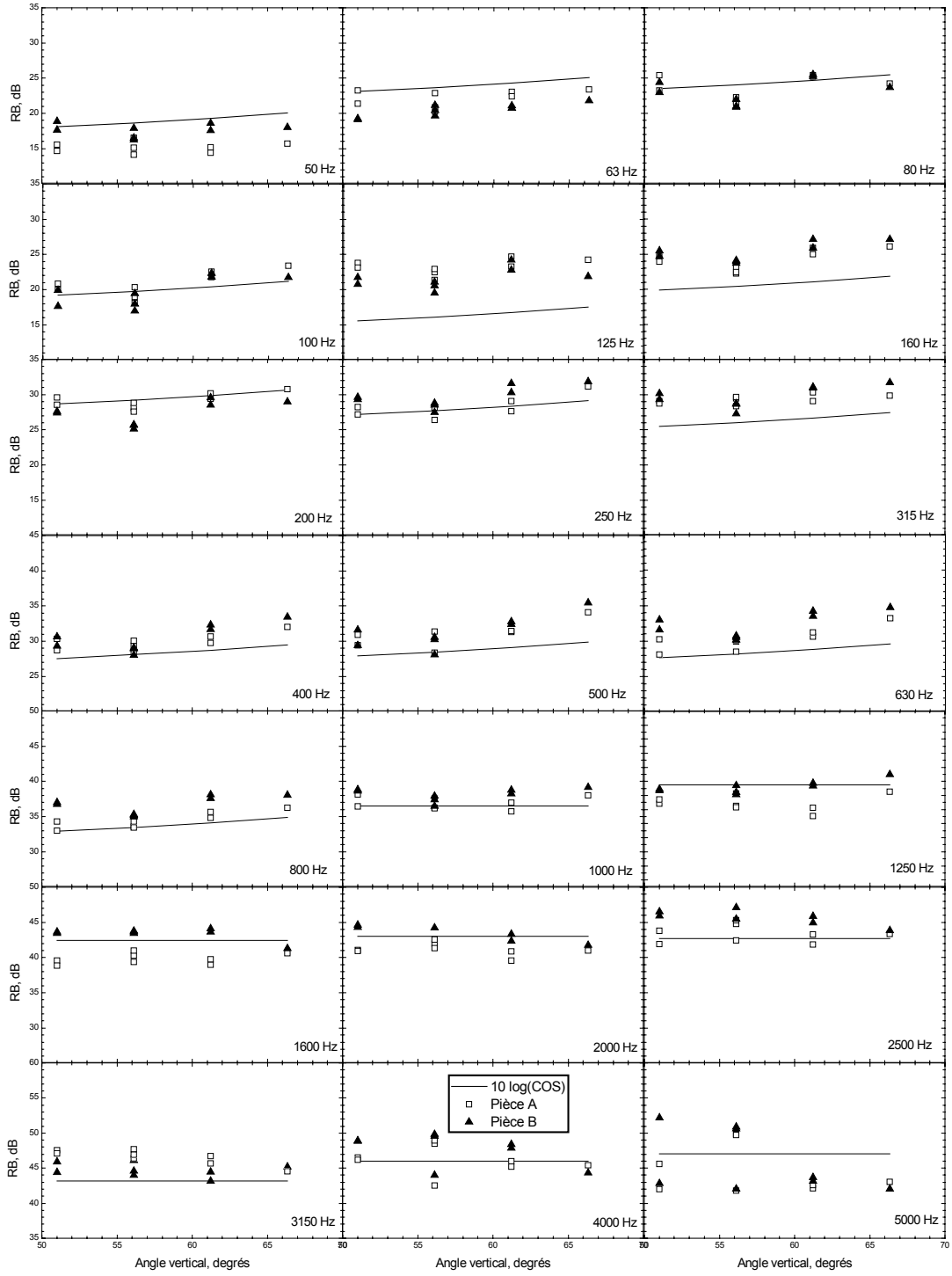


Figure 49. Réductions du bruit (RB) mesurées par rapport à l'angle vertical dans chaque pièce et chaque bande de tiers octave pour les résultats de l'essai n° 2 (murs avant exposés).

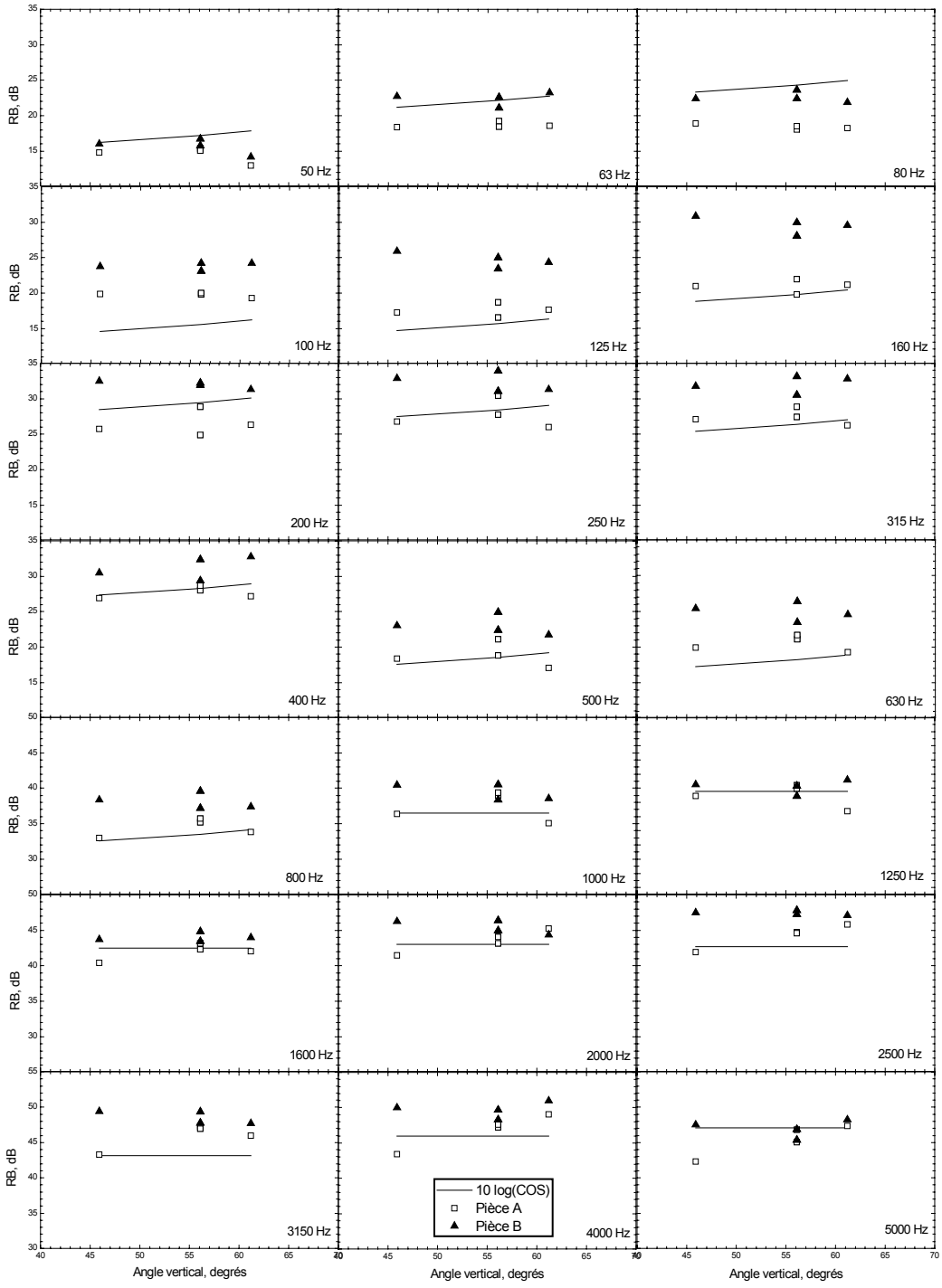


Figure 50. Réductions du bruit (RB) mesurées par rapport à l'angle vertical dans chaque pièce et chaque bande de tiers octave pour les résultats de l'essai n° 1 (murs d'extrexposés)

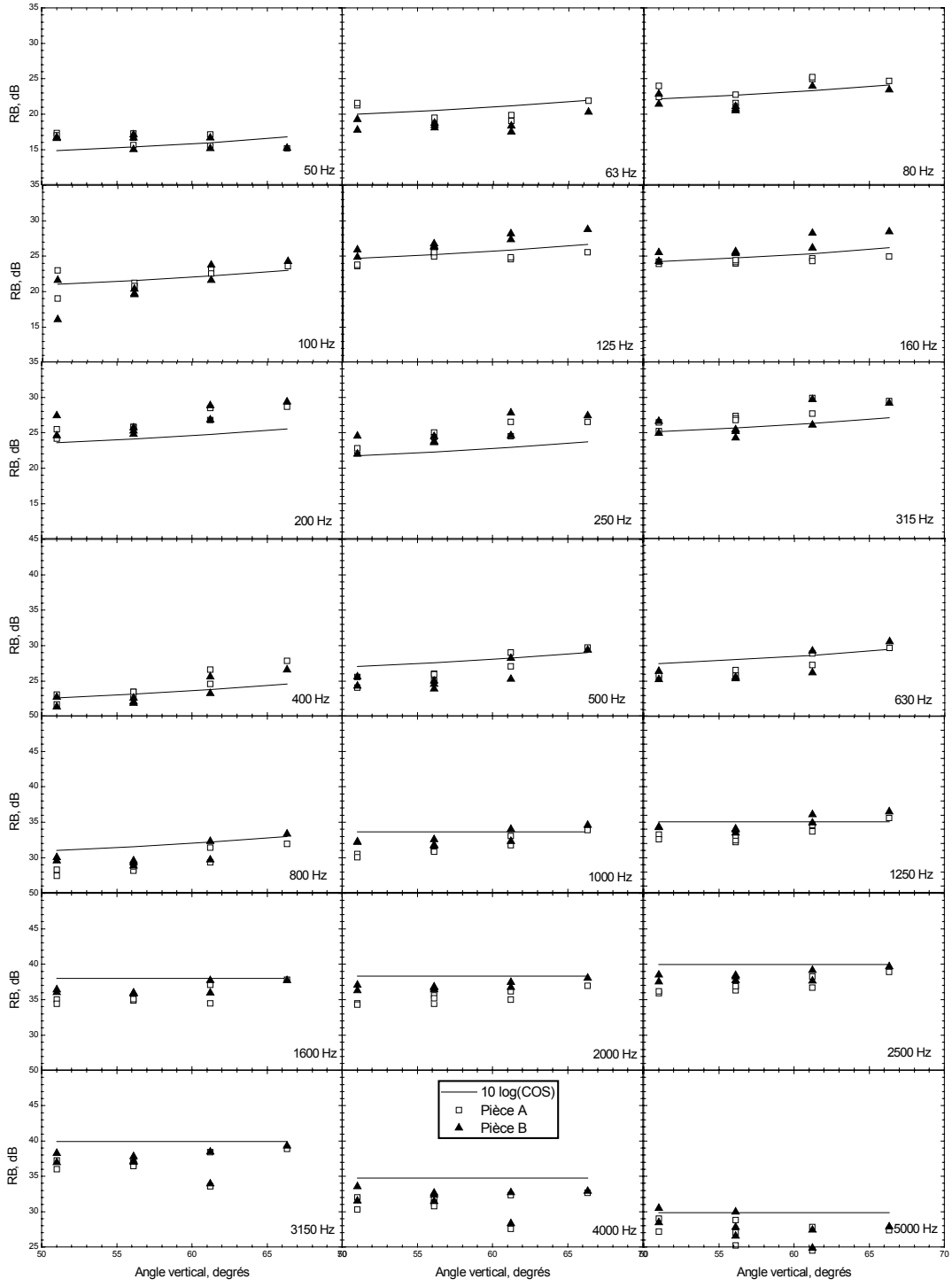


Figure 51. Réductions du bruit (RB) mesurées par rapport à l'angle vertical dans chaque pièce et chaque bande de tiers octave pour les résultats de l'essai n° 11 (fenêtres avant exposées).

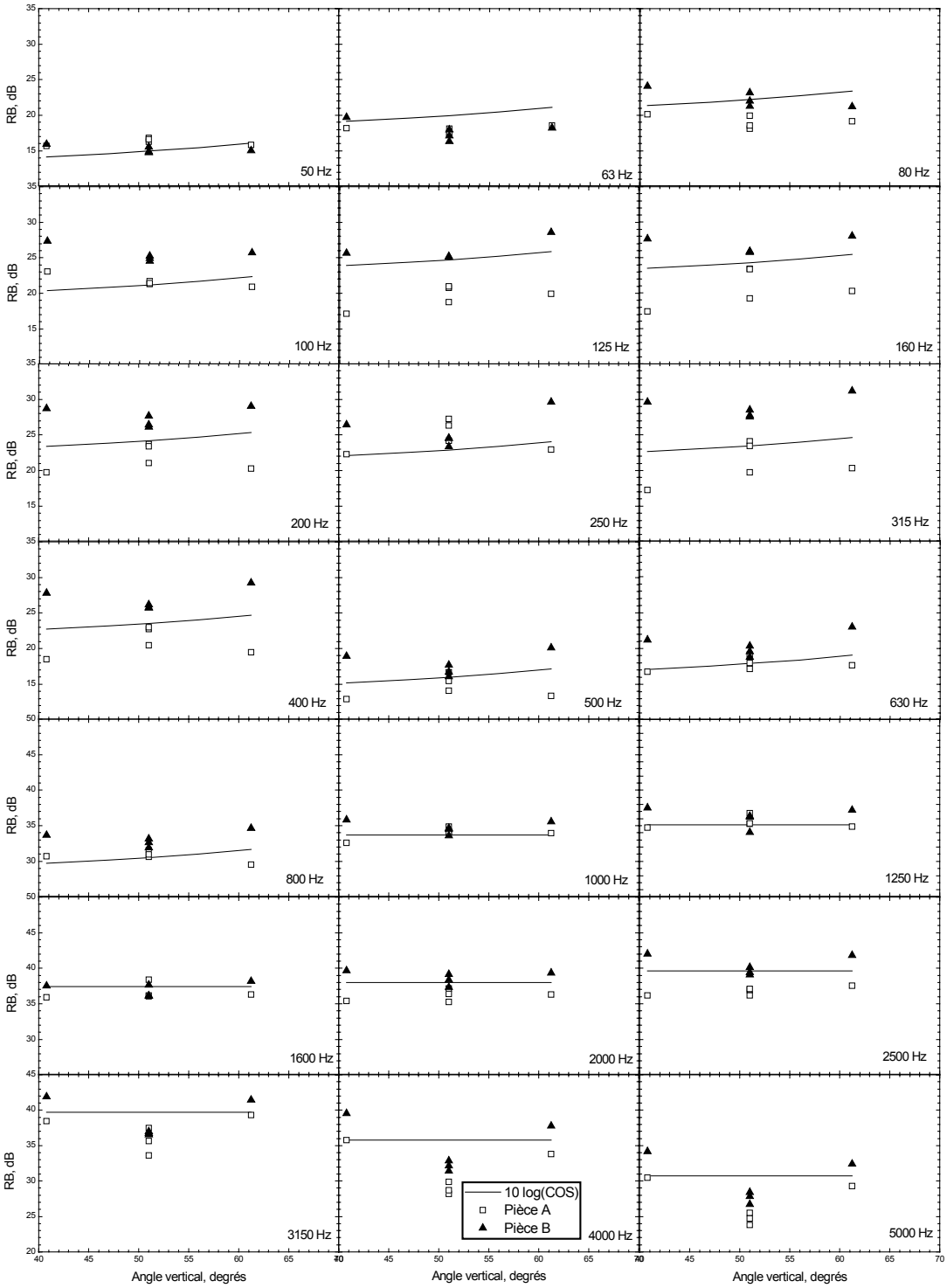


Figure 52. Réductions du bruit (RB) mesurées par rapport à l'angle vertical dans chaque pièce et chaque bande de tiers octave pour les résultats de l'essai n° 10 (fenêtres d'extrémité exposées)

5. Effets de l'orientation de la façade

5.1 Problème

L'angle d'orientation d'une façade d'un immeuble par rapport à la trajectoire de vol d'un aéronef permet de déterminer la fraction d'énergie sonore totale du passage complet d'un aéronef qui est incidente sur cette paroi. L'énergie sonore transmise par chaque façade vers l'intérieur est censée varier selon l'orientation de façade. Les deux pièces de la SEAO étaient orientées de sorte que les murs avant soient parallèles à la trajectoire de vol des aéronefs et ainsi exposés au passage complet des aéronefs de la façon illustrée à la figure 53. Toutefois, les deux murs d'extrémités étaient perpendiculaires à la trajectoire de vol de l'aéronef et n'étaient ainsi soumis qu'à la moitié du passage des aéronefs. On suppose habituellement que l'énergie sonore incidente d'une façade particulière est proportionnelle à l'angle de vue du passage complet. Le mur avant de chaque pièce est exposé au passage complet; la figure 53 illustre que l'angle de vue de ce mur est de 180 degrés pour un survol d'aéronef idéal. Les murs d'extrémité accusent un angle de vue du passage de l'aéronef de 90 degrés. Par conséquent, l'énergie sonore incidente sur les murs d'extrémité est censée représenter la moitié de celle des murs avant ou 3 dB de moins.

Ce principe d'angle de vue simple suppose un passage d'aéronef infiniment long et de niveau. C'est-à-dire que, dans le cas de la façade avant, cela suppose que l'aéronef est visible dans l'angle de vue complet de 180 degrés. Cela n'est pas toujours vrai et n'était pas vrai à la SEAO. Tous les aéronefs décollaient et n'étaient pas visibles à l'habitation d'essai jusqu'à un angle d'incidence d'environ 70 à 80 degrés sur le plan horizontal. En outre, les aéronefs étaient en montée de sorte que le son émis risquait d'être plus affaibli au départ lorsque les aéronefs étaient plus bas. Par conséquent, l'énergie sonore incidente sur les murs d'approche et avant est moindre que prévue.

Plusieurs autres facteurs compliquent davantage la situation. D'abord, les aéronefs constituent des

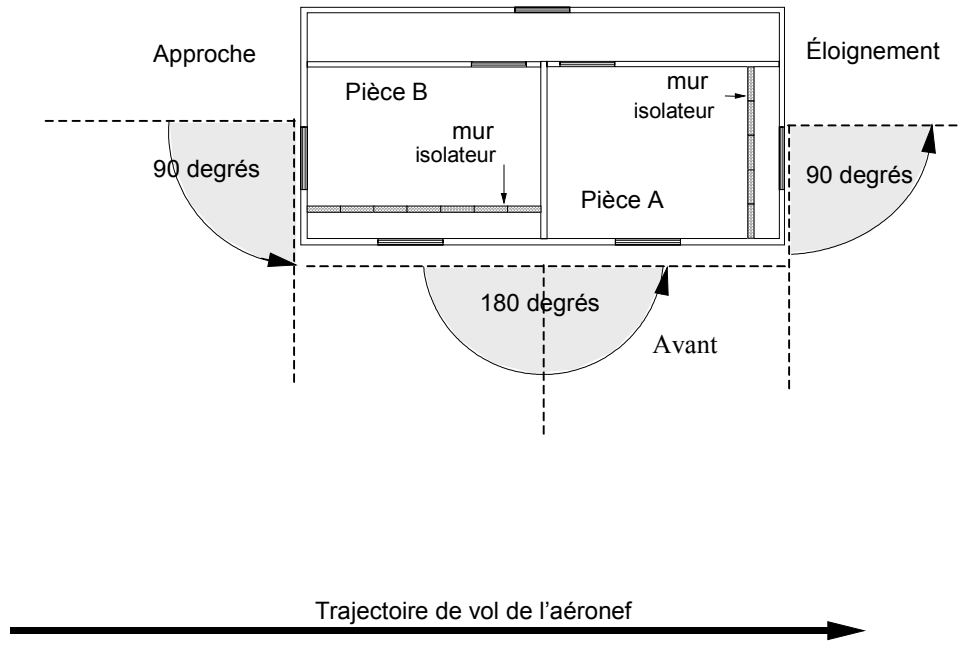


Figure 53. Angle de vue de la trajectoire des aéronefs par rapport aux murs d'approche, d'éloignement et avant.

sources acoustiques omnidirectionnelles. Ils émettent le son plus bruyamment dans certaines directions par rapport aux autres et cette directionalité varie selon la fréquence. Le laboratoire suisse EMPA a déployé d'énormes efforts dans la mesure de cette directionalité des aéronefs sur le plan horizontal [18]. Certaines analyses de ces données sont comprises dans l'annexe II. Simplement, dit, les aéronefs à réaction commerciaux modernes ont tendance à émettre plus d'énergie sonore de l'arrière que de l'avant, ce qui tend à créer des niveaux sonores plus élevés sur le mur d'éloignement que sur le mur d'approche de l'habitation d'essai. Toutefois, il existe d'importantes différences entre les types d'aéronefs.

Comme cela a été indiqué dans la section précédente, la réduction du bruit d'une façade est censée varier selon l'angle d'incidence du son. L'orientation de la façade change les angles d'incidence et limite dans certains cas la plage d'angles. Bien que les variations mesurées en fonction de l'angle vertical et présentées dans la section précédente fussent petites, elles ne représentent pas entièrement les variations qui pourraient se produire dans les cas extrêmes des murs d'extrémité soumis à des niveaux sonores supérieurs qui se rapprochent de l'incidence rasante.

La situation se complique encore du fait que l'angle de vue efficace est supérieur à l'angle de vue géométrique simple en raison des effets de diffraction. Cela signifie que, dans le cas des murs d'extrémité, le son se diffracte ou suit le coin de l'immeuble et augmente l'énergie sonore incidente totale. Cet effet varie considérablement selon la fréquence.

