

Etude des effets du bâti sur l'exposition sonore en milieu aéroportuaire - approfondissement de l'étude menée en 2012-2013

Etude réalisée pour le compte de :

ACNUSA



SOLDATA
ACOUSTIC



Rapport d'étude RA-130280-01-F
11 juin 2015

Intervenants

Alexis BIGOT
Jérôme GOULEME
Laurent DROIN
Amandine MOULIN

Sommaire

Synthèse non technique	3
1. Contexte et objectifs.....	4
2. Démarche méthodologique.....	4
3. Données d'entrée	5
3.1 Type d'avion et trajectoires	5
3.2 Sélection de zones de calculs.....	5
3.3 Configurations urbaines retenues	6
3.4 Indicateurs acoustiques	8
4. Simulations acoustiques.....	10
5. Synthèse des effets observés.....	11
5.1 Bâtiments non parallèles.....	11
5.2 Pyramide décroissante « lisse »	12
5.3 Pyramide décroissante à paliers.....	13
5.4 Pyramide croissante « lisse »	15
5.5 Pyramide croissante à paliers.....	16
5.6 Bâtiment avec balcons inclinés.....	18
6. Campagne de mesure de bruit à Toulouse.....	19
6.1 Présentation du site et méthodologie de mesurage	19
6.2 Résultats de mesures	21
6.3 Simulation acoustique du site de mesure	22
7. Conclusion	24
<i>Annexe 1. Configurations de calcul AzB.....</i>	<i>25</i>
<i>Annexe 2. Configurations de calcul ISO 9613</i>	<i>28</i>
<i>Annexe 3. Fiches de mesures détaillées.....</i>	<i>30</i>

	<i>Ind</i>	<i>Date</i>	<i>Rédaction</i>	<i>Vérification</i>	<i>Approbation</i>
Révisions	A	04.12.13	A. BIGOT	L. DROIN	
	B	17.01.14	A. BIGOT	L. DROIN	
	C	29.10.14	A. BIGOT	L. DROIN	C. BOUTIN
	D	28.01.15	A. BIGOT	L. DROIN	A. BIGOT
	E	31.03.15	A. BIGOT	L. DROIN	A. BIGOT
	F	11.06.15	A. BIGOT	L. DROIN	A. BIGOT

Synthèse non technique

Soldata Acoustic a réalisé en 2012-2013 une étude exploratoire visant à évaluer, au travers de simulations numériques simples, l'effet lié à la présence de bâti sur les niveaux sonores en limite de PGS. Cette étude avait permis de dégager quelques tendances intéressantes, portant par exemple sur des formes de bâtiments favorisant l'obtention de façades calmes, ou plans-masses à éviter.

L'objet est ici d'approfondir cette étude dans une phase prospective visant d'une part à renforcer la robustesse des résultats et, d'autre part, à affiner les recommandations qui pourront en être déduites.

Cette phase prospective se décline selon 2 volets complémentaires :

- **Volet 1 : approfondissement de l'approche théorique**, ayant pour objectif de réaliser des tests de simulation sur des configurations de bâti plus complexes – et plus proches de la réalité –, en recherchant à minimiser les effets de réflexions multiples entre façades.
- **Volet 2 : renforcement de la validation par des mesures acoustiques sur site**, ayant pour objectif de valider les résultats « in situ » à l'aide de données objectives issues de mesures acoustiques sur des sites réels.

Certains principes bénéfiques se dégagent des simulations numériques complémentaires effectuées dans le cadre du volet 1, avec notamment des formes urbaines intéressantes ; il s'agit par exemple de bâtiments ayant des éléments de façade inclinés vers le ciel, ou dans une moindre mesure, de pyramides décroissantes à paliers. Ces effets peuvent également être exploités en les combinant avec d'autres formes urbaines intéressantes (par exemple la forme en U-V).

Les mesures acoustiques réalisées dans le cadre du volet 2 à proximité de l'aéroport de Toulouse-Montaudou ont permis de s'assurer que les atténuations acoustiques calculées par le modèle acoustique CADNA-A sont globalement cohérentes avec les atténuations mesurées « in situ ».

En conclusion, les grands principes qui se dégagent de cette étude (et de la précédente) en termes de moyens de protection sont les suivants :

- Travailler sur la hauteur et l'orientation des bâtiments en fonction de la situation du lieu par rapport aux trajectoires.
- Etudier des formes de bâti (ex: forme en « U-V », en évitant si possible des bâtiments trop proches).
- Améliorer l'architecture du bâti à l'aide de casquettes horizontales au dernier étage.
- Limiter les réflexions entre bâtiments grâce à la pose d'un absorbant de façade (ex : façade végétalisée), avec si possible un sol végétal entre les bâtiments.

En résumé, des moyens de protection existent, mais ils doivent être pensés le plus en amont possible des projets d'urbanisation. On retiendra qu'un bâtiment bien placé et bien orienté par rapport aux trajectoires permet d'offrir une façade relativement protégée en zone de bruit, ce qui permet d'ouvrir les fenêtres sans être exposé à un bruit intolérable.

1. Contexte et objectifs

Dans le cadre de ses missions, l'ACNUSA a souhaité améliorer la connaissance des effets du bâti sur l'exposition au bruit des populations riveraines d'aéroports, pour pouvoir émettre des recommandations en faveur du renouvellement urbain dans les zones exposées (incluse dans les PEB) sans pour autant détériorer la qualité de vie des habitants. La finalité est, dans la logique de la loi SRU, de permettre aux communes de densifier l'urbanisation pour éviter notamment la paupérisation et le mitage de certaines zones. Parallèlement, une meilleure connaissance des effets du bâti sur la propagation du bruit des aéronefs en milieu urbanisé pourrait permettre, à une échelle locale, une meilleure prise en considération des habitations situées en limite extérieure de PGS.

Soldata Acoustic a ainsi réalisé, à la demande de l'ACNUSA, une étude exploratoire visant à évaluer en première approche la nature des effets susceptibles d'être exploités en matière d'urbanisme, sur la base d'un panel de cas-tests fictifs. La méthodologie proposée a consisté à analyser la présence de bâti au travers de simulations numériques portant sur des typologies urbaines très simples, en examinant notamment la notion de "façades calmes" telle qu'elle est utilisée dans le domaine de la protection du bruit des infrastructures de transports terrestres. Un modèle numérique simplifié a été mis au point à partir de codes de calculs existants (AzB, ISO 9613) pour s'adapter à la fois aux spécificités d'émission du bruit des aéronefs et aux paramètres de propagation du bruit en milieu urbain.

Les résultats de simulations sur un grand nombre de configurations simples ont conduit à dégager quelques tendances intéressantes, portant par exemple sur des formes de bâtiments favorisant l'obtention de façades calmes, ou plans-masses à éviter.

Cette étude a fait l'objet d'un rapport de synthèse (réf. RA-110337-01-B) en mars 2013, d'une présentation lors du Salon du Bourget en juin 2013 et d'un article dans la revue Acoustique & Technique.

L'objectif est ici d'approfondir l'étude dans une phase prospective visant d'une part à **renforcer la robustesse des résultats** et, d'autre part, à **affiner les recommandations** qui pourront en être déduites.

En fonction de la pertinence des conclusions de cette phase d'étude, ces recommandations pourront alors être diffusées par l'ACNUSA auprès des urbanistes et décideurs intéressés par cette problématique.

2. Démarche méthodologique

Partant des principes méthodologiques mis en œuvre lors de l'étude initiale, la démarche d'étude proposée dans cette phase prospective se déclinera selon 2 volets complémentaires :