5.2 Méthode proposée et complications

En raison de la complexité des facteurs combinés qui influent sur l'énergie sonore incidente sur chaque façade, une méthode expérimentale a été adoptée pour estimer les effets de l'orientation de façade. Au départ, on comptait utiliser les différences entres les diverses configurations de mesure pour expliquer les effets d'orientation de façade. En outre, une série spéciale de mesures a été réalisée à la SEAO à l'aide de microphones placés sur les surfaces de toutes les façades pertinentes de l'immeuble pour mesurer directement les différences de l'énergie sonore incidente. Enfin, les données EMPA sur la directionalité des aéronefs ont servi à calculer les différences prévues de l'énergie sonore incidente en raison de la directionalité d'un aéronef moyen.

Les différentes configurations de l'habitation d'essai (voir tableau II) devaient permettre de mesurer séparément les niveaux sonores intérieurs à cause de la transmission par chacune des façades. Par exemple, la configuration de l'essai n° 2 comportait des cloisons insonorisantes et un plafond de construction améliorée pour bloquer la transmission du son par toutes les trajectoires (voies) sauf les murs avant. La configuration de l'essai n° 1 était censée ne permettre la transmission du son que par les murs d'extrémité. Les différences des niveaux sonores intérieurs de ces deux essais devaient correspondre aux différences d'orientation de façade. De même, les différences entre les niveaux sonores intérieurs de l'essai n° 11 (fenêtres avant exposées) et de l'essai n° 10 (fenêtres d'extrémité exposées) permettent d'établir une autre estimation de l'effet de l'orientation de façade.

Cette méthode expérimentale a été compromise par l'importance imprévue des voies de transmission indirecte dans l'habitation d'essai. Bien que les effets moyens de ces voies de transmission directe aient été estimés, il semble improbable de pouvoir les déterminer avec une précision suffisante lors de deux cas de mesure distincts pour permettre d'estimer les effets d'orientation de façade d'une ampleur de quelques décibels à partir des différences entre les deux essais.

Pour obtenir une deuxième série de résultats qui permettraient d'estimer les effets d'orientation de façade sur les niveaux sonores intérieurs, des mesures ont été effectuées à l'aide de microphones placés sur les surfaces extérieures de toutes les façades clés de l'habitation d'essai.

Ces mesures étaient censées estimer directement les différences d'énergie sonore incidente sur les murs avant et d'extrémité. Cet expérience a aussi été compromise. L'importance imprévue des réflexions au sol et des effets de façade provoque des erreurs supérieures aux effets d'orientation de façade prévus. Comme cela a été abordé dans la section 3.1.2, les réflexions au sol réduisent l'énergie sonore incidente aux fréquences inférieures. L'ampleur de ces effets a été estimée mais il est impossible de déterminer précisément la façon dont ces effets varient selon l'orientation de façade. Les nouveaux résultats du présent rapport établissent également que les niveaux sonores incidents mesurés à surface de la façade ne constituent pas un indicateur fiable du bruit incident d'aéronefs parce qu'ils varient de façon complexe selon la fréquence et l'angle d'incidence.

La troisième méthode possible consisterait à se servir des données EMPA sur la directionalité des aéronefs pour estimer les différences d'énergie sonore incidente aux différentes façades de l'habitation d'essai. Les données EMPA peuvent être utilisées pour estimer les différences d'énergie sonore émise par les aéronefs mais elles font abstraction des effets des réflexions au sol et des voies de transmission directe dans l'immeuble et, par conséquent, pareils calculs ne correspondent pas exactement aux niveaux sonores intérieurs mesurés.

Comme les effets d'orientation de façade prévus ne représentent que quelques décibels, il est difficile d'obtenir des estimations sûres d'après l'une ou l'autre des méthodes de mesure. Les deux méthodes expérimentales permettent d'établir des estimations des effets d'orientation de façade à partir des différences de mesures soit pour les différents cas ou pour les différentes façades de l'immeuble. Tenter d'estimer les corrections pour les voies de transmission directe ou les effets de façade d'après ces différences entraînerait certainement des erreurs importantes. La section ci-après traite des résultats de ces expériences et propose une solution pratique pour estimer les effets d'orientation de façade.

5.3 Résultats des mesures

Trois types de données servent à illustrer les effets d'orientation de façade. Deux d'entre elles ont été mentionnées précédemment. La troisième série de données a été tirée de mesures d'isolation acoustique dans plusieurs pièces d'un immeuble à l'aéroport international de Vancouver (YVR) [12]. Un côté de l'immeuble était parallèle à la piste et situé pratiquement vis-à-vis du point d'envol des aéronefs au décollage. L'autre façade de l'immeuble était perpendiculaire à la piste. Comme la construction des pièces des deux façades était identique, les différences entre les mesures de réduction du bruit des pièces des deux façades ont servi à estimer les effets d'orientation de façade. Étant donné que les mesures n'ont été effectuées que dans les pièces du deuxième étage de cet immeuble, les effets des réflexions au sol devraient être minimes. Ces différences moyennes sont illustrées dans la figure 54.

Selon un argument sur l'angle de vue simple, toutes ces différences devraient donner environ 3 dB, sans égard à la fréquence. La ligne de régression linéaire la plus pertinente laisse entendre que l'écart moyen passe d'environ 1 dB, à basses fréquences, à 3 dB, à hautes fréquences. Cette hypothèse est acceptable sur le plan matériel parce que les effets de diffraction sont censés réduire l'écart aux fréquences inférieures. Toutefois, il existe une forte dispersion et on pourrait aussi arguer que l'utilisation d'une valeur moyenne simple serait pertinente. L'écart moyen des données de la figure 54 dans toutes les fréquences est de 1,8 dB. L'angle de vue réel des aéronefs sur la façade avant a été estimé à 160 degrés, mais non à 180 degrés à cause du point de départ du décollage. L'effet prévu de l'angle de vue correspond à la formule 10 log{90/160} ou 2,5 dBA plutôt que 3 dB.

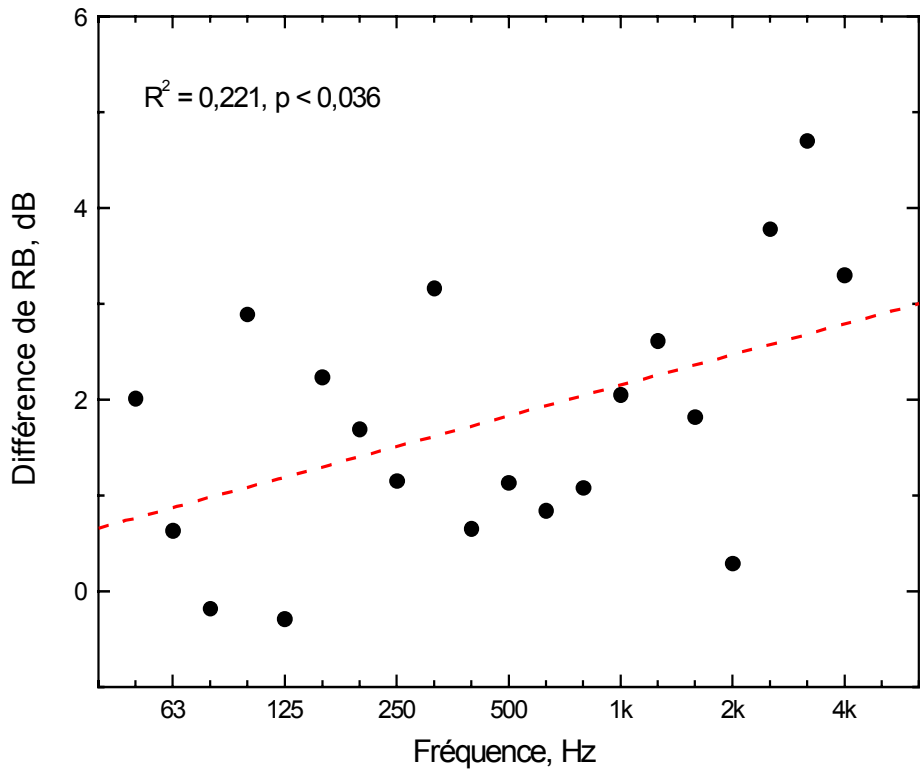


Figure 54. Différences de réduction du bruit de la façade d'éloignement – façade avant à l'immeuble de l'aéroport de Vancouver.

Le deuxième type de données censé porter sur les effets d'orientation de façade a été obtenu à partir de passages d'aéronefs enregistrés à l'aide de microphones placés sur les surfaces de la façade pertinente de la SEAO. Des exemples de ces données sont représentés graphiquement par rapport à la durée et à la fréquence. La figure 55 présente les tracés des niveaux sonores pondérés-A globaux sur chaque façade en fonction de la durée pendant le passage d'un aéronef DC9 à proximité de l'habitation d'essai. Les niveaux au microphone de la façade avant, sur le toit, et au microphone extérieur observent un modèle similaire et culminent environ à la moitié de l'enregistrement. Les niveaux enregistrés sur la façade d'approche atteignent le maximum plus rapidement et baissent pendant la moitié d'éloignement de l'enregistrement du côté droit du graphique. Inversement, les niveaux sur la façade éloignement baissent pendant la moitié d'approche de l'enregistrement, mais ils sont plus élevés qu'aux autres positions de microphones pendant la moitié éloignement de l'enregistrement. Si l'on se penche sur les durées dans chacune des bandes de fréquence, les résultats sont beaucoup complexes que ce qu'indique la figure 55. Il est clair que le spectre du son incident varie dans le temps, tout comme les niveaux sonores globaux.

La figure 56 établit la comparaison des spectres mesurés moyens aux mêmes points de mesure que ceux de la figure 55. Il s'agit des moyennes des résultats qui ont été intégrés dans plusieurs passages d'aéronefs complets.

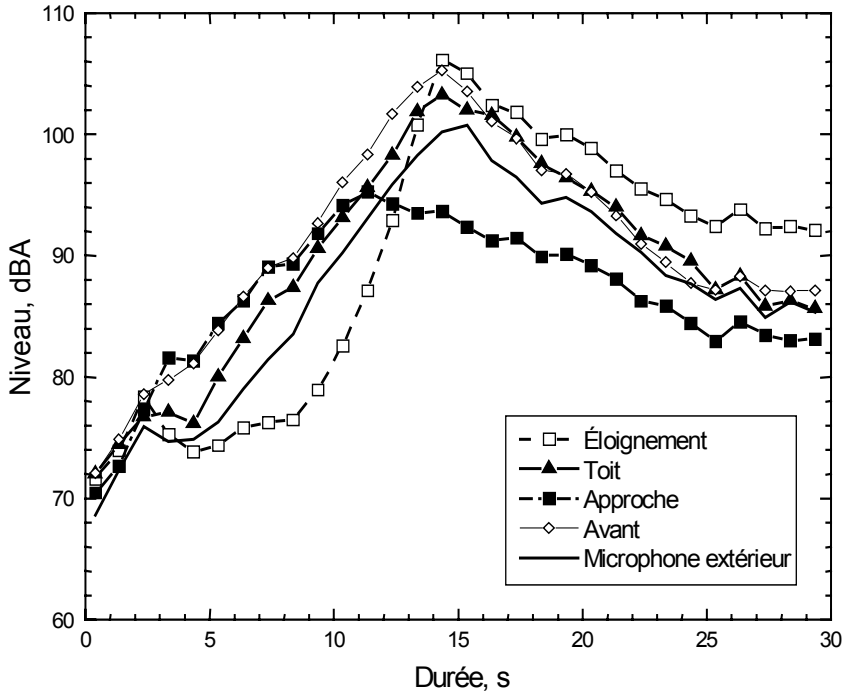


Figure 55. Niveaux sonores pondérés-A enregistrés sur chaque façade et à la position du microphone extérieur par rapport à la durée pendant le survol d'un aéronef DC9.

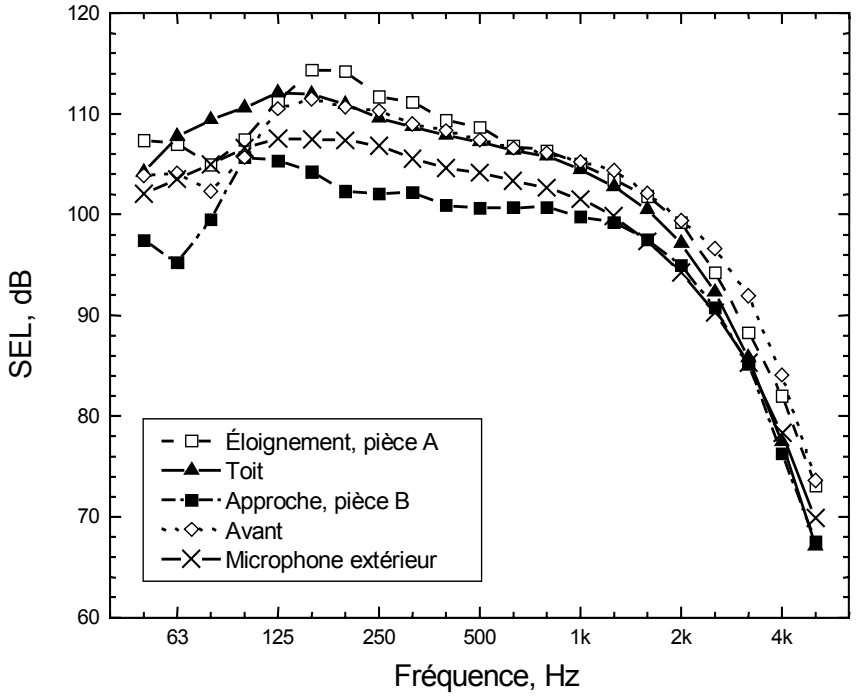


Figure 56. Comparaison des spectres de bruit d'aéronefs de chaque façade et à la position du microphone extérieur – moyenne de plusieurs survols d'aéronefs.

Il existe des écarts importants entre les différents points de mesure et ils ont tendance à être supérieurs aux fréquences moyennes et basses. Les résultats des façades d'approche et d'éloignement présentent les écarts les plus prononcés, c.-à-d., jusqu'à 12 dB. Bien que ces différences soient en partie dues à l'orientation de façade, d'autres effets compliquent davantage les différences. Les effets de diffraction, illustrés dans les figures 40 à 42, sont différents à chaque façade en raison des différents angles d'incidence en partie et des façades de dimensions différentes.

Les spectres mesurés sur le toit et sur le mur avant sont très semblables aux fréquences moyennes. Cela peut indiquer qu'il existe des plages similaires d'angles d'incidence pour ces deux surfaces et, par conséquent, les niveaux incidents intégrés à un passage complet sont semblables. Il y a des différences aux fréquences inférieures et, ici encore, les niveaux sonores sur la façade avant sont d'environ 8 dB inférieurs à ceux du toit à 80 Hz. Voilà une preuve supplémentaire que le son réfléchi au sol entraîne des niveaux réduits à basses fréquences sur la façade avant. Cet effet n'est pas censé être capté par des récepteurs placés en hauteur, comme sur le toit. Les résultats moyens sur les façades d'approche et d'éloignement de la figure 56 présentent les différences les plus grandes. Les niveaux sur la façade éloignement sont supérieurs à ceux de la façade avant même si la façade d'éloignement n'est exposée que pendant une moitié du passage complet de l'aéronef. Comme les façades d'approche et d'éloignement sont situées symétriquement par rapport à la trajectoire de vol, les différences entre les mesures réalisées à ces deux façades sont, en grande partie, causées par la directionalité des aéronefs. (C'est-à-dire que les niveaux sonores tendent à être supérieurs à l'arrière de l'aéronef par rapport à l'avant.)

Le troisième type de résultats de mesure a été tiré des écarts des niveaux sonores intérieurs établis dans les différentes configurations de l'habitation d'essai. Les niveaux sonores intérieurs ont été calculés par l'emploi du spectre de source standard de bruit d'aéronefs et l'ajout de la réduction du bruit mesuré. Ainsi, les niveaux sonores intérieurs des différentes configurations de la SEAO peuvent être comparés. Les différences des niveaux intérieurs entre l'essai n° 2 (murs avant exposés) et l'essai n° 1 (murs d'extrémité exposés) peuvent servir à examiner les effets de ces deux orientations de façade différentes. Il va de soi que cela suppose que les autres écarts entre les deux essais sont minimes. L'étude des différences distinctes de chaque pièce de la SEAO permet de considérer respectivement les différences propres aux façades d'approche et d'éloignement. En outre, les mêmes comparaisons peuvent être faites pour les différences entre les configurations de l'essai n° 11 (fenêtres avant exposées) et de l'essai n° 10 (fenêtres d'extrémité exposées) de l'habitation d'essai.

La figure 57 compare ces différences estimées des niveaux sonores intérieurs normalisés dans le cas du côté mur d'éloignement de l'habitation d'essai (pièce A) à différents autres résultats. Ceux-ci comprennent la différence de 3 dB prévue d'après les arguments sur l'angle de vue simple et la meilleure ligne de concordance avec les données de Vancouver (YVR) de la figure 54. La figure illustre aussi la différence prévue d'énergie incidente par rapport aux données EMPA sur la directionalité des aéronefs. La directionalité moyenne des types d'aéronefs mesurée à la SEAO est calculée à l'annexe II. Par la combinaison de ces valeurs de directionalité moyenne et des variations prévues selon la distance, l'énergie incidente prévue dans les moitiés d'approche et d'éloignement du passage a été comparée aux résultats du passage complet. (Voir aussi figure AII-2, annexe II.) Cette courbe de différence tirée des données EMPA ne comprend aucun effet supplémentaire des réflexions au sol et de la diffraction de façade.

La concordance est suffisante entre ces différentes courbes d'écart. Les écarts tirés des essais sur les murs et les fenêtres concordent le plus et les niveaux tendent à passer grossièrement à près de +3 dB aux fréquences supérieures. Les résultats de Vancouver [12] concordent approximativement avec les différences de mesure observées à la SEAO, sauf dans le cas des

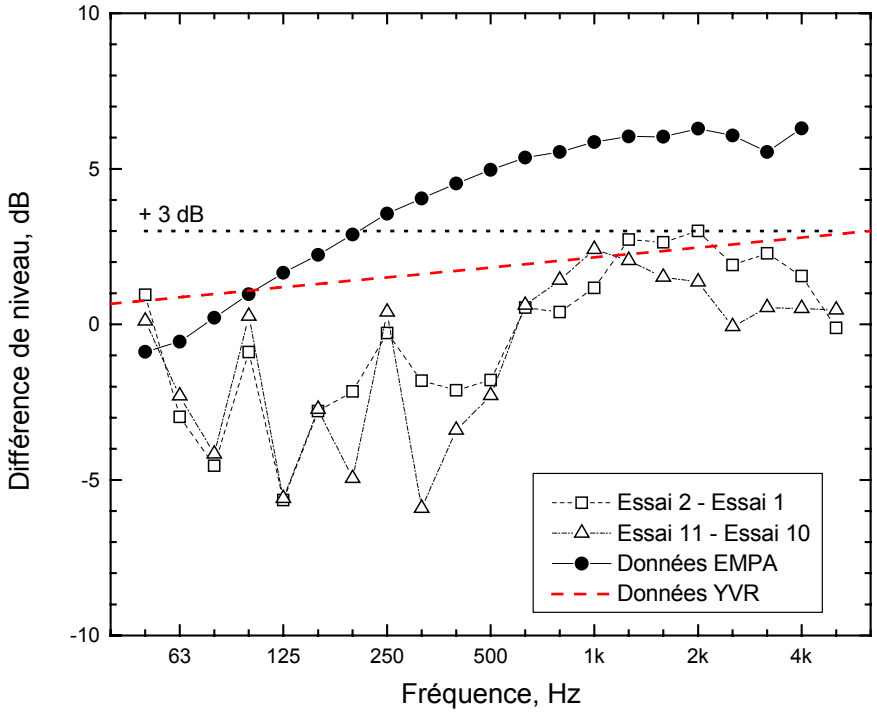


Figure 57. Différences calculées des niveaux sonores intérieurs normalisés pour démontrer les écarts entre les essais sur les façades avant et d'éloignement.

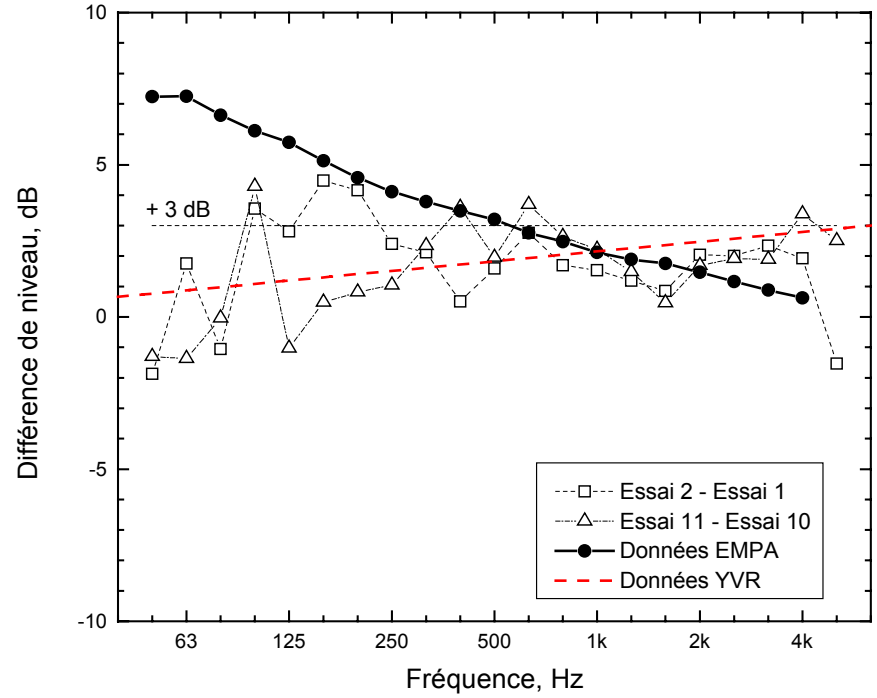


Figure 58. Différences calculées des niveaux sonores intérieurs normalisés pour démontrer les écarts entre les essais sur les façades avant et d'approche.

différences aux fréquences inférieures qui n'étaient présentes qu'à la SEAO et qui étaient probablement et surtout causées par les effets de réflexion au sol. (Les effets de réflexion au sol n'étaient pas présents à l'immeuble de l'aéroport de Vancouver parce que les mesures ne visaient que les pièces du deuxième étage.). Les écarts tirés des données EMPA laissent entendre des différences supérieures aux fréquences supérieures. Cela peut indiquer que la directionalité moyenne des aéronefs calculée à l'annexe II n'est pas représentative des aéronefs enregistrés à la SEAO. Par exemple, les enregistrements effectués à la SEAO portaient sur de nombreux aéronefs A319 et A320 dont le bruit est plus omnidirectionnel que celui de la plupart des vieux types d'aéronefs conformément aux données EMPA.

La figure 58 présente des comparaisons similaires des résultats de la façade d'approche et de la façade avant. De nouveau, ce tracé comprend la valeur +3 dB prévue dans les arguments sur l'angle de vue simple, ainsi que la meilleure ligne de concordance avec les données de Vancouver (YVR). Pour ces comparaisons, les différences grossières entre les essais sur le mur avant exposé et le mur d'approche exposé (essai 2 – essai n° 1) sont de 0 à 3 dB à la plupart des fréquences et correspondent plus ou moins à la meilleure ligne de concordance de Vancouver. Cependant, les différences entre les essais visant les fenêtres du mur avant et celles du mur d'approche (essai n° 11- essai n° 10) concordent mal avec les données sur les écarts des murs ou les prévisions. De nouveau, les prévisions tirées de la directionalité moyenne des aéronefs concordent mal avec les différents écarts des mesures.

Comme cela a été mentionné précédemment, plusieurs autres facteurs influent davantage sur les différentes mesures devant servir à estimer les effets de l'orientation de façade que l'orientation de la façade elle-même. Aucun des résultats des expériences n'offre de preuve vraiment convaincante qui permette de définir précisément les effets de l'orientation de la façade sur la réduction du bruit obtenue. La meilleure ligne de régression adaptée aux résultats de Vancouver donne une estimation grossière mais acceptable de l'effet prévu de l'orientation de façade et elle est basée sur des mesures fiables qui n'ont pas été altérées par les effets de réflexion au sol ni par les voies de transmission indirecte de l'immeuble. (Le bâtiment comportait des panneaux extérieurs en béton et les fenêtres offraient nettement la trajectoire dominante de transmission du son.) La ligne de régression la plus pertinente YVR concorde grossièrement avec trois des quatre séries de différences de mesures recueillies à la SEAO, selon les figures 57 et 58, sauf lorsque les interférences des basses fréquences compliquaient les résultats. Ainsi, bien que les détails soient vagues, l'emploi des données de Vancouver constitue une base raisonnable et conservatrice pour l'estimation des effets d'orientation de façade.

6. Spectres de source des aéronefs

Pour estimer les niveaux sonores intérieurs dans des immeubles soumis au bruit d'aéronefs, il faut déterminer les formes de spectre représentatives des différents types de bruits d'aéronefs. Elles correspondent à l'énergie sonore incidente dont la moyenne a été établie sur des passages complets d'aéronefs et dans des conditions de champ libre (c.-à-d., exclusion des surfaces réfléchissantes). Les mesures en champ libre du bruit d'aéronefs ont été réalisées à la SEAO, ainsi qu'à proximité des aéroports de Toronto et de Vancouver au moyen d'un microphone monté sur mât à 8,5 m au-dessus du sol et à l'écart des autres surfaces réfléchissantes. Ces données servent à établir des formes de spectre de bruits d'aéronefs pertinentes et représentatives des types d'aéronefs modernes. Comme aucune mesure n'a été effectuée pour des hélicoptères, une forme de spectre de bruit d'hélicoptère a été tirée des données de la FAA (États-Unis) [13].

6.1 Spectres moyens mesurés

La moyenne des enregistrements de tous les passages d'aéronefs captés à l'aide du microphone extérieur à la SEAO a été établie par type d'aéronefs. Ces spectres SEL extérieurs moyens de neuf modèles différents d'aéronefs à réaction sont représentés graphiquement dans la figure 59. La plupart des appareils étaient des biréacteurs commerciaux. Les spectres des aéronefs les plus vieux, F28, DC9 et B737, de la figure 59 s'apparentent et serviront à créer un spectre moyen des types plus anciens qui seront appelés aéronefs du Chapitre 2 de l'OACI. Les aéronefs plus silencieux, F100, A319, A320 et BA146, sont, pour la plupart, des appareils de construction récente et ils sont réunis dans un deuxième groupe de spectres similaires. Ce second groupe servira à créer un deuxième spectre moyen dit du Chapitre 3. Les gros aéronefs, B767, bien qu'ils soient du Chapitre 3, plus récents, sont plus bruyants que les aéronefs du Chapitre 3. Enfin, les aéronefs à réaction régionaux CRJ sont plus silencieux que tous les autres modèles d'aéronefs visés par le graphique.

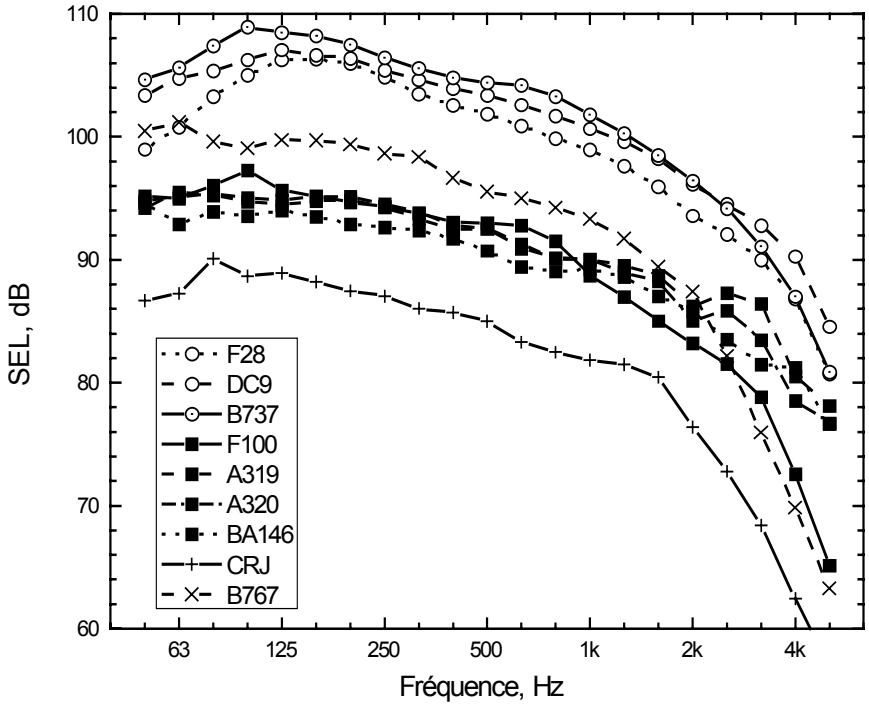


Figure 59. Spectres moyens extérieurs des aéronefs par modèle d'appareils au décollage mesurés à la SEAO.

La figure 60 présente les spectres de source moyens calculés pour les différents groupes d'aéronefs. Il s'agit des moyennes établies pour les petits aéronefs du Chapitre 2 et du Chapitre 3 de la figure 59. On présente aussi la moyenne des aéronefs à hélice, c.-à-d. principalement des appareils Dash 8. Le spectre moyen du Chapitre 3 indique que ces aéronefs sont beaucoup plus silencieux que les aéronefs du Chapitre 2 et que la forme de spectre est plus plate. Ce qui signifie que, par comparaison avec les fréquences moyennes, les niveaux aux fréquences très basses et très hautes sont relativement supérieurs dans le cas des aéronefs du Chapitre 3. Malgré que les niveaux sonores intérieurs produits par les aéronefs du Chapitre 3 soient inférieurs parce que ces appareils sont généralement moins bruyants, la forme de spectre laisse entendre qu'il est encore plus important d'assurer une isolation acoustique adéquate à basse fréquence. Les aéronefs à hélice sont plus silencieux que les avions à réaction à la majorité des fréquences, mais émettent des niveaux sonores supérieurs dans les bandes basse fréquence entre 63 et 100 Hz. De nouveau, l'isolation acoustique basse fréquence est requise pour minimiser la pénétration du bruit basse fréquence émis par les aéronefs à hélice.

6.2 Corrections d'absorption par l'air et de distance

Les spectres des bruits d'aéronefs extérieurs moyens mesurés à la SEAO sont propres à des petits aéronefs à réaction commerciaux. Les gros appareils émettent des niveaux sonores supérieurs. Les enregistrements de gros aéronefs ont été réalisés près des aéroports de Toronto et de Vancouver. Malheureusement, les types d'aéronefs n'ont pas été établis parce que les mesures ont été effectuées après la tombée du jour. Les mesures prises à proximité des aéroports de Vancouver et de Toronto ont été réalisées à des distances différentes de la trajectoire de vol des aéronefs. Ce paramètre influe sur les niveaux sonores globaux et provoque une absorption de l'air supérieure aux fréquences élevées selon la température, l'humidité relative et la distance [14,15]. La moyenne des niveaux sonores extérieurs d'aéronefs captés près des aéroports de Vancouver et de Toronto est illustrée dans la figure 61 de pair avec le spectre moyen du Chapitre 2 tiré de la figure 60.

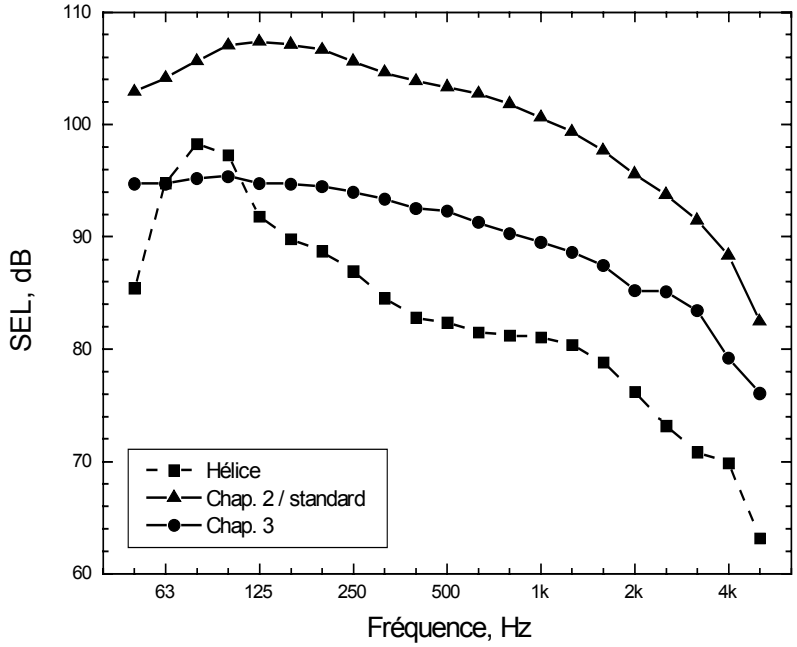


Figure 60. Spectres moyens extérieurs d'aéronefs de trois groupes de types d'appareils mesurés à la SEAO.

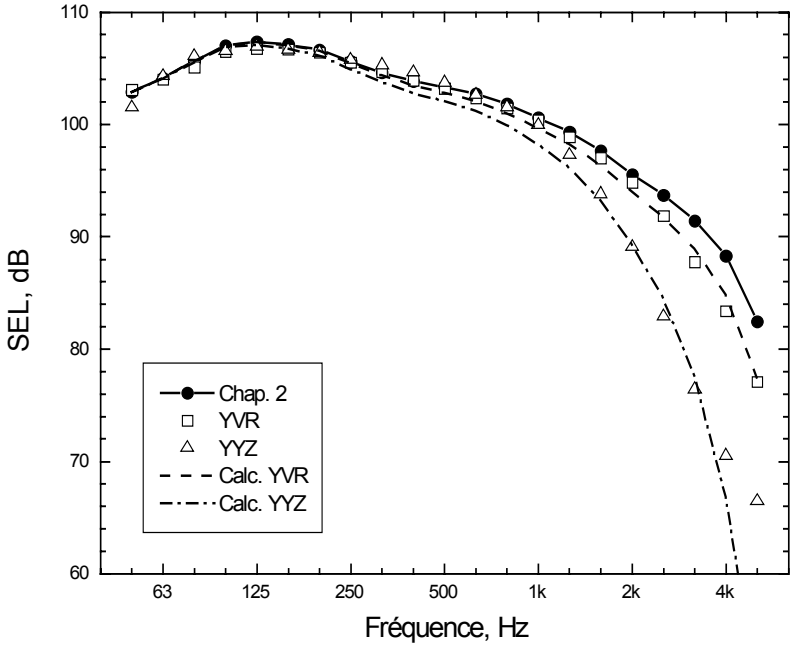


Figure 61. Comparaison du spectre moyen du Chapitre 2 à partir des mesures effectuées à la SEAO et des spectres moyens normalisés à Vancouver (YVR) et à Toronto (YYZ).

Dans la figure 61, les données de Vancouver et de Toronto ont été normalisées de façon à les aligner sur le spectre moyen du Chapitre 2 de la SEA aux fréquences inférieures. Les valeurs semblent être différentes aux fréquences supérieures. On suggère que le spectre du Chapitre 2 moyen des petits aéronefs constitue une moyenne acceptable de tous les types d'aéronefs quand les gros aéronefs sont pris en compte et que les écarts de la figure 61 sont simplement causés par les différences d'absorption par l'air. Cet élément a été mis à l'essai par l'ajout de l'absorption par l'air supplémentaire prévue au spectre du Chapitre 2 de façon à calculer les formes de spectre correspondant aux données de Vancouver et de Toronto. Ces résultats calculés sont également illustrés dans la figure 61 et concordent bien avec les mesures prises à Vancouver et à Toronto. Les distances, la température et l'humidité relative associées à chaque série de mesures sont énoncées dans le tableau IV.

Aéroport	**Distance**	**Température**	**Humidité relative**
YOW (SEAO)	240 m	20	50 %
YVR	480 m	15	90 %
YYZ	1 000 m	10	80 %

Table IV. Distance, température et humidité relative des mesures réalisées à Ottawa (YOW), à Toronto (YYZ) et à Vancouver (YVR).

Les spectres moyens des aéronefs tirés de la SEAO pour les petits aéronefs du Chapitre 2 et du Chapitre 3 peuvent être utilisés lorsqu'il est établi que les aéronefs font partie de ces catégories particulières. De même, le spectre de sources des aéronefs à hélice peut être employé pour les

appareils commerciaux s'apparentant au Dash 8. En règle générale, le spectre de source des aéronefs du Chapitre 2 peut être utilisé pour tous les aéronefs moyens et gros pour représenter un amalgame d'aéronefs à réaction commerciaux de différentes tailles. Cette donnée peut servir de forme de spectre « standard » de bruits d'aéronefs et celle-ci devrait être modifiée de façon à tenir compte des variations de l'absorption par l'air selon la distance, la température et l'humidité.

6.3 Spectres de source des hélicoptères

Aucune mesure sur des hélicoptères n'a été possible et, par conséquent, un spectre de bruits d'hélicoptères a été établi d'après les mesures publiées des spectres d'hélicoptères pour 16 types d'appareils [13]. Les mesures de la FAA ont été effectuées à une distance de 305 m et à un point correspondant au niveau pondéré-A maximal. C'est-à-dire qu'elles ne sont pas intégrées à un passage complet comme l'ont été nos mesures. Les données comprenaient les niveaux des bandes de tiers d'octave et sont normalisées à la même valeur, soit 1 000 Hz. Le décalage de normalisation a d'abord été inversé [19] de façon à produire des spectres de niveaux sonores absolus. La valeur de 7 dB a été ajoutée à ces niveaux maximaux pour estimer les valeurs SEL (d'après les différences observées entre les niveaux maximaux et les niveaux SEL à la SEAO). Sept des types de spectre d'hélicoptères sont représentatifs des vols d'hélicoptères au Canada [20]. Les sept spectres sont illustrés à la figure 62.

Les spectres de la figure 62 portent sur les hélicoptères qui volent à proximité du point de mesure. Des résultats de mesure ont aussi été publiés pour des hélicoptères au décollage et à l'atterrissage. Les spectres moyens calculés des sept types d'hélicoptères selon les trois conditions précitées sont présentés à la figure 63. Les hélicoptères sont surtout bruyants à l'atterrissage, alors qu'ils présentent des niveaux sonores similaires à l'atterrissage et lors des passages. Le spectre moyen des « passages » de la figure 63 constituera une forme de spectre représentatif de bruit d'hélicoptères.

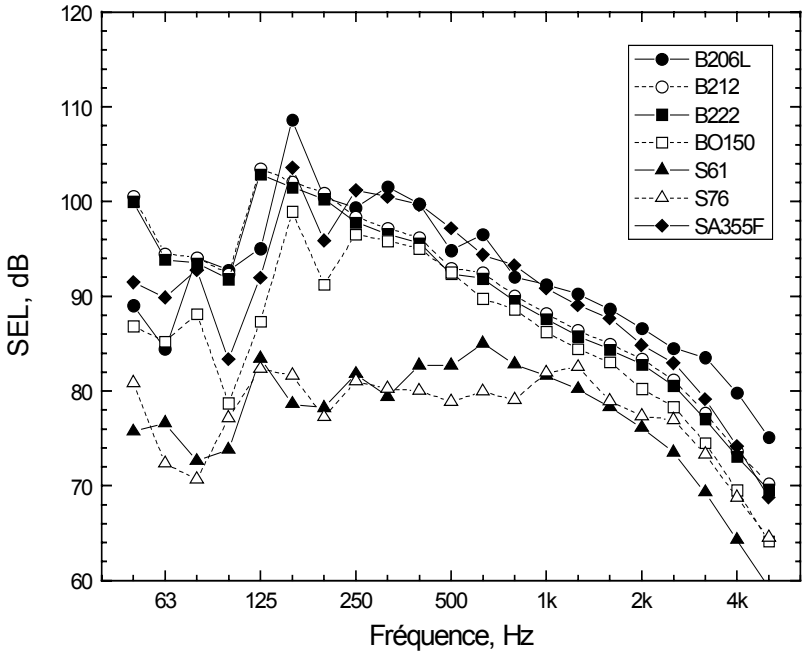


Figure 62. Comparaison de sept (7) spectres de passages d'hélicoptère représentatifs des vols d'hélicoptères au Canada.

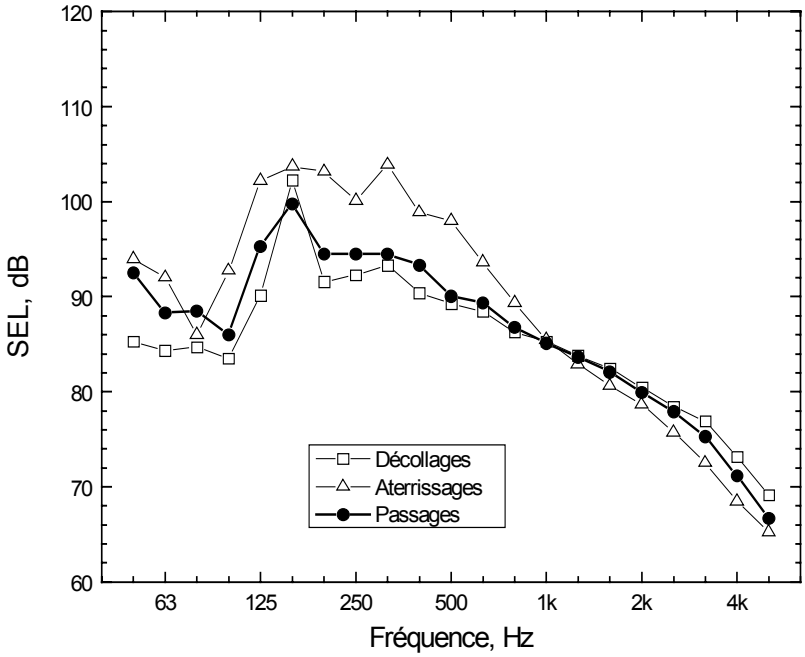


Figure 63. Comparaison des spectres moyens d'hélicoptère - décollages, atterrissages et passages (survols).

6.4 Comparaisons des nouveaux spectres moyens et des autres spectres

Il est proposé d'utiliser le spectre des petits aéronefs du Chapitre 2 comme spectre « standard » de source général d'aéronefs à réaction commerciaux, conformément à l'explication ci-dessus. En présence de renseignements précis sur les types d'aéronefs, il existe des spectres moyens distincts pour les petits aéronefs du Chapitre 2 et du Chapitre 3, les aéronefs à hélice et les hélicoptères. Les quatre nouveaux spectres moyens sont illustrés à la figure 64. Il existe des écarts flagrants dans les niveaux sonores globaux ainsi que dans les détails de la forme de spectre.

Le nouveau spectre « standard » de bruits d'aéronefs est comparé au spectre de source compris dans la norme OITC (classe de transmission extérieure-intérieure) [16] et au spectre de source du guide de la SCHL [7] antérieur dans la figure 65. Les spectres ont été normalisés à 500 Hz de sorte que les formes de spectre puissent être comparées plus facilement. Le spectre de source de la norme OITC est censé être représentatif de tous les types de bruits extérieurs. On constate que ce spectre comporte des niveaux relativement supérieurs dans les bandes de fréquences les plus basses. Le spectre de source tiré du guide de la SCHL est assez différent parce qu'il a été établi pour des types d'aéronefs beaucoup plus anciens. Il sous-estime considérablement les niveaux à basses fréquences des aéronefs modernes et surestime les niveaux à hautes fréquences. La figure 65 illustre aussi le spectre moyen de bruit intérieur établi d'après les mesures réalisées à des écoles proches de l'aéroport de Toronto (Pearson) [21]. La forme s'apparente aux nouvelles mesures, sauf que les niveaux aux fréquences supérieures sont relativement inférieurs. Cette situation est probablement causée par les différences de l'absorption par l'air par rapport aux variations de température, d'humidité et de distance dans la trajectoire de vol.

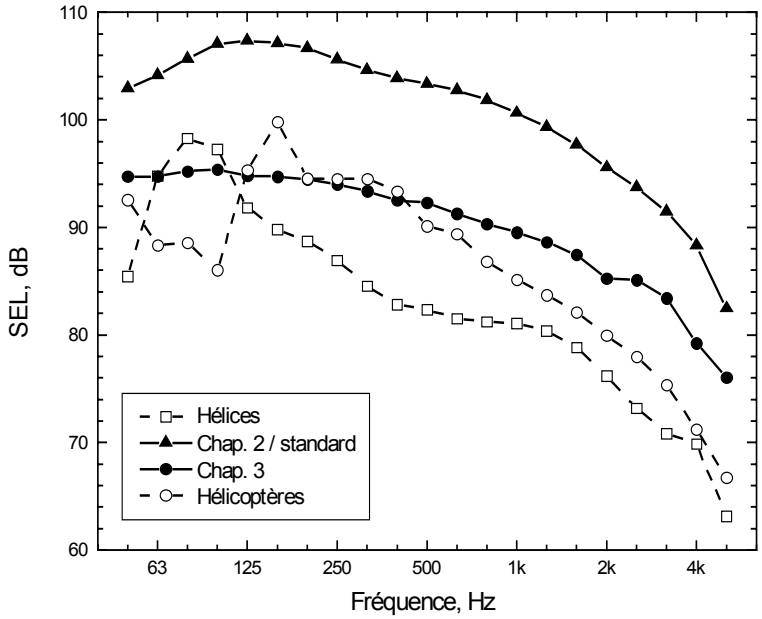


Figure 64. Comparaison de quatre nouveaux spectres moyens de bruits d'aéronefs.

Pour valider davantage la méthode utilisée pour déterminer le spectre de source d'hélicoptères, la même opération a été exécutée pour les aéronefs DC9, F28 et A300 compris dans les données de la FAA. Les spectres publiés par la FAA [13] ont été dénormalisés [19] et la valeur 7 dB a été ajoutée aux valeurs SEL estimées. Ensuite, la moyenne des spectres des appareils DC9 et F28 a été établie et comparée à la moyenne des mesures réalisées à la SEAO, c.-à-d., le spectre du

Chapitre 2. Dans le même ordre d'idées, le spectre des appareils A300 publié [13] a été dénormalisé et comparé au spectre moyen du Chapitre 3 tiré des mesures prises à la SEAO. Ces comparaisons sont représentées graphiquement à la figure 66. Les deux jeux de données concordent assez bien sauf aux basses fréquences. Les spectres de la FAA sont plus irréguliers, probablement parce que les renseignements sont tirés d'un seul point de mesure et ne constituent pas des moyennes de passages complets. Les différences à basses fréquences peuvent également se rapporter aux écarts relevés dans la méthode de mesure. Les données de la FAA ont été recueillies à un seul point de mesure auquel le niveau pondéré-A global était au maximum. Cet endroit est habituellement à proximité du point de l'approche la plus près du microphone. Toutefois, les niveaux à basses fréquences sont les plus élevés lorsque l'aéronef a dépassé le point de mesure. Ainsi, il semble que les nouveaux résultats intégrés aux passages complets conviennent davantage à la prévision de l'énergie sonore incidente totale sur un immeuble soumis au bruit d'aéronefs. L'utilisation des mesures réalisées à un seul point peut apparemment entraîner la sous-estimation des niveaux à basses fréquences dans une mesure pouvant atteindre au moins 10 dB. Le spectre de bruit d'hélicoptères ainsi obtenu (voir figure 64) peut aussi causer la sous-estimation de l'énergie sonore incidente à basses fréquences. Cependant, sans renseignement supplémentaire sur la directionalité du bruit d'hélicoptère et sur la méthode de mesure, il est impossible d'apporter un correctif à cette source d'erreur possible. Les mesures intégrées des niveaux sonores de passages d'hélicoptères doivent être réalisées et, si possible, les mesures de l'isolation acoustique doivent en faire partie.

L'importance des écarts de spectre de source peut être évaluée en calculant les différences prévues des niveaux sonores intérieurs pour une construction particulière soumise à différents spectres des bruits d'aéronefs présentant les mêmes niveaux pondérés-A globaux. La construction consistait en un simple mur à poteaux en bois de 140 mm (2 po sur 6 po) à parement de vinyle extérieur sur panneaux de copeaux orientés, l'intérieur était recouvert d'une couche de placoplâtre de 13 mm et la cavité était isolée thermiquement par de la fibre de verre. Les niveaux sonores intérieurs ont été calculés pour six spectres de source différents, toutes les autres conditions restant inchangées. Voici les six spectres de source : (1) nouveau spectre « standard » de bruits d'aéronefs (petits aéronefs du Chapitre 2), (2) nouveau spectre de source de petits aéronefs du Chapitre 3, (3) nouveau spectre de source d'aéronefs à hélice, (4) nouveau spectre de source de bruit d'hélicoptères, (5) spectre de source de la norme OITC et (6) ancien spectre de source d'aéronefs tiré du guide de la SCHL.

Les niveaux sonores intérieurs calculés font l'objet de comparaison à la figure 67. Cette dernière comprend également les réductions de niveau pondérées-A globales de six spectres de source différents. Ces réductions de niveau pondérées-A globales variaient de 23 à 33 dBA et l'emploi du spectre de source de la SCHL plus ancien a donné des résultats très différents des autres. L'augmentation de l'énergie sonore basse dans le spectre de source tend à indiquer des réductions de niveau pondérées-A globales moindres. Par conséquent, les spectres de source des aéronefs à hélice, des hélicoptères et OITC sont reliés aux réductions de niveau pondérées-A globales inférieures (niveaux sonores intérieurs inférieurs). Le spectre de la SCHL présente de l'énergie sonore à basses fréquences de beaucoup inférieure et provoque des réductions de niveau pondérées-A globales supérieures.

Les légères différences relevées dans la combinaison des données sur les aéronefs du Chapitre 2 et du Chapitre 3 n'entraînent que des effets mineurs sur les niveaux sonores intérieurs produits. Toutefois, dans le cas de combinaisons plus variées des types d'aéronefs, p. ex., nombre supérieur d'hélicoptères ou d'aéronefs à hélice, les effets du spectre de source sont plus importants et pourraient hausser les niveaux intérieurs de plusieurs décibels.

Ainsi, dans la plupart des moyens et des gros aéroports, où l'on retrouve de nombreux types et tailles d'aéronefs, l'utilisation du nouveau spectre de source « standard » d'aéronefs est

probablement pertinente. Pour ce qui est des aéroports de taille moyenne, comme celui d'Ottawa qui accueille différents petits aéronefs à réaction commerciaux du Chapitre 2 et du Chapitre 3, la combinaison de ces deux spectres de source d'aéronefs à réaction commerciaux pourrait être utilisée, sans que cela ne soit normalement nécessaire. Toutefois, aux aéroports spécialisés où les mouvements d'aéronefs comprennent principalement d'autres types d'appareils, comme des aéronefs à hélice et des hélicoptères, il est crucial d'utiliser une forme de spectre de source qui estime le mieux ces types d'aéronefs particuliers.

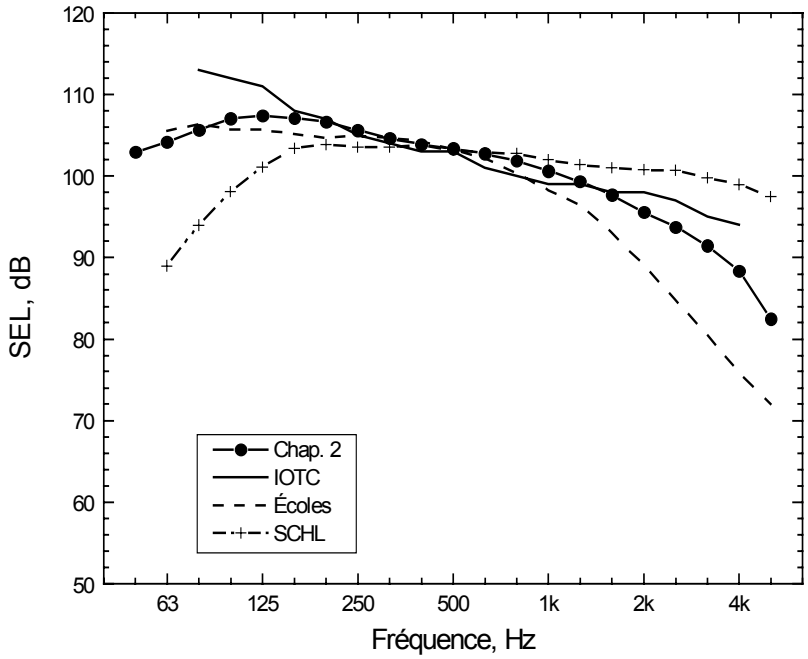


Figure 65. Comparaison du nouveau spectre « standard » de bruits d'aéronefs (Chap. 2) au spectre de source OITC [16], au spectre du guide de la SCHL [7] et aux mesures réalisées à des écoles proches de l'aéroport de Toronto [21].

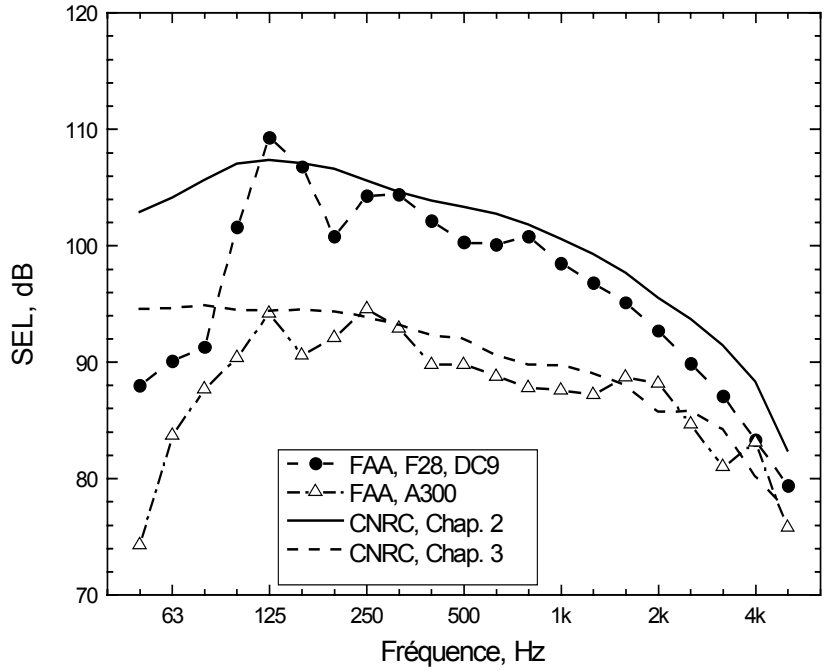


Figure 66. Comparaison des spectres de la FAA et des spectres mesurés à la SEAO.

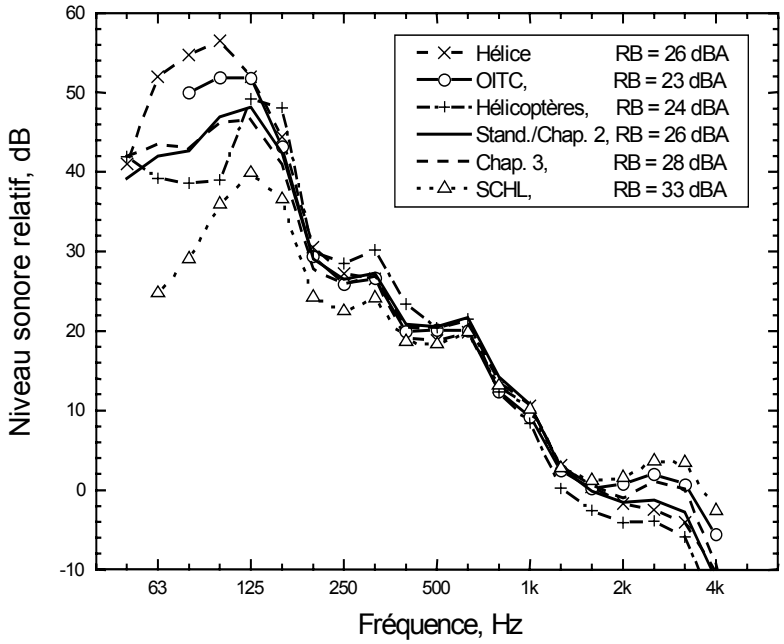


Figure 67. Niveaux sonores intérieurs calculés pour la même construction etspectres de source variés de bruit d'aéronefs. Les réductions du bruit pondérées-A globales sont comprises dans la légende.

7. Calculs de l'isolation acoustique - IBANA-Calc

Dans le cadre du projet IBANA, un logiciel a été mis au point pour faciliter le calcul des effets de différentes conceptions en matière d'isolation acoustique dans des immeubles soumis au bruit d'aéronefs. Le logiciel IBANA-Calc permet de calculer les niveaux sonores intérieurs en présence de niveaux de bruit d'aéronefs extérieurs précisés par l'utilisateur et d'une combinaison d'éléments de façade sélectionnés par l'utilisateur dans la base de données du logiciel. La présente section explique en détail les calculs utilisés dans le logiciel parce que bon nombre des détails ont été tirés des analyses mentionnées dans le présent rapport.

7.1 Calculs d'isolation acoustique de base

Dans le cas de son émis par des aéronefs sources, on peut généralement supposer que le son incident extérieur consiste en des ondes approximativement planes à un certain angle d'incidence. Les normes ASTM E966 [10] et ISO 140 partie V [11] décrivent les méthodes normalisées de ces types de mesures. Ces méthodes sont basées sur l'équation suivante portant sur la *perte de transmission* (PT) par rapport à l'aire de la partition S en m^2, l'absorption totale de la pièce réceptrice A en m^2 et l'angle d'incidence θ.

$$PT = L_1 - L_2 + 10 \log(4S \cos(\theta) / A), \text{ dB} \quad (7.1)$$

L_1 correspond au niveau sonore incident extérieur total et L_2 équivaut au niveau intérieur reçu dans la pièce. Cela suppose que le microphone extérieur est placé en champ libre loin des surfaces réfléchissantes. Dans le cas des mesures de la perte de transmission intérieure entre les deux pièces, le son est plus ou moins incident à partir de tous les angles et lorsque la moyenne est établie pour toutes les valeurs $\cos(\theta)$, l'équation est approximativement simplifiée comme suit :

$$PT = L_1 - L_2 + 10 \log(S / A), \text{ dB} \quad (7.2)$$

L'intégration des niveaux sonores incidents à tous les passages complets d'aéronefs produit une moyenne établie pour tous les angles d'incidence. Bien que les équations intermédiaires entre (2.3 ou 7.1) et (2.4 ou 7.2) soient parfois proposées, les comparaisons consignées dans le présent rapport laissent entendre que l'équation (2.4 ou 7.2) convient le mieux et a servi à réaliser tous les calculs du rapport. Elle sera utilisée dans le logiciel IBANA-Calc.

Pour cette application, la valeur L_1 devrait être mesurée en champ libre à l'écart de toutes les surfaces réfléchissantes et la valeur L_2 devrait représenter les niveaux sonores intérieurs moyens dans les pièces. Les normes de mesure ASTM et ISO [10,11] laissent entendre qu'il est acceptable de mesurer le son incident à l'aide d'un microphone monté sur la façade extérieure de l'immeuble et de supposer que cela entraîne une augmentation de 6 dB des niveaux extérieurs mesurés à toutes les fréquences. Toutefois, les résultats de la section 4.2 révèlent que cette hypothèse ne constitue pas une très bonne approximation de ce qui se produit réellement et que des microphones montés sur façade ne devraient pas servir à réaliser les mesures du bruit incident d'aéronefs.

7.2 Conversions de NEF à Leq24

On prévoit que les niveaux sonores d'aéronefs extérieurs au Canada seront habituellement des courbes des bruits d'aéronefs calculées à l'aide du programme NEF_1.7 de Transports Canada. Toutefois, les valeurs NEF sont converties en valeurs Leq24 dans le logiciel IBANA-Calc. Ainsi, tous les niveaux sonores intérieurs calculés sont exprimés en valeurs Leq24.

La conversion des valeurs NEF à Leq24 était basée sur des analyses précédentes du programme de courbes de bruit NEF_1.7 [4]. Les valeurs mesurées du niveau sonore jour-nuit Ldn et NEF_{mes} ont été traitées comme suit :

$$Ldn = NEF_{mes} + 35, dB \quad (7.3)$$

et les valeurs Leq24 sont environ 1 dB inférieur aux valeurs Ldn. Par conséquent :

$$Leq24 = NEF_{mes} + 34, dB \quad (7.4)$$

Les valeurs NEF tirées du programme NEF_1.7 sont censées être différentes de celles qui pourraient être mesurées à cause de la méthode d'estimation d'un affaiblissement au sol excessif et à cause du grand nombre d'opérations dans une journée de planification maximale utilisée dans les calculs du programme NEF_1.7 plutôt que dans une journée moyenne.

Les courbes de bruit des programmes NEF_1.7 et modèle de bruit intégré (INM – version 3) ont été comparées [4] pour les mêmes mouvements d'aéronefs et ont indiqué certaines différences. Ces différences étaient censées être surtout causées par différentes méthodes de calcul des effets de l'affaiblissement au sol excessif. Les sorties des deux programmes ont été comparées dans le cas de quatre (4) aéroports de différentes tailles et les différences relevées sont présentées dans le tableau V.

	Différences NEF_1.7 – INM				
Plage NEF	**20-25**	**25-30**	**30-35**	**35-40**	**Moy. globale**
Windsor	4,50	4,80	4,10	3,20	
St John's	3,55	3,40	4,10	5,20	
Ottawa	3,20	3,80	3,55	4,35	
Montréal	3,65	3,70	3,20	3,60	
Moyenne	3,73	3,93	3,74	4,09	3,87

Tableau V. Différences entre les valeurs NEF calculées par les programmes NEF_1.7 et INM par plage de valeurs NEF à quatre aéroports (tirées de [4]).

Les valeurs NEF calculées par le programme NEF_1.7 étaient, en moyenne, de 3,9 dB supérieures à celles qui ont été calculées par le programme INM. On a conclu que l'estimation correcte NEF se trouvait à mi-chemin des résultats des deux programmes et que les résultats du programme NEF_1.7 étaient environ de 2 dB supérieurs aux valeurs mesurées prévues. Par conséquent,

$$NEF_1.7 = NEF_{mes} + 2{,}0, dB \quad (7.5)$$

La combinaison des équations 7.4 et 7.6 donne la formule suivante :

$$Leq24 = NEF_1.7 + 32, dB \quad (7.6)$$

Cette relation sera utilisée dans le logiciel IBANA-Calc.

Aucune correction n'a été effectuée pour tenir compte du grand nombre d'opérations dans une journée de planification maximale plutôt que dans une journée moyenne. L'emploi d'une journée de planification maximale correspond à un jour de 95^{e} percentile, qui est ainsi représentatif des activités des journées les plus chargées. On suppose que les niveaux intérieurs devraient également être calculés dans cette condition.

7.3 Corrections des conditions sur le terrain

Le logiciel IBANA-Calc comporte quatre corrections facultatives qui servent soit à modifier les valeurs de spectre de source ou de perte de transmission d'une construction de façade particulière.

a) Correction de l'absorption de l'air et forme du spectre de source

Les sons de fréquences supérieures peuvent être considérablement réduits à cause de l'absorption par l'air. Le degré d'affaiblissement varie selon la fréquence, la température, l'humidité relative

et la distance. Habituellement, plus le son se propage loin, plus les composants des hautes fréquences s'affaiblissent. Les spectres de source de bruits d'aéronefs présentés dans le chapitre 6 sont représentatifs d'une distance de 240 m à 20 degrés C et de 50 % d'humidité relative. D'autres conditions entraînent un changement de la forme du spectre.

Bien que ces effets n'aient habituellement aucun effet important sur la cote d'isolation acoustique globale, il est possible d'apporter des corrections des effets de l'absorption par l'air d'après les normes ANSI S1.26 (1995) [14] ou ISO 9613 [15]. Les deux normes présentent la même méthode de calcul de l'absorption par l'air, ce qui est inclus comme une correction facultative dans le logiciel IBANA-Calc.

b) Corrections de l'angle vertical par rapport à la perte de transmission de façade

Les normes de mesure [10, 11] laissent entendre que la perte de transmission du son mesurée varie comme valeur cosinusoïdale de l'angle d'incidence. Les résultats des mesures présentés dans la section 4.3 indiquent que les réductions du bruit mesurées à l'habitation d'essai variaient approximativement en fonction du cosinus de l'angle vertical des aéronefs en vol.

Par conséquent, une correction facultative de l'angle vertical des aéronefs en vol est comprise dans le logiciel IBANA-Calc. La correction est normalisée à un angle vertical de 60 degrés parce que les résultats sur le terrain touchant l'angle sont censés représenter le plus fidèlement les résultats en laboratoire. La réduction du bruit corrigée, RB_c est déterminée à partir de la réduction du bruit non corrigée, NR, comme suit :

$$RB_c = RB + 10 \log\{COS(\theta) / COS(60)\}, \text{ dB} \qquad (7.7)$$

θ correspondant à l'angle vertical en degrés de l'aéronef par rapport au plan horizontal.

Ces corrections ne sont apportées qu'aux fréquences inférieures à 1 000 Hz parce que les résultats de mesure n'indiquaient pas que cet effet se produisait aux fréquences supérieures. Dans les situations types, cette correction est plutôt réduite et les résultats de mesure de la section 4.3 laissent entendre une grande incertitude à ce sujet.

c) Corrections d'angle vertical des niveaux sources efficaces

Il existe des différences de l'énergie sonore incidente d'un aéronef en vol en raison de l'orientation de la façade par rapport à la trajectoire de vol de l'aéronef. Ces différences ont été présentées dans le chapitre 5 du présent rapport. La correction facultative comprise dans le logiciel IBANA-Calc établit simplement le rapport entre l'énergie sonore incidente et la portion du passage de l'aéronef qui est visible sur la façade avec une légère correction empirique de la diffraction. C'est-à-dire que l'énergie sonore incidente est réduite lorsque le passage complet de l'aéronef n'est pas visible sur la façade. Cette correction correspond aux mesures réalisées à l'immeuble de l'aéroport de Vancouver et s'apparente approximativement aux résultats obtenus à la SEAO.

Le niveau sonore incident efficace, $L_i"(f)$, est calculé comme suit :

$$L_i"(f) = L_i(f) + 10 \log\{ (\phi / 180) D(f)\} \text{ dB}, \qquad (7.8)$$

ϕ étant l'angle de vue horizontal du passage et $0 \leq \phi \leq 180$.

La correction varie légèrement selon la fréquence parce qu'une partie de l'énergie est diffractée autour du bord vertical de l'immeuble. La valeur D(f) tient compte de ce fait et est considérée comme une augmentation de l'angle de vue efficace. La valeur D(f) accroît l'angle de vue efficace, ce qui entraîne une augmentation des niveaux sonores incidents de 0,1 dB par bande de tiers d'octave par rapport à la bande de hautes fréquences.

Dans le cas d'un mur perpendiculaire à la trajectoire de vol, l'angle de vue horizontal est de 90 degrés et la correction de base est de -3 dB. Cela signifie que la valeur L_i"(f) efficace est de 3 dB de moins que dans le cas d'un angle de vue complet de 180 degrés. Toutefois, le facteur D(F) réduit l'ampleur de cette correction aux fréquences inférieures. C'est-à-dire qu'à 5 000 Hz, la correction est de –3,0 dB mais, dans la bande suivante (4 000 Hz), la correction est de –2,9 dB, etc. À 50 Hz, la correction d'angle de vue est réduite d'environ –1 dB dans le cas de l'essai avec un angle de vue de 90 degrés. Le facteur D(f) est limité de sorte que l'angle de vue efficace, ϕ x D(f), ne dépasse pas 180 degrés.

d) Correction de réflexion au sol du spectre de source efficace

Aux fréquences inférieures et aux positions de récepteur assez proches du sol, le son réfléchi au sol perturbe de façon destructive le son incident direct. Dans le cas des façades d'immeubles comptant des pièces au rez-de-chaussée, cela réduit considérablement l'énergie sonore incidente dans les bandes de fréquences les plus basses. Par conséquent, une correction facultative est incluse pour créer des niveaux incidents efficaces réduits qui sont fonction de la fréquence. La figure 68 illustre l'effet mesuré et la courbe de meilleure concordance qui y est liée.

L'équation de meilleure concordance de la variation de cet affaiblissement des basses *B* en fonction de la fréquence se présente comme suit :

$$B(\mathrm{f}) = 15 \log\{ \mathrm{K}/[(\mathrm{f}/\mathrm{f}_0)^2+(\mathrm{f}_0/\mathrm{f})^2]\}, \text{ dB} \qquad (7.9)$$

La valeur K = 6,5 semble le mieux fonctionner et elle est utilisée dans le logiciel IBANA-Calc.

La valeur f_0 est déterminée à partir de la hauteur du milieu de la façade au-dessus du sol. On suppose qu'une hauteur de 1,2 m au-dessus du plancher d'une pièce de rez-de-chaussée est représentative du son incident sur la façade. Pour calculer la valeur f_0, il faut déterminer la différence de trajectoire entre les voies de transmission directe et réfléchie au sol. Toutefois, il ne s'agit pas toujours de la différence de trajectoire lorsque l'aéronef est le plus rapproché de l'habitation. Pour des passages simulés à une distance de 240 m, comme à la SEAO, le minimum du son incident total est dû à la combinaison des deux interférences minimales à ±64 degrés par rapport au point d'approche le plus près. À mesure que la distance de la trajectoire de vol augmente, les tracés d'interférence se propagent et le minimum du son incident total est causé par une seule chute d'interférence à une fréquence légèrement inférieure. Dans le cas de distances inférieures à 920 m par rapport à la trajectoire de vol, les simulations de l'annexe III laissent supposer qu'une correction supplémentaire est nécessaire pour déterminer la distance efficace de la trajectoire de vol servant à calculer la bonne fréquence minimale de l'effet de réflexion au sol. Cette situation est décrite ci-dessous.

Si la hauteur de l'aéronef par rapport au sol est *H*, si la hauteur du récepteur au-dessus du sol est *h* et si la distance horizontale de la trajectoire de vol est *d*, nous pouvons calculer les longueurs des voies directe et réfléchie au sol.

Voie directe, $r_1 = \sqrt{\{(H-h)^2+d^2\}}$ (7.10)

Voie réfléchie, $r_2 = \sqrt{\{(H+h)^2+d^2\}}$ (7.11)

L'interférence minimale se produit lorsque la différence de trajectoire est $\lambda/2$, λ étant la longueur d'onde.

Par conséquent, $f_0 = c/\{2(r_2-r_1)\}$ (7.12)

Pour des distances *d* de 200 à 920 m par rapport à la trajectoire de vol, la distance efficace *d'* devrait être obtenue comme suit :

$$d' = d\sqrt{(920/d)} \qquad (7.13)$$

Aucune correction de d n'est nécessaire à des distances supérieures. Les calculs de simulation portent à croire que, à des distances inférieures, plusieurs effets d'interférence se produisent et tendent à se stabiliser, ce qui réduit l'importance de l'effet de réflexion au sol. Par conséquent, le programme IBANA-Calc ne comprend aucune correction de réflexion au sol pour les positions situées à moins de 200 m de la trajectoire de vol.

La figure 68 indique une valeur f_0 d'environ 89 Hz, données de l'aéroport d'Ottawa, et une courbe de meilleure concordance raisonnablement conforme à l'effet mesuré.

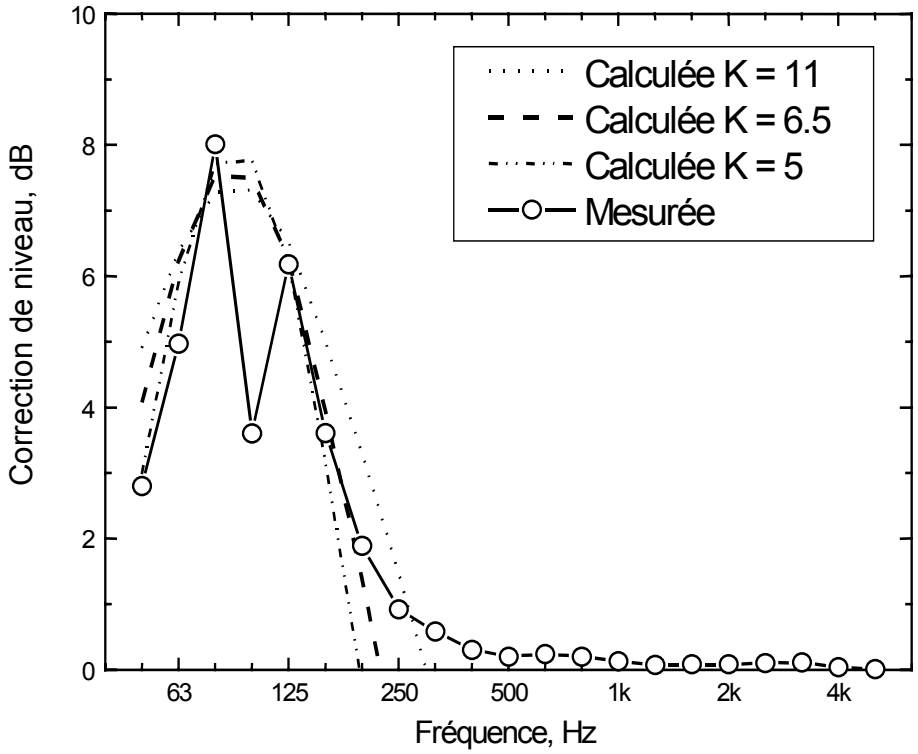


Figure 68. Approximations mesurées et de meilleure concordance de l'augmentation prévue des réductions du bruit mesurées en raison de l'interférence du son incident direct et réfléchi au sol.

8. Conclusions

Le présent rapport sert les fins suivantes :

- comparer les mesures d'isolation acoustique globales dans un certain nombre d'éléments de construction d'un immeuble à ossature en bois soumis au bruit d'aéronefs aux prévisions tirées des mesures en laboratoire;
- explorer différents facteurs influant sur la différence entre les résultats des essais en laboratoire et ceux des essais sur le terrain;
- élaborer des corrections servant à améliorer la concordance entre les résultats des essais en laboratoire et ceux des essais sur le terrain;
- produire de nouvelles formes de spectre de bruits d'aéronefs pour différents types d'aéronefs.

Les comparaisons entre les mesures en laboratoire et celles sur le terrain de l'isolation acoustique ont permis de quantifier les différences pour une gamme de conditions représentatives des constructions à poteaux en bois au Canada. Les causes des grandes différences ont été identifiées et approfondies dans le cadre du présent ouvrage et des corrections ont été mises au point pour améliorer l'exactitude des calculs d'isolation acoustique à venir.

Voici les facteurs les plus importants qui ont entraîné les différences entre les résultats des essais en laboratoire et ceux des essais sur le terrain :

- son réfléchi au sol;
- orientation de la façade et angle de vue par rapport au passage d'aéronefs;
- variation de l'isolation acoustique selon l'angle d'incidence aux principales résonances;
- angle vertical de l'aéronef;
- voies de transmission indirecte dans l'immeuble.

8.1 Comparaisons principales

Les comparaisons globales des mesures d'isolation acoustique ont été analysées en trois groupes. Le premier groupe tenait compte des essais touchant un seul mur ou deux murs de l'habitation d'essai contribuant aux niveaux sonores intérieurs. Le deuxième groupe portait sur les murs fenêtrés et le troisième visait les constructions dotées de différents orifices de ventilation.

(a) Murs

Dans le cas des quatre constructions, l'indice de réduction du bruit (RB) pondéré-A global a été prévu compte tenu d'un écart-type de –6,4 dBA (soit de –8,7 à –4,3 dBA). Lorsque des correctifs supplémentaires ont été apportés de façon à prendre en considération le son réfléchi au sol et la transmission indirecte, l'écart-type est passé à –3,1 dBA (soit de –5,4 à –1,1 dBA). Les valeurs RB mesurées étaient supérieures (meilleures) aux valeurs prévues. Dans trois des quatre constructions, les différences des valeurs RB aux environs de la fréquence primaire de résonance structurale, qui a causé une chute marquée à 125 Hz dans les résultats des essais en laboratoire, expliqueraient une différence d'environ 3 dBA. L'énergie sonore incidente réduite sur la façade approche de l'habitation d'essai pourrait aussi expliquer les différences maximales de 3 dBA dans les essais où ce mur transmettait une importante quantité d'énergie sonore.

(b) Fenêtres

Lorsque des fenêtres ont été ajoutées aux murs, les niveaux sonores intérieurs étaient de 2 à 4 dBA supérieurs aux données des essais sur les murs sans fenêtre. Les données des essais sur les murs avec fenêtres ont été prévues avec beaucoup plus d'exactitude parce que les niveaux sonores transmis à l'intérieur étaient dominés par des fréquences moyennes et, par conséquent, moins touchés par les effets des fréquences basses des réflexions au sol et la directionalité des aéronefs à basses fréquences. Les valeurs RB pondérées-A globales des essais sur les fenêtres ont été prévues avec une erreur moyenne d'à peine 0,5 dBA (soit de –2,4 à +1,6 dBA).

(c) Orifices de ventilation

Les dispositifs de ventilation de toit, de faîte et d'avant-toit ont habituellement peu d'incidence, alors que les orifices muraux influent considérablement sur l'isolation acoustique mesurée.

Des orifices de ventilation de toit et un dispositif de ventilation augmentaient les niveaux sonores intérieurs transmis de 0,7 à 1,9 dBA dans l'habitation d'essai et ces résultats semblaient varier selon l'angle vertical des aéronefs. Les essais en laboratoire sur les mêmes dispositifs de ventilation ont indiqué que ceux-ci étaient moins nuisibles lorsque l'entretoit était adéquatement isolé au moyen de fibre isolante, lorsqu'il y avait deux couches de placoplâtre et lorsque le nombre d'orifices de ventilation de toit était inférieur. Quand des profilés souples étaient ajoutés au plafond, les effets nuisibles des orifices de toit augmentaient légèrement. Selon le nombre d'orifices de ventilation devant probablement être installés dans les habitations et compte tenu de fibre isolante R40 dans l'entretoit, l'effet des orifices de toit est une réduction d'environ 1 dBA de la valeur RB pondérée-A globale.

Les essais sur les orifices de ventilation muraux, qui raccordent directement l'extérieur aux espaces intérieurs, ont entraîné une diminution de 8 dBA et de 9 dBA des valeurs RB pondérées-A globales. Aux fréquences moyennes, ils accusaient une perte de transmission efficace de 0 dB. Il est important que pareils orifices de ventilation fassent l'objet d'un traitement acoustique et soient installés du côté calme de l'immeuble pour minimiser la transmission du son.

8.2 Approfondissement des détails

Le son réfléchi au sol décroît les niveaux sonores incidents à basses fréquences dans une mesure pouvant atteindre 8 dB. Les calculs, réalisés à l'aide de passages d'aéronefs simulés, ont révélé la façon dont cet effet variait selon la hauteur et la distance des aéronefs par rapport à la façade de l'immeuble et que les effets étaient négligeables pour les récepteurs placés au-dessus du sol.

L'orientation de la façade influe sur l'isolation acoustique parce qu'elle joue sur l'angle de vue du passage d'aéronef et que l'énergie sonore incidente et transmise varie selon l'angle d'incidence du son. Les tentatives de quantification de ces effets peuvent être virtuellement adéquates, mais étaient moins précises que cela n'était souhaité parce que les résultats étaient compliqués par des effets importants imprévus des réflexions au sol, de la directionalité et des voies de transmission indirecte.

Les mesures de l'effet de l'angle vertical des aéronefs ont mené aux légères variations prévues des valeurs RB mesurées dans les limites de précision des mesures.

Les voies de transmission indirecte de l'immeuble à ossature en bois présentaient des effets importants aux fréquences supérieures, mais elles n'ont entraîné aucun effet majeur sur les niveaux sonores intérieurs pondérés-A globaux. Elles étaient censées être des voies de transmission indirecte structurales et semblaient contourner réellement les avantages de l'emploi de profilés souples pour fixer le placoplâtre aux murs de l'habitation d'essai.

Il a été établi que les mesures des niveaux sonores incidents réalisées à l'aide de microphones montés sur la façade, comme cela est recommandé dans les différentes normes, avaient produit

des erreurs graves pouvant atteindre 12 dB. Les niveaux sonores incidents mesurés sur la façade de l'immeuble sont fortement influencés part les réflexions au sol et les effets de diffraction qui varient selon l'angle vertical des aéronefs.

De nouvelles formes de spectre moyennes ont été établies pour les quatre catégories d'aéronefs. Aucune mesure de bruit d'hélicoptère n'a été obtenue et ainsi une forme de spectre d'hélicoptère a été tirée des données publiées par la FAA. Ces données, basées sur des niveaux maximaux en un seul point, peuvent sous-estimer le son à basses fréquences réellement produit par un passage complet d'aéronef. Les autres nouvelles formes de spectre ont été tirées des mesures réalisées aux aéroports d'Ottawa, de Toronto et de Vancouver. Il a été démontré que l'emploi d'anciennes formes de spectre inappropriées avaient produit des erreurs maximales de 10 dB dans les valeurs RB calculées.

Les corrections des formes de spectre de source servant à tenir compte de l'absorption par l'air peuvent corriger davantage ces nouvelles formes de spectre. D'autres corrections touchant les effets des réflexions au sol, de l'orientation de façade et de l'angle vertical des aéronefs ont été établies pour améliorer le calcul de l'isolation acoustique d'immeuble dans le logiciel IBANA-Calc.

8.3 Recherche à venir

Certaines des différences les plus marquées entre les mesures d'isolation acoustique en laboratoire et sur le terrain sont associées à la résonance structurale primaire des murs ordinaires en poteaux de bois et la résonance masse-air-masse des fenêtres. Ces écarts sont importants parce que ces résonances limitent la réduction du bruit globale, mais la réduction du bruit à ces résonances semble varier considérablement selon l'angle du son incident. Une meilleure compréhension de ces effets pourrait améliorer l'exactitude des prévisions dans une mesure pouvant atteindre 3 dBA.

On a constaté que le son réfléchi au sol a une grande influence sur les façades du rez-de-chaussée de l'habitation d'essai. Ces effets importants doivent faire l'objet d'expériences supplémentaires pour ce qui est des différentes orientations de façade et des effets au rez-de-chaussée.

Des essais approfondis doivent aussi être exécutés de façon à mieux définir les effets de l'orientation de façade et de l'angle vertical des aéronefs. Cet objectif pourrait être atteint par l'emploi de façades à des étages supérieurs pour minimiser les effets des réflexions au sol et dans des immeubles offrant des voies de transmission indirecte minimes. Il peut aussi être nécessaire d'approfondir l'examen de chacun des passages d'aéronefs de sorte que la directionalité et des angles d'incidence particuliers puissent être correctement étudiés.

Des spectres représentatifs des hélicoptères devraient être tirés des enregistrements de passages complets pour permettre d'estimer correctement les niveaux sonores à basses fréquences. En raison de l'importance de l'orientation de la façade par rapport aux passages d'aéronefs, les mesures de l'isolation acoustique d'immeubles devraient être effectuées à partir de sources de bruit d'hélicoptères. Pareilles mesures définiraient mieux la pénétration acoustique de ces types d'aéronefs et aideraient à mieux comprendre les particularités des effets de l'angle d'incidence.

Les mesures d'isolation acoustique devraient être réalisées dans les tours d'habitation parce que la combinaison des différents effets de l'angle d'incidence et l'influence des réflexions au sol sont censées être assez différents. Ces différences prévues doivent être vérifiées avec précision.

La portée des travaux devrait comprendre les sources de bruits routiers et ferroviaires. Il ne s'agit pas d'une simple question d'acquisition de nouveaux spectres de source, mais de la nécessité de se pencher sur la façon dont différents facteurs aggravants, comme l'orientation de la façade et les réflexions au sol, influeraient sur l'isolation de ces sources.

Ouvrages de référence

[1] Bradley, J.S. et Birta, J.A., *Laboratory Measurements of the Sound Insulation of Building Façade Elements*, rapport interne de l'IRC, IR-818, octobre 2000.

[2] Anonyme, ASTM E90 – 97, *Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission loss of Building Partitions and Elements*, Am. Soc. for Testing and Materials, Philadelphie.

[3] Anonyme, ISO 140/III, *Laboratory Measurement of Airborne Sound Insulation of Building Elements – Part III: Laboratory Measurements of Airborne Sound Insulation of Building Elements*.

[4] Bradley, J.S., *NEF Validation Study: (1) Issues Related to the Calculation of Airport Noise Contours,* rapport client de l'IRC, A-1505.3, 1996.

[5] Bradley, J.S*., NEF Validation Study: (2) Review of Aircraft Noise and its Effects*, rapport client de l'IRC, A-1505.5, 1996.

[6] Bradley, J.S., *NEF Validation Study: (3) Final Report*, rapport client de l'IRC, A-1505.3, 1996.

[7] Anonyme, *Nouveaux secteurs résidentiels à proximité des aéroports*, Société canadienne d'hypothèques et de logement (1981).

[8] J.S. Bradley , *Insulating Buildings Against Aircraft Noise: A Review*, rapport interne de l'IRC, IRC IR-760, mars 1998.

[9] Lin G-F. et Garrelick, J.M., *Sound Transmission Through Periodically Framed Parallel Plates*, J. Acoust. Soc. Am., vol. 61, n° 4. p. 1014-1018, (1961).

[10] Anonyme, ASTM 966, *Standard Guide for Field Measurement of Airborne Sound Insulation of Building Facades and Facade Elements*, Am. Soc. for Testing and Materials, Philadelphie.

[11] Anonyme, ISO 140/V, Laboratory Measurement of Airborne Sound Insulation of Building Elements – Part V, Field Measurements of Airborne Sound Insulation of Façade Elements and Facades.

[12] J.S. Bradley, K.A. Lay and S.G. Norcross**,** Measurement of the Sound Insulation of Buildings Near Vancouver Airport, rapport client de l'IRC, B3122.1, janvier 2000.

[13] Anonyme, Spectral Classes for FAA's Integrated Noise Model Version 6.0, Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation, Letter Report, décembre 1999 (DTS-34-FA065-LR1).

[14] Anonyme, ANSI S1.26 1995, Method for the calculation of the absorption of sound by the atmosphere.

[15] Anonyme, ISO 9613-1, Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1 Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.

[16] Anonyme, ASTM 1332, Standard Classification for Determination of Outdoor-Indoor Transmission Class, Am. Soc. for Testing and Materials, Philadelphie.

[17] M.J. Crocker (ed.), Encyclopedia of Acoustics, Vol. 1, p. 347, John Wiley, New York (1997).

[18] S. Pietrzko et R. Hofmann, Prediction of A-Weighted Aircraft Noise Based on Measured Directivity Patterns. App. Acoustics, 23 (29-44) 1988.

[19] Amada Rapoza, Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, U.S.A. (communication personnelle).

[20] Guy Héneault, Transport Canada, Ottawa, (communication personnelle).

[21] Anonyme, Sound Insulation and Aircraft Noise in Schools Near Lester B. Pearson International Airport, Valcoustics Report, (octobre 1991).

Annexe I - RB moyenne mesurée dans chacune des configurations

La présente annexe comprend les réductions du bruit moyennes mesurées (RB) dans chacun des essais de mesure à la structure d'essai de l'aéroport d'Ottawa (SEAO). Les particularités des constructions de chacun des essais de mesure sont décrites à la section 2.2. Le tableau A1 présente les réductions du bruit moyennes mesurées en décibels dans chaque bande de fréquences de tiers octave comprise entre 50 et 5 000 Hz. Les réductions du bruit sont calculées par rapport aux bruits d'aéronefs extérieurs incidents qui ont été mesurés en champ libre et captés par le microphone extérieur. C'est-à-dire qu'il existe des différences entre les niveaux moyens dans chaque pièce et les niveaux sonores extérieurs correspondants. La moitié supérieure du tableau porte sur la pièce A et la moitié inférieure touche la pièce B. (Les pièces A et B sont identifiées dans la figure 1 du rapport.) Le tableau A1 comprend aussi l'angle vertical moyen des passages des aéronefs dans chaque essai de mesure.

		Fréquence, Hz																				
Essai	**Angl. vert.**	**50**	**63**	**80**	**100**	**125**	**160**	**200**	**250**	**315**	**400**	**500**	**630**	**800**	**1k**	**1,25k**	**1,6k**	**2k**	**2,5k**	**3,15k**	**4k**	**5k**
		Extérieur-Pièce A																				
1	54,8	14,5	18,7	18,4	19,7	17,5	20,9	26,5	27,8	27,4	27,7	28,8	30,5	34,4	37,5	39,0	42,0	43,5	44,3	45,9	46,8	45,4
2	57,4	15,2	22,2	23,6	20,8	23,2	24,2	29,1	28,2	29,3	29,9	31,1	30,3	34,4	36,9	36,9	39,8	41,2	43,3	44,7	46,2	44,6
3	56,7	13,5	20,8	17,7	16,0	16,2	20,1	25,3	27,1	27,0	27,1	28,2	28,4	32,3	34,9	35,1	39,0	39,5	41,1	42,4	42,0	39,3
5	44,4	14,2	18,1	19,5	21,4	25,5	26,6	30,5	32,0	30,8	29,4	30,8	32,1	35,3	38,2	39,9	43,7	44,1	44,0	45,1	46,1	44,2
6	49,1	14,6	19,0	18,9	21,1	24,5	25,2	29,9	31,4	30,1	28,4	30,4	31,3	34,6	37,3	38,4	42,3	42,2	42,3	44,1	42,2	39,4
7	40,8	11,7	17,2	17,2	21,4	25,2	24,9	29,4	30,8	29,1	28,3	30,0	31,9	35,3	37,5	38,6	42,6	43,7	43,2	44,9	46,8	45,8
8	57,8	13,2	17,4	17,1	19,5	23,1	23,1	28,8	30,4	28,5	27,7	30,6	30,5	33,6	37,0	37,0	40,8	40,3	41,6	41,5	36,2	27,8
9	44,2	12,6	17,5	18,3	20,3	24,0	24,0	26,0	23,1	20,0	20,2	23,3	24,1	21,1	25,3	27,9	31,9	31,2	30,7	32,7	31,2	29,3
10	51,0	16,2	18,0	19,2	21,7	19,5	20,7	21,6	24,6	21,0	20,8	24,5	27,7	30,7	33,9	35,4	36,6	36,1	36,8	36,9	31,3	26,8
11	56,7	16,5	20,2	23,3	21,8	24,8	24,3	26,4	24,5	27,5	24,2	26,6	26,9	29,2	31,5	33,4	35,5	35,3	37,0	36,8	31,1	27,1
12	53,2	15,3	21,4	18,9	19,6	22,3	23,2	25,0	22,2	23,3	22,0	24,9	25,5	27,1	29,0	31,3	32,5	32,5	34,8	35,0	28,6	24,4
		Extérieur-Pièce B																				
1	54,8	15,6	22,4	22,5	23,8	24,6	29,5	31,9	32,2	32,0	31,2	33,0	34,9	38,1	39,4	40,2	44,0	45,4	47,4	48,5	49,7	46,9
2	57,4	17,6	20,4	23,2	19,7	21,5	25,2	27,3	29,7	29,7	30,4	31,3	32,3	36,6	38,1	39,2	43,4	43,6	45,8	46,6	47,7	45,9
3	56,7	16,5	23,4	22,2	21,3	21,5	25,2	27,4	29,8	29,4	30,0	31,0	32,4	35,9	37,3	38,8	43,2	43,1	44,7	45,3	45,1	42,4
5	44,4	17,4	20,2	24,5	22,5	26,1	28,4	31,3	32,8	32,2	31,5	32,1	33,8	37,3	40,4	40,9	43,5	44,7	45,6	46,4	46,9	46,0
6	49,1	15,7	19,2	22,3	21,3	25,2	26,4	29,9	32,0	30,7	29,9	30,7	32,1	35,9	38,1	38,4	41,7	42,7	43,1	44,7	42,7	40,7
7	40,8	16,0	20,5	23,2	21,5	24,4	26,6	30,5	31,7	31,3	30,9	31,3	33,5	36,8	39,8	40,0	43,1	44,3	44,7	46,3	48,0	47,4
8	57,8	15,8	18,3	21,0	22,9	26,9	26,6	29,9	31,9	30,3	30,2	31,4	32,3	35,8	37,1	38,1	41,9	41,5	43,4	43,0	38,2	30,1
9	44,2	16,2	20,3	21,8	21,3	25,1	25,8	28,4	30,7	26,3	27,5	25,0	24,9	25,5	24,2	25,9	29,2	32,0	33,8	34,5	33,0	31,9
10	51,0	15,2	17,8	22,3	25,5	25,9	26,6	27,6	25,7	28,9	26,9	27,9	30,6	33,2	34,8	36,2	37,1	38,7	40,5	38,7	34,7	29,9
11	56,7	16,1	18,5	22,2	20,8	26,8	26,1	26,6	24,7	26,4	23,2	25,7	26,7	30,3	32,6	34,7	36,4	36,9	38,3	37,3	31,9	27,9
12	53,2	16,2	20,8	22,7	22,2	26,3	26,8	27,0	25,1	28,2	25,1	26,8	27,7	30,1	32,0	33,9	35,1	36,4	38,1	37,3	31,5	27,6

Tableau A1. Réductions du bruit moyennes mesurées en décibels calculées d'après les valeurs captées par le microphone extérieur (champ libre) et la moyenne des valeurs captées par les trois microphones de chaque pièce [A (partie supérieure) et B (partie inférieure)] dans les bandes de

fréquences de tiers octave comprises entre 50 Hz et 5 kHz. Les angles verticaux moyens, en degrés, des passages d'aéronefs figurent dans la deuxième colonne.

Annexe II – Effet de la direction des aéronefs sur les mesures d'isolation acoustique

Le laboratoire suisse EMPA a déployé des efforts considérables pour mesurer la directionalité horizontale de nombreux types d'aéronefs modernes [18]. Les données de cet organisme ont servi à calculer une directionalité d'aéronef moyenne et à estimer son effet sur le son transmis dans les immeubles.

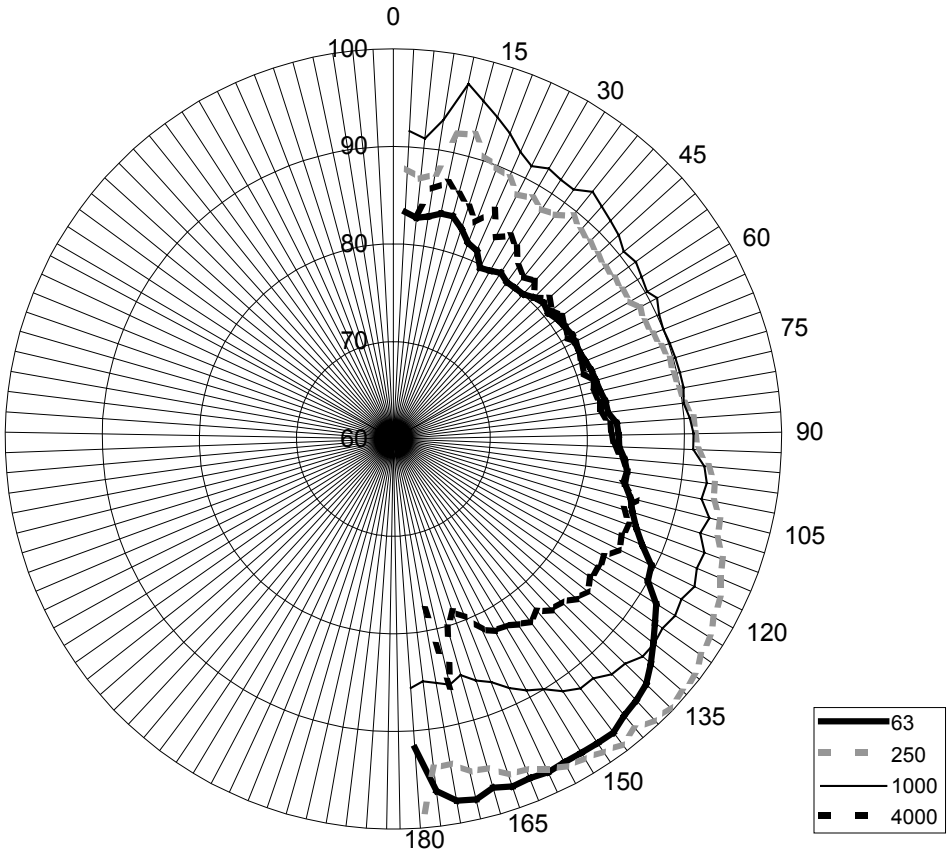


Figure AII-1. Directionalité mesurée à 4 fréquences de bandes d'octaves pour un aéronef B737 en partance (tirée des données EMPA)

La figure AII-1 présente des exemples de directionalité d'aéronefs mesurée dans le cas d'un appareil B737 en partance. L'énergie sonore émise par les aéronefs varie considérablement selon la direction horizontale. Les niveaux sonores ont tendance à être supérieurs aux directions variant entre 120 et 165 degrés par rapport à l'avant en ligne droite aux fréquences basses et moyennes. Dans le présent tracé et d'autres graphiques, la valeur 0 degrés correspond à la direction avant en ligne droite de l'aéronef et la valeur 180 degrés à l'arrière en ligne droite. Dans le présent exemple, les niveaux sonores dans la bande d'octave de 63 Hz sont plus élevés d'environ 18 dB aux angles de 150 à 165 degrés qu'aux angles de 20 à 40 degrés. Cette configuration générale explique le phénomène commun du vrombissement projeté plus bruyant et plus grave d'un aéronef à réaction après qu'il a passé l'auditeur.

Les caractéristiques directionnelles varient d'un type d'aéronef à l'autre. Les aéronefs modernes du Chapitre 3 tendent à émettre des bruits plus omnidirectionnels que ne le font les appareils du Chapitre 2 plus anciens. Pour faciliter la compréhension des différentes caractéristiques du bruit

incident d'aéronefs sur les différentes façades d'un immeuble, une caractéristique directionnelle moyenne a été calculée à partir des données EMPA mesurées. Les données de directionalité sur les types d'aéronefs suivants ont été utilisées dans les calculs : MD11, MD80, A310, A320, B767, B757, B747, B737 et B727.

Les données EMPA de ces neuf types d'aéronefs existaient pour les fréquences de bande d'octave comprises entre 31 et 4 000 Hz par incrément de trois (3) degrés. Ces données ont d'abord été normalisées de sorte que tous les aéronefs présentent le même niveau sonore moyen (de 0 dBA) dans chacune des bandes de fréquences. Les moyennes d'énergie de ces données sur tous les types d'aéronefs ont été calculées en fonction de l'angle. Pour obtenir des renseignements aux mêmes fréquences de tiers d'octave que les données sur l'isolation acoustique, les valeurs ont été interpolées entre les valeurs mesurées des bandes d'octave. Enfin, les polynômes de 5^{e} ordre ont été ajustés aux données moyennes par rapport à l'angle dans chacune des bandes de tiers d'octave. Les équations de régression des polynômes de 5^{e} ordre peuvent servir à décrire une directionalité des aéronefs moyenne. Le tableau AII-1 ci-dessous présente les coefficients de régression tirés de ces équations.

Fréq.	X^5	X^4	X^3	X^2	X	constante
50	-1,954E-09	7,421E-07	-1,093E-04	9,531E-03	-4,687E-01	2,181
63	-1,071E-09	3,585E-07	-4,944E-05	5,325E-03	-3,302E-01	1,059
80	-4,729E-10	7,828E-08	-3,468E-06	1,992E-03	-2,242E-01	0,7689
100	1,439E-10	-2,104E-07	4,389E-05	-1,442E-03	-1,150E-01	0,4697
125	7,425E-10	-4,906E-07	8,986E-05	-4,775E-03	-9,012E-03	0,1793
160	8,135E-10	-4,806E-07	8,161E-05	-3,915E-03	-3,264E-02	0,8605
200	8,866E-10	-4,704E-07	7,311E-05	-3,028E-03	-5,699E-02	1,562
250	9,576E-10	-4,604E-07	6,485E-05	-2,167E-03	-8,062E-02	2,244
315	1,324E-09	-6,295E-07	9,206E-05	-4,056E-03	-2,975E-02	2,201
400	1,702E-09	-8,038E-07	1,201E-04	-6,002E-03	2,266E-02	2,158
500	2,069E-09	-9,729E-07	1,473E-04	-7,891E-03	7,353E-02	2,116
630	3,268E-09	-1,486E-06	2,270E-04	-1,334E-02	2,213E-01	1,343
800	4,504E-09	-2,015E-06	3,093E-04	-1,895E-02	3,735E-01	0,5472
1 000	2,897E-09	-1,407E-06	2,305E-04	-1,496E-02	3,049E-01	1,019
1 250	4,054E-09	-1,893E-06	3,044E-04	-1,986E-02	4,336E-01	0,2353
1 600	5,245E-09	-2,393E-06	3,806E-04	-2,491E-02	5,663E-01	-0,5726
2 000	6,402E-09	-2,879E-06	4,545E-04	-2,982E-02	6,951E-01	-1,357
2 500	7,009E-09	-3,140E-06	4,974E-04	-3,297E-02	7,815E-01	-1,791
3 150	8,573E-09	-3,794E-06	5,979E-04	-3,971E-02	9,559E-01	-2,805
4 000	5,199E-09	-2,541E-06	4,345E-04	-3,075E-02	7,554E-01	-1,227

Tableau AII-1. Coefficients de régression des polynômes de 5^{e} ordre ajustés aux caractéristiques directionnelles moyennes d'aéronefs à réaction modernes.

Les données moyennes normalisées sur la directionalité des aéronefs et les ajustements calculés des polynômes de 5^{e} ordre sont présentés dans les figures AII-2 à AII-8. Ces tracés comprennent également les écarts-types de chacune des valeurs moyennes pour illustrer l'ampleur des variations entre les types d'aéronefs. Les tracés ne portent que sur les fréquences d'octave comprises entre 63 et 4 000 Hz.

Les lignes de régression sont considérées comme des bons ajustements de données mesurées moyennes par rapport à la plupart des points qui concordent à moins d'une fraction d'un décibel. Toutefois, les écarts-types des données mesurées indiquent qu'il existe des différences importantes entre les neuf types d'aéronefs. Les valeurs d'écarts-types varient entre environ 1 et 6 dB, mais la valeur moyenne dans chaque bande de fréquences est inférieure à 3 dB.

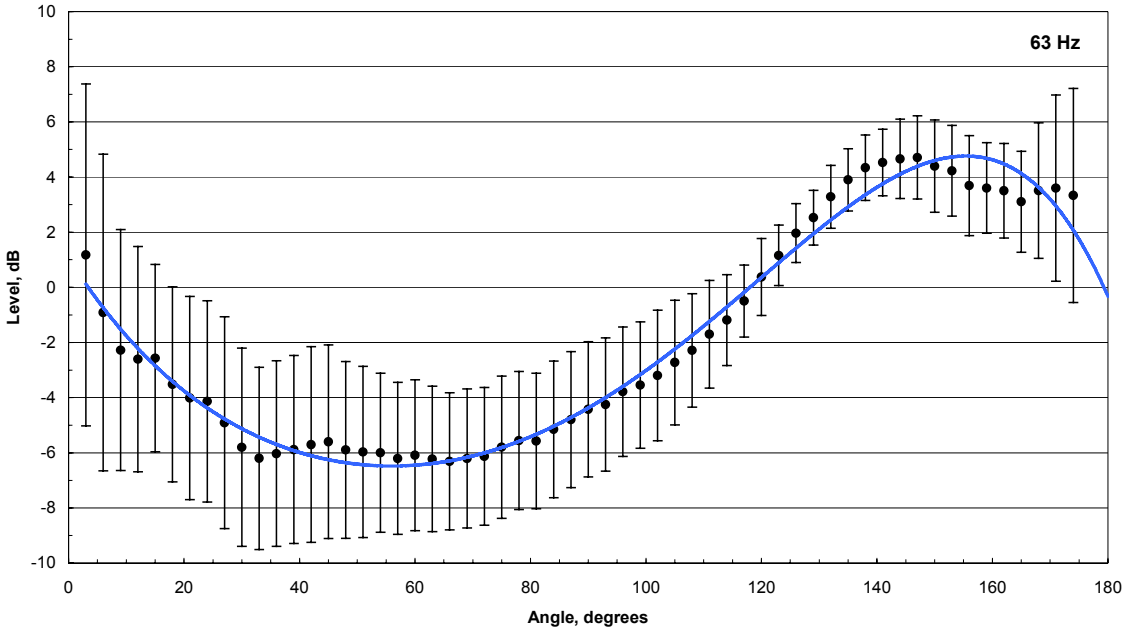


Figure AII-2. Niveaux sonores d'aéronefs moyens normalisés (cercles pleins) par rapport à l'angle horizontal, écarts-types de ces moyennes et ligne d'ajustement optimal des polynômes de 5^{e} ordre (0 degré = droit devant l'aéronef).

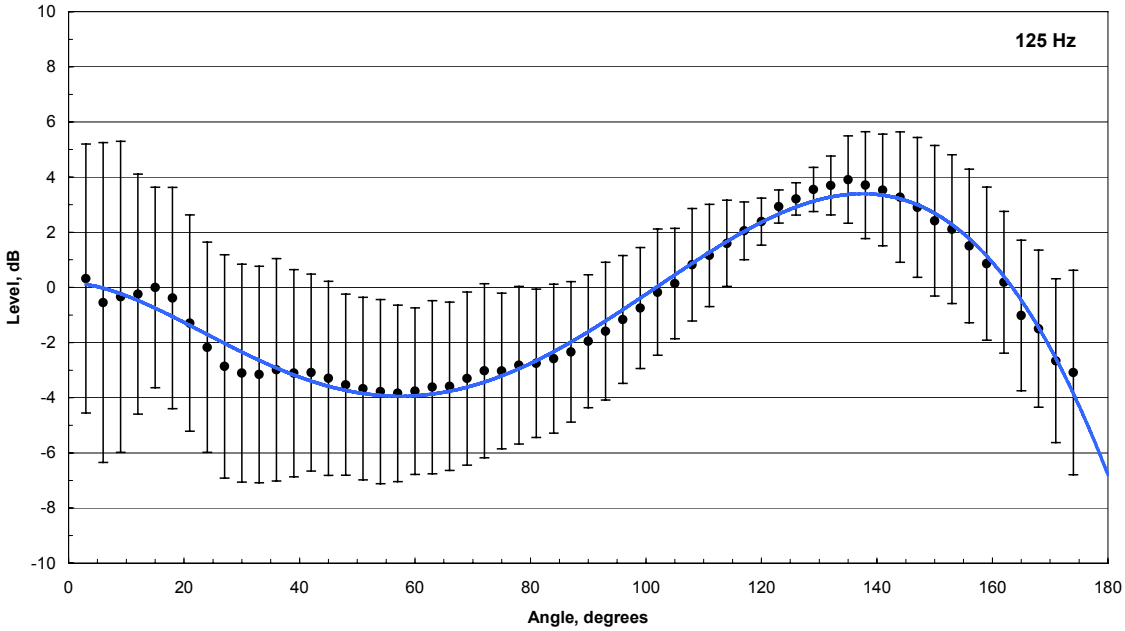


Figure AII-3. Niveaux sonores d'aéronefs moyens normalisés (cercles pleins) par rapport à l'angle horizontal, écarts-types de ces moyennes et ligne d'ajustement optimal des polynômes de 5^{e} ordre (0 degré = droit devant l'aéronef).

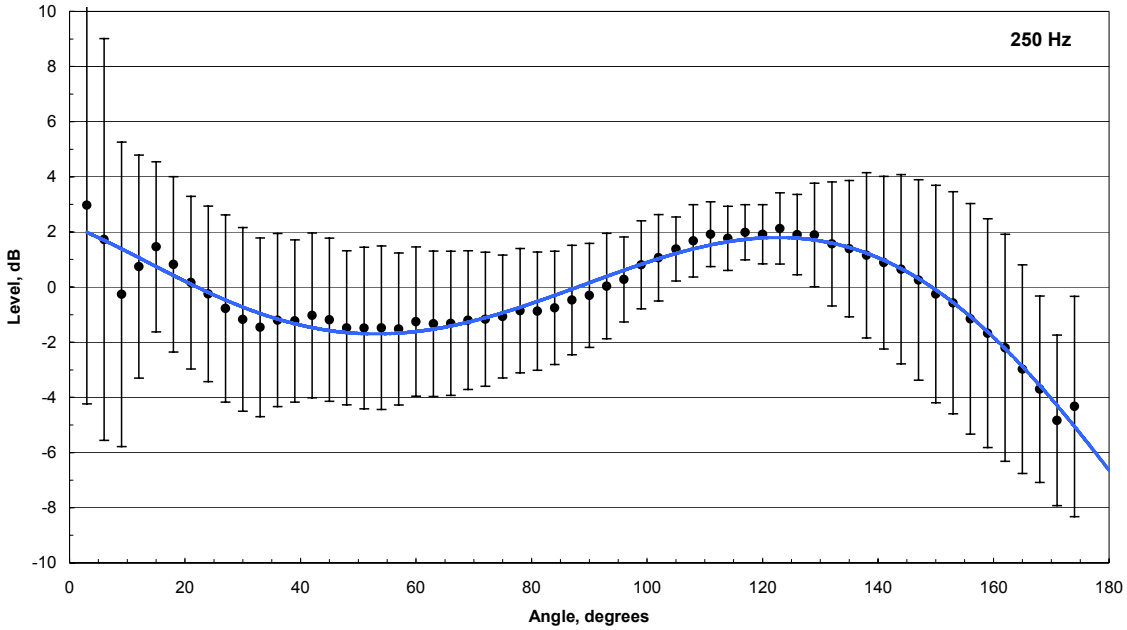


Figure AII-4. Niveaux sonores d'aéronefs moyens normalisés (cercles pleins) par rapport à l'angle horizontal, écarts-types de ces moyennes et ligne d'ajustement optimal des polynômes de 5^{e} ordre (0 degré = droit devant l'aéronef).

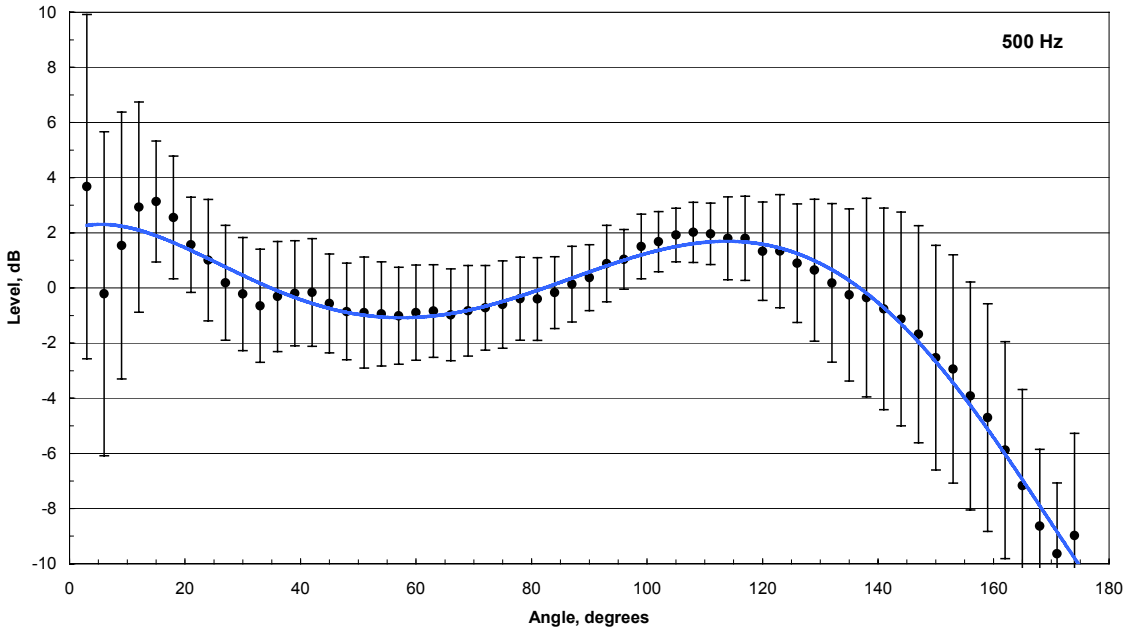


Figure AII-5. Niveaux sonores d'aéronefs moyens normalisés (cercles pleins) par rapport à l'angle horizontal, écarts-types de ces moyennes et ligne d'ajustement optimal des polynômes de 5^{e} ordre (0 degré = droit devant l'aéronef).

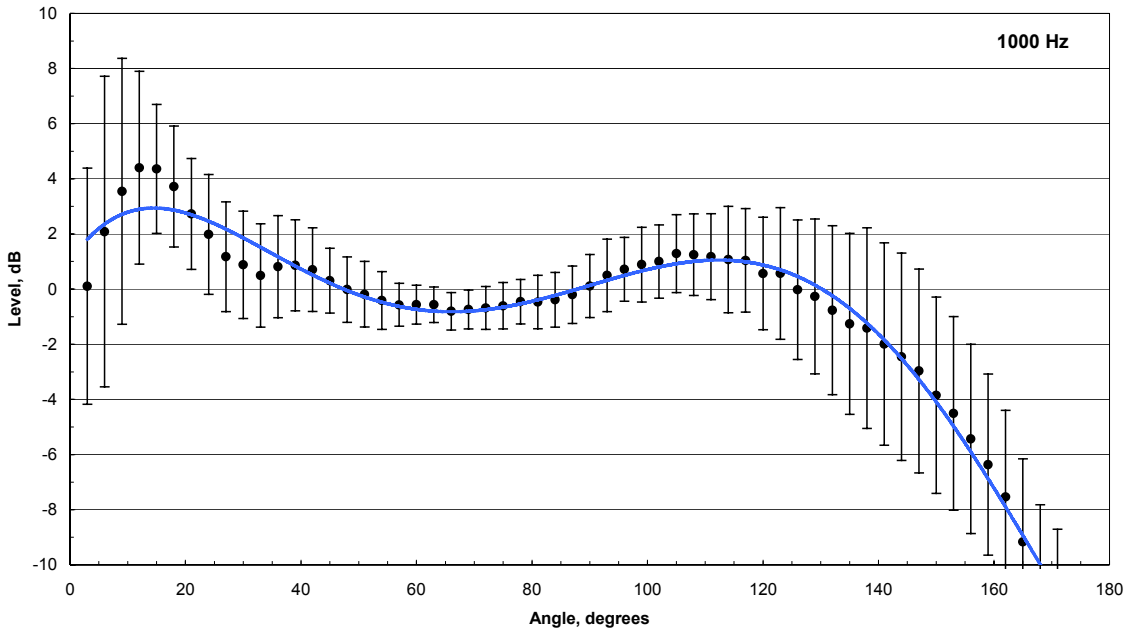


Figure AII-6. Niveaux sonores d'aéronefs moyens normalisés (cercles pleins) par rapport à l'angle horizontal, écarts-types de ces moyennes et ligne d'ajustement optimal des polynômes de 5^{e} ordre (0 degré = droit devant l'aéronef).

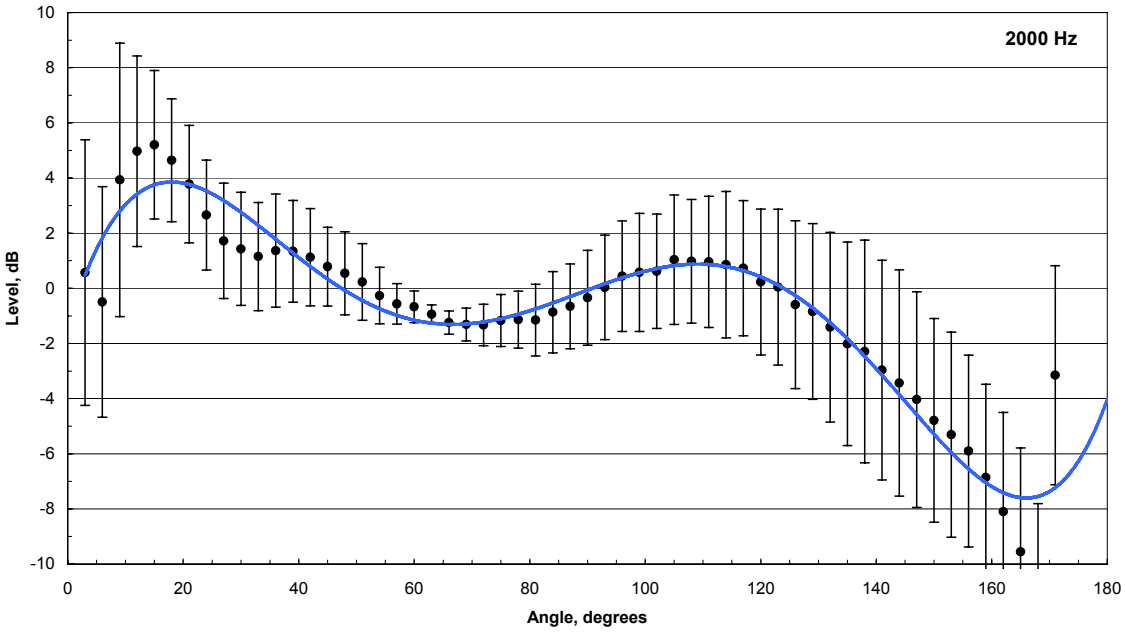


Figure AII-7. Niveaux sonores d'aéronefs moyens normalisés (cercles pleins) par rapport à l'angle horizontal, écarts-types de ces moyennes et ligne d'ajustement optimal des polynômes de 5^{e} ordre (0 degré = droit devant l'aéronef).

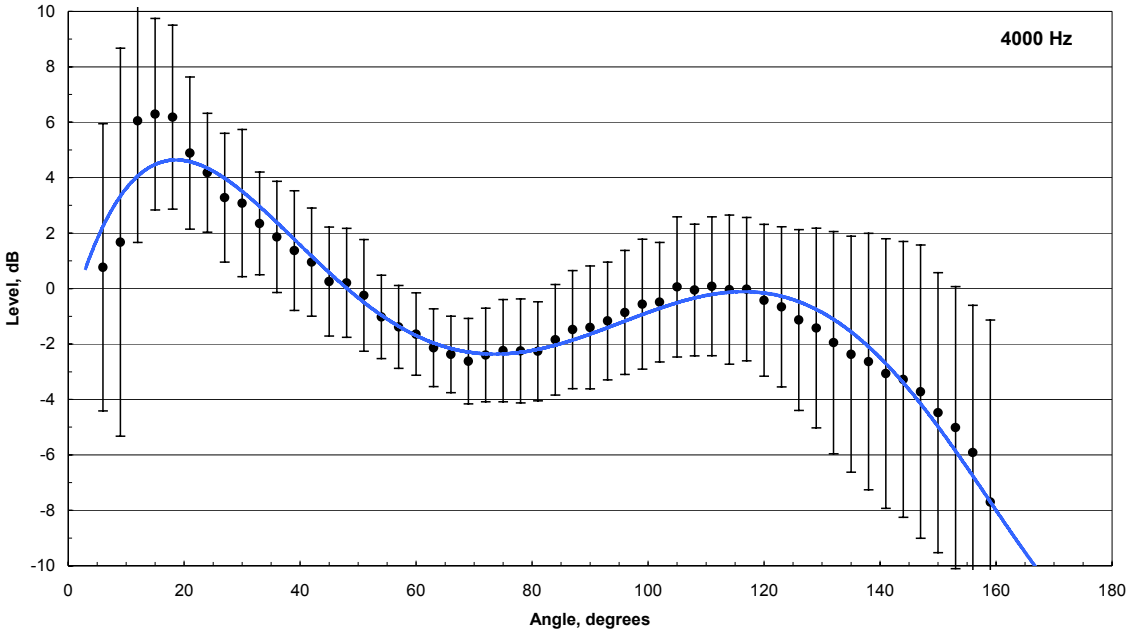


Figure AII-8. Niveaux sonores d'aéronefs moyens normalisés (cercles pleins) par rapport à l'angle horizontal, écarts-types de ces moyennes et ligne d'ajustement optimal des polynômes de 5^{e} ordre (0 degré = droit devant l'aéronef).

Bien que ces résultats constituent un bon estimé des caractéristiques directionnelles moyennes des aéronefs, il faut savoir que les grands écarts-types indiquent que chacun des types d'aéronefs présente des différences importantes.

Lorsqu'un aéronef survole un point donné, le niveau sonore varie d'abord selon la distance de l'aéronef à chaque instant. Cette variation en fonction du temps subit une autre modification causée par la directionalité du bruit d'aéronef. Outre ces deux facteurs, l'énergie incidente sur une façade particulière est associée au cosinus de l'angle d'incidence de l'énergie sonore, qui varie aussi dans le temps au passage de l'aéronef. Il s'agit de l'angle entre la normale par rapport à la surface de la façade et la direction par rapport à l'aéronef. La variation dans le temps de l'intensité sonore incidente peut être calculée comme suit :

$$L_i(t) = 10 \log\{Q(f)\ COS(\theta) / r^2\},\ dB \qquad \text{(AII.1)}$$

Q(f) étant le facteur de directivité de l'aéronef à la fréquence f,

θ étant l'angle d'incidence par rapport à la façade,

r étant la distance entre la façade et l'aéronef en mètres.

L'équation AII.1 a servi à calculer les durées de passage d'aéronefs propres à l'intensité incidente sur différentes façades. Cela comprend une façade (avant) donnant directement sur le passage d'aéronef, c.-à-d. parallèle à la trajectoire de vol de l'aéronef. Cette opération était censée estimer les conditions sur la façade avant de la SEAO. La figure AII-9 illustre les durées de passage calculées sur la façade avant à des fréquences représentatives de 63, de 500 et de 4 000 Hz. Aux fins de comparaison, les tracés montrent une variation $1/r^2$ simple, c.-à-d. excluant la directionalité des aéronefs. Les résultats de la figure AII-9

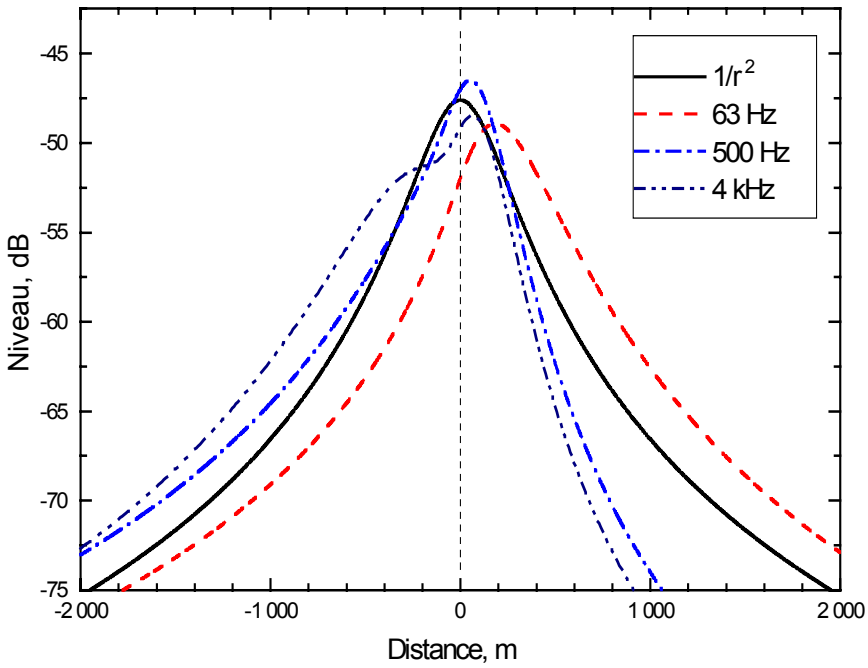


Figure AII-9. Variation calculée de l'intensité sonore pour une façade donnant directement au passage de l'aéronef (récepteur à 240 m de la trajectoire de vol).

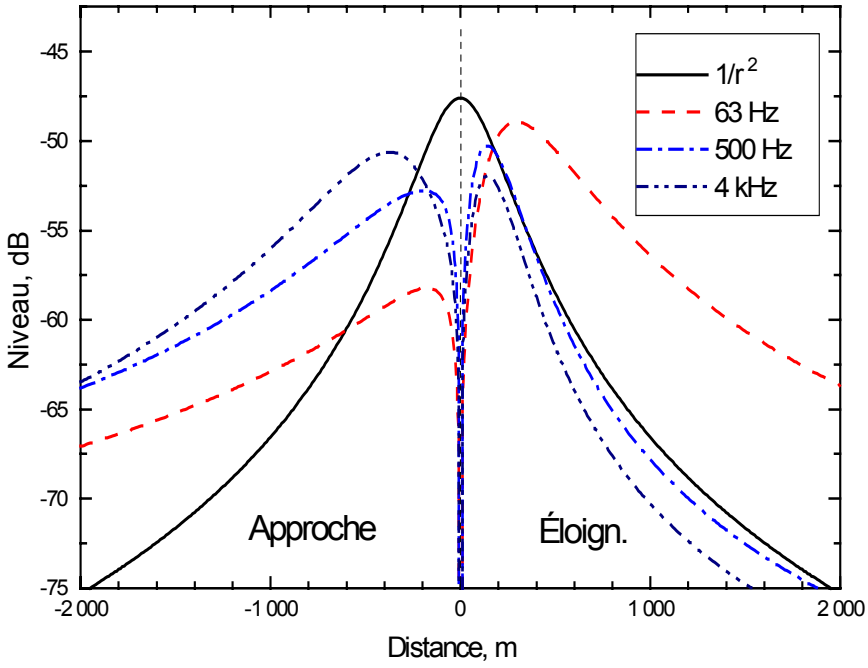


Figure AII-10. Variation calculée de l'intensité sonore pour des façades perpendiculaires aux passages d'aéronefs. La moitié gauche du graphique représente une façade vers laquelle les aéronefs s'approchent et la moitié droite une façade dont ils s'éloignent (récepteur à 240 m de la trajectoire de vol).

indiquent que les niveaux sonores des aéronefs culminent après la mi-course du passage comme cela était prévu d'après les mesures de directivité. L'effet est le plus marqué aux basses fréquences.

Les variations calculées de l'intensité incidente aux façades perpendiculaires à la trajectoire de vol des aéronefs sont illustrées dans la figure AII-10. Le côté gauche du graphique représente la façade vers laquelle les aéronefs s'approchent et le côté droit la façade dont ils s'éloignent. Les résultats de ce graphique diffèrent de ceux de la figure AII-9 parce que la variation selon le cosinus de l'angle d'incidence dépend d'un angle d'incidence qui varie de 90 degrés entre les façades avant et perpendiculaires. Dans le cas des deux façades perpendiculaires, la variation dans le temps est assez différente de l'effet $1/r^2$ simple et il n'existe aucune crête lorsque les aéronefs se trouvent à mi-course de la trajectoire de vol.

Par l'addition de toute l'énergie incidente des passages complets des aéronefs, ces calculs ont été poussés plus loin de façon à estimer l'énergie sonore incidente totale à chaque façade. Les différences entre les deux façades perpendiculaires et la façade avant sont illustrées dans la figure AII-11. Chacune des façades perpendiculaires n'est exposée qu'à la moitié du passage complet d'un aéronef, ce qui laisse entendre que les intensités incidentes sont de 3 dB inférieures à celles de la façade avant. Toutefois, la directionalité des aéronefs modifie davantage cette situation et les différences réelles de la figure AII-11 varient de –7 à + 1 dB. Ainsi, l'énergie sonore incidente prévue est censée varier selon l'orientation de la façade par rapport à la trajectoire de vol des aéronefs ainsi que selon la directionalité du bruit émis par un aéronef particulier. Ces calculs donnent un premier estimé des différences probables du bruit incident des aéronefs aux différentes façades. Cependant, ils ne comprennent pas les effets des réflexions au sol qui peuvent varier selon l'orientation des façades. En outre, ils ne tiennent pas compte des différences entre les types d'aéronefs ni des différences dans les voies de transmission indirecte des différentes façades de l'immeuble.

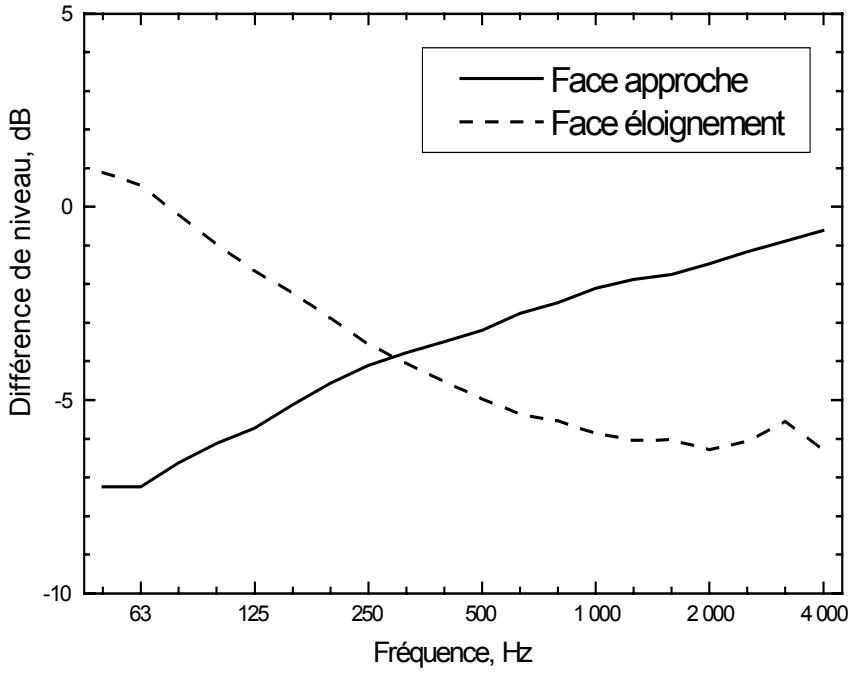


Figure AII-11. Variation de l'intensité sonore incidente totale selon la fréquence aux deux façades perpendiculaires par rapport à la façade avant.

Annexe III. Brouillage entre les bruits d'aéronefs direct et réfléchi au sol

La présente annexe résume les résultats des calculs réalisés pour indiquer les effets du son réfléchi au sol sur les niveaux sonores incidents des aéronefs sur la façade d'un immeuble. Les calculs portaient sur un aéronef source volant selon une trajectoire horizontale à une hauteur et à une distance particulières par rapport à un point de mesure. Ce point de mesure se trouvait à une hauteur précise au-dessus du sol.

Les calculs les plus simples supposaient une source omnidirectionnelle et une surface au sol parfaitement réfléchissante. Puis, les caractéristiques directionnelles d'aéronefs moyens ont été ajoutés à la source. Par la suite, l'effet d'absorption par le sol plus réaliste a été pris en considération. Les effets de la combinaison de sons direct et réfléchi au sol ont ensuite été examinés selon différentes hauteurs de récepteur et différents angles verticaux des aéronefs, à des distances variées entre la trajectoire de vol et le récepteur. Les résultats sont illustrés pour des situations semblables à celles qui étaient visées par les mesures.

Pour réaliser les calculs, la source a été déplacée le long de la trajectoire de vol par étape de 10 m à partir d'une position située à 1000 m avant le point de mesure jusqu'à une position se trouvant à 1000 m après le point de mesure. Pour chaque incrément, la pression acoustique efficace combinée des sons direct et réfléchi au sol a été calculée comme suit :

$$P = \left\{ \frac{1}{r_d} + \frac{1}{r_r} COS\left[(r_r - r_d) 2\pi / \lambda \right] \right\} \qquad \text{(AIII.1)}$$

r_d étant la longueur de la trajectoire directe, m

r_r étant la longueur de trajectoire réfléchie au sol, m

λ étant la longueur d'onde, m

Les valeurs de la pression au carré pour chaque incrément ont ensuite été additionnées pour toutes les positions de la source de façon à calculer l'énergie sonore incidente totale découlant de la combinaison particulière de sons direct et réfléchi au sol.

La combinaison de sons direct et réfléchi au sol provoque des modèles d'interférence (ou brouillage) assez complexes à mesure que la source s'éloigne du récepteur. À certaines positions et à certaines fréquences, les sons direct et réfléchi au sol s'additionnent en phase pour créer des augmentations maximales de 6 dB par rapport au seul son direct. À d'autres positions, et/ou à d'autres fréquences, la combinaison peut entraîner des réductions importantes du niveau sonore total par rapport au niveau du seul son direct. Les figures AIII-1 et AIII-2 présentent les variations détaillées en fonction du temps des passages qui illustrent certains de ces effets complexes d'interférence.

La figure AIII-1 comprend les résultats de l'essai dans lequel le récepteur se trouvait à 240 m de la trajectoire de vol et la figure AIII-2 illustre l'essai dans lequel le récepteur était placé à 480 m de la trajectoire de vol. La SEAO était située à 240 m de la trajectoire de vol nominale. Dans chaque essai, le récepteur était à 1,65 m au-dessus du sol et la source passait au niveau du récepteur à un angle vertical de 55 degrés. Aux fins de comparaison, chaque tracé comprend également la variation $1/r^2$ simple prévue dans le cas du son direct provenant d'une source omnidirectionnelle. À certaines positions, les effets combinés calculés du son direct et des réflexions au sol atteignent jusqu'à 6 dB de plus que les résultats $1/r^2$, mais à d'autres positions,

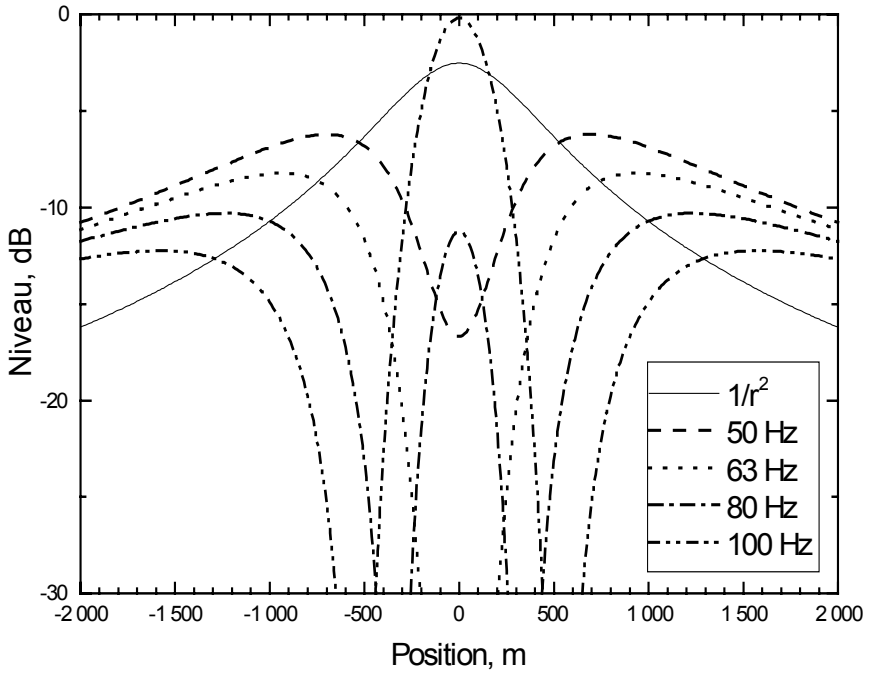


Figure AIII-1. Variations en fonction du temps calculées pour une source omnidirectionnelle survolant une surface au sol parfaitement réfléchissante située à 240 m de la trajectoire de vol à quatre fréquences différentes.

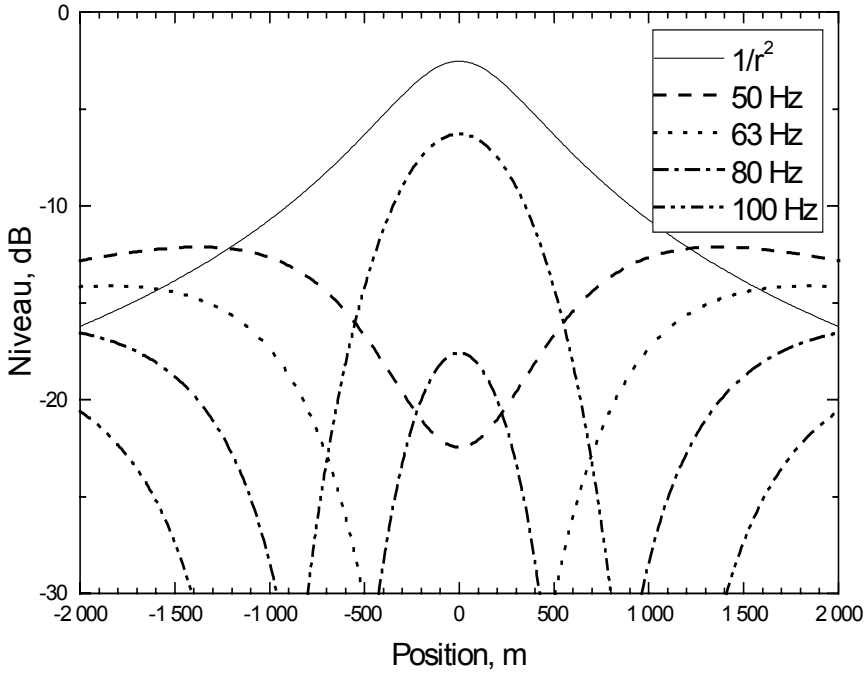


Figure AIII-2. Variations en fonction du temps calculées pour une source omnidirectionnelle survolant une surface au sol parfaitement réfléchissante située à 480 m de la trajectoire de vol à quatre fréquences différentes.

les niveaux calculés sont de beaucoup inférieurs à ce résultat. Dans la figure AIII-1, le résultat à 50 Hz indique un minimum plutôt qu'un maximum au centre du passage. À 63 Hz, cette chute s'accroît. À 80 Hz, le minimum du centre est divisé en deux minima distincts séparés par une légère crête. À 100 Hz, ce maximum du centre est supérieur au résultat $1/r^2$. Aux fréquences supérieures, les modèles d'interférence deviennent plus complexes de sorte qu'il existe de nombreuses crêtes et de nombreux minima.

La figure AIII-2 présente des variations semblables en fonction du temps calculées pour un récepteur se trouvant à 480 m de la trajectoire de vol. La hauteur du récepteur (1,65 m) et l'angle vertical de la source (55 degrés) étaient les mêmes que dans les résultats précédents. Les variations en fonction du temps calculées s'apparentent à celles de la figure AIII-1 sauf qu'elles sont plus étalées dans le temps. Cela se traduit par des réductions globales supérieures des niveaux sonores des passages dans la partie centrale clé du passage.

De nombreux tracés complexes de variations en fonction du temps auraient pu être produits mais, pour simplifier la démonstration des effets des paramètres clés, seules les sommes d'énergie relevées dans les passages complets sont présentées. Ces graphiques représentent les niveaux sonores par rapport à ceux qui étaient prévus pour le seul son direct sans réflexion au sol.

La figure AIII-3 comprend les niveaux relatifs additionnés tant dans le cas d'une source omnidirectionnelle que d'une source dont la directionalité d'aéronefs moyens est calculée dans l'annexe II. L'effet de la directionalité de la source semble négligeable. Tous les autres calculs illustrés ci-dessous ne comprennent que les sources possédant cette directionalité d'aéronefs moyens.

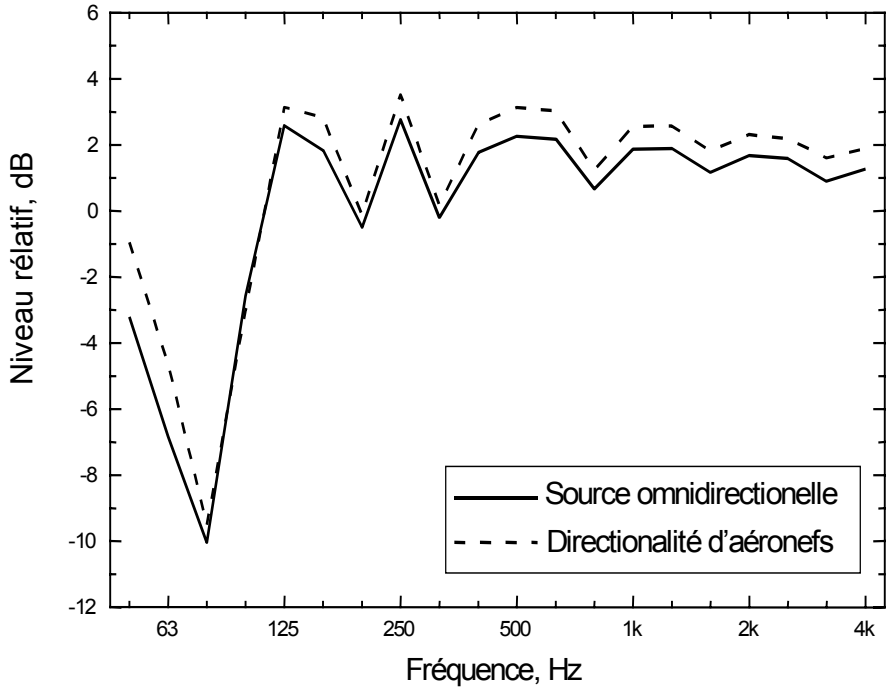


Figure AIII-3.Niveaux relatifs additionnés de passages complets dans le cas d'un récepteur placé à 1,65 m au-dessus du sol et à 240 m de la trajectoire de vol et pour une surface au sol parfaitement réfléchissante. Pour les sources omnidirectionnelles et de directionalité d'aéronefs moyens, l'angle vertical était de 55 degrés.

Les coefficients de réflexion d'un sol absorbant ont été estimés à partir des données d'impédance publiées pour des surfaces au sol [17]. Quant aux ondes planes, le coefficient de réflexion, R_p, renvoie à l'angle d'incidence φ comme suit :

$$R_p = (Z_s \sin \varphi - 1)/(Z_s \sin \varphi + 1) \quad \text{(AIII.1)}$$

Si $Z_s = R + iX$, la magnitude de R_p est établie comme suit : (AIII.2)

$$R_p = \sqrt{[(R\sin \varphi - 1)^2 + (X \sin \varphi)^2]} \,/\, \sqrt{[(R\sin \varphi + 1)^2 + (X \sin \varphi)^2]} \quad \text{(AIII.3)}$$

Cela a entraîné la variation des valeurs R_p de 0,9 à 50 Hz à 0,2 à 5 000 Hz, ce qui représente des estimés raisonnables dans le cas de surfaces au sol types.

D'autres calculs ont été réalisés, soit la multiplication de la valeur de réflexion au sol de l'équation AIII-1 par ces valeurs R_p. La figure AIII-4 compare les résultats portant sur une surface au sol parfaitement réfléchissante avec ceux qui comprenaient les estimés des coefficients de réflexion d'une surface au sol type. L'addition de l'absorption par le sol fait légèrement passer le minimum d'interférence à 80 Hz et réduit les niveaux accrus aux fréquences moyennes et hautes.

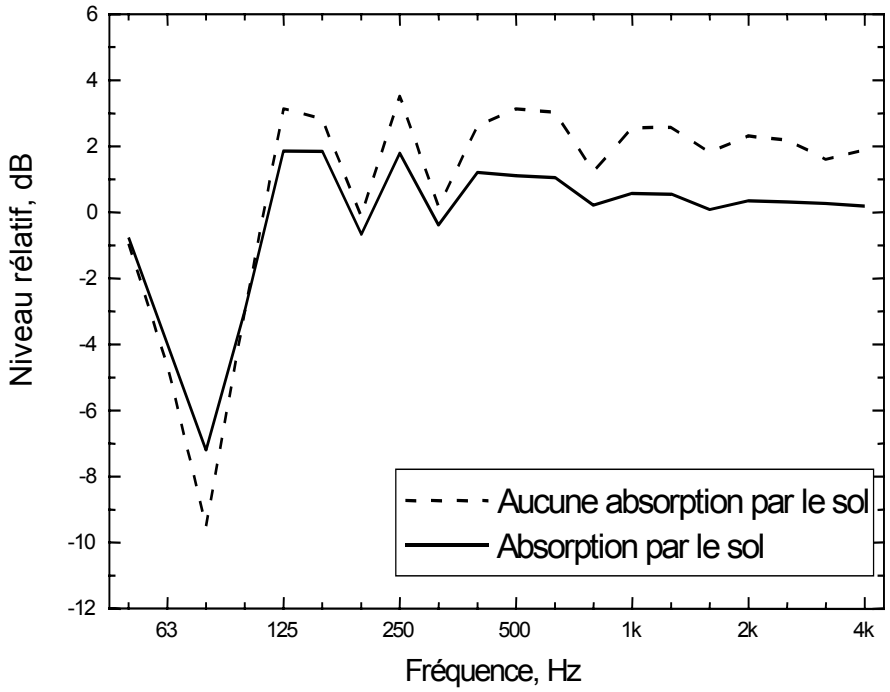


Figure AIII-4. Comparaison des niveaux relatifs additionnés de passages complets par rapport au seul son direct pour un récepteur placé à 1,65 m au-dessus du sol et à 240 m de la trajectoire de vol. La source comprenait la directionalité d'aéronefs moyens et se trouvait à un angle vertical de 55 degrés.

Il a été démontré que la hauteur du récepteur avait un effet plus important sur les résultats calculés. La figure AIII-5 compare trois hauteurs de récepteur : 1,65, 2,13 et 4,35 m. Celles-ci correspondent à la hauteur de façade moyenne à la SEAO (1,65 m), à la hauteur du microphone de façade des mesures aux habitations à proximité de l'aéroport de Toronto (2,13 m) et à la hauteur type du milieu de la façade d'une pièce de deuxième étage (4,35 m).

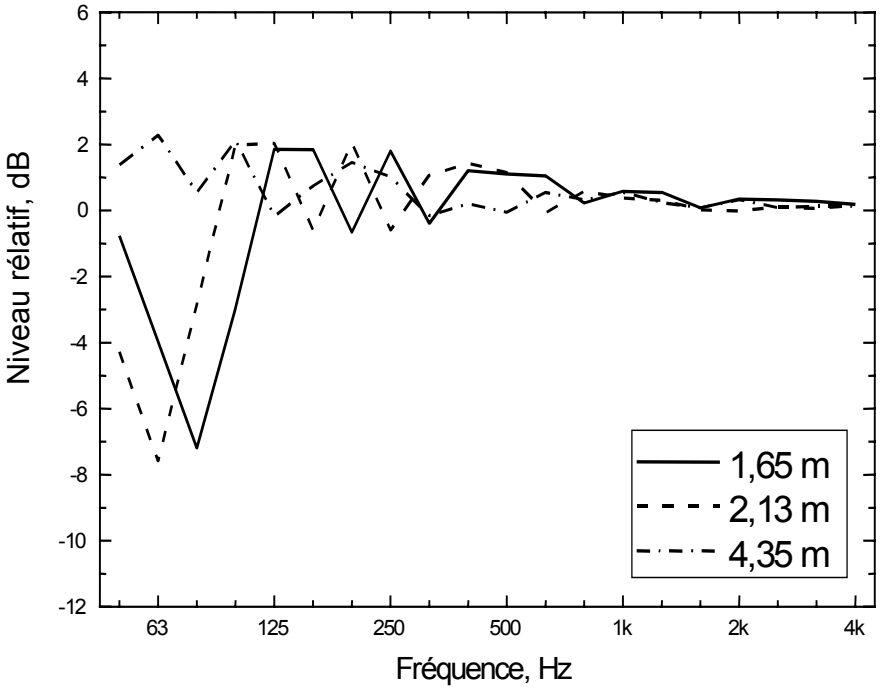


Figure AIII-5. Comparaison des niveaux relatifs additionnés de passages complets pour un récepteur placé à différentes hauteurs et à 240 m de la trajectoire de vol en présence d'une surface au sol absorbante. La source comprenait la directionalité d'aéronefs moyens et se trouvait à un angle vertical de 55 degrés.

L'élévation du récepteur de 1,65 m à 2,13 m fait passer le minimum d'interférence de 80 à 63 Hz. Toutefois, lorsque le récepteur est placé à 4,35 m, ce qui représente la façade d'un deuxième étage, l'interférence minimale est censée passer à une fréquence très basse et l'effet global sur le son réfléchi au sol est infime. Ainsi, bien que les réflexions au sol puissent réduire l'énergie sonore incidente à basses fréquences sur des façades de rez-de-chaussée, les effets des réflexions au sol sont minimes aux étages supérieurs.

L'angle vertical de la source et la distance entre le récepteur et la trajectoire de vol influent tous deux sur les résultats calculés comme l'illustrent les figures AIII-6 et AIII-7. Dans la figure AIII-6 portant sur un récepteur situé à 240 m de la trajectoire de vol, l'angle vertical de 55 degrés de la source entraîne un minimum d'interférence à 80 Hz. Il s'agit de l'angle vertical moyen d'aéronefs mesuré à la SEAO et ce résultat calculé est en concordance acceptable avec les estimés de l'effet des réflexions au sol présentées dans la section 3.1.2. La fréquence de l'interférence minimale est décalée systématiquement selon les variations de l'angle vertical de la source.

Des variations semblables de la fréquence des minima d'interférence sont constatées dans les résultats de la figure AIII-7 qui porte sur un récepteur placé à 480 m de la trajectoire de vol. Toutefois, dans ces résultats, la profondeur du minimum est nettement supérieure. Comme l'illustre la figure AIII-2, la distance supérieure de la trajectoire de vol étale le modèle d'interférence et entraîne les réductions globales plus grandes relevées dans la figure AIII-7.

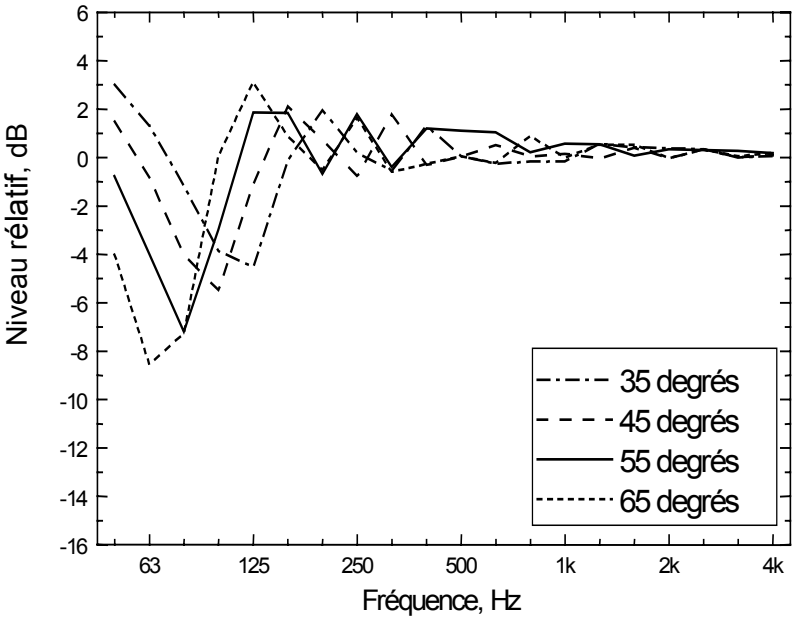


Figure AIII-6. Comparaison des niveaux relatifs additionnés de passages complets d'aéronefs sources à des angles verticaux différents. Le récepteur était placé à 1,65 au-dessus du sol et à 240 m de la trajectoire de vol en présence d'une surface au sol absorbante. La source comprenait la directionalité d'aéronefs moyens.

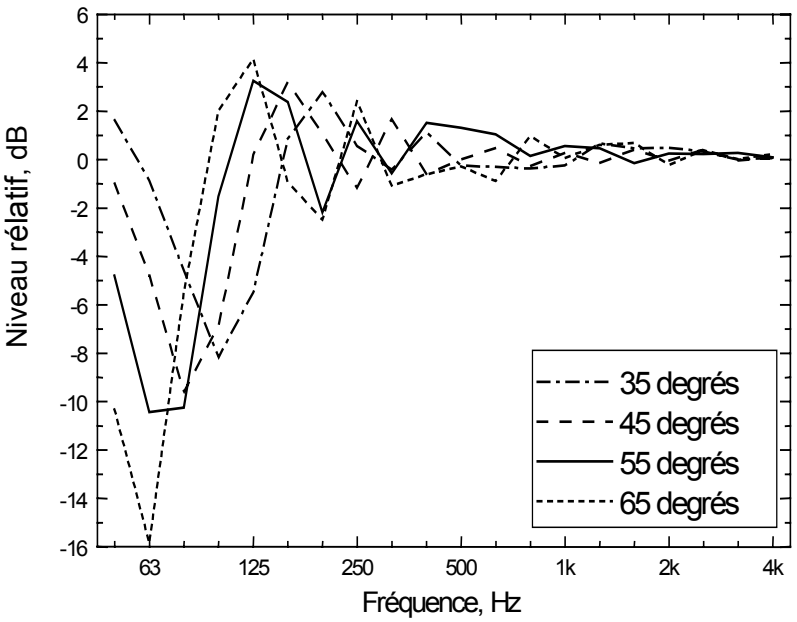


Figure AIII-7. Comparaison des niveaux relatifs additionnés de passages complets d'aéronefs sources à des angles verticaux différents. Le récepteur était placé à 1,65 au-dessus du sol et à 480 m de la trajectoire de vol en présence d'une surface au sol absorbante. La source comprenait la directionalité d'aéronefs moyens.

Ces calculs ne correspondent qu'approximativement aux conditions de mesures réelles. Cependant, ils sont censés illustrer fidèlement les effets des paramètres clés. Les écarts entre ces calculs et les résultats de mesure sont causés aux différences de la directionalité d'aéronefs particuliers et aux différences des propriétés réfléchissantes de la surface au sol réelle. Les calculs supposaient des combinaisons cohérentes simples des sons direct et réfléchi au sol. En réalité, la turbulence atmosphérique provoque des variations aléatoires de la phase des deux sons qui varieront selon la fréquence et la distance de la source sonore. La turbulence risque probablement de changer d'une journée à l'autre selon les conditions climatiques. Pareille turbulence pourrait réduire l'ampleur des différents effets d'interférence, il est difficile d'estimer l'importance de ces réductions.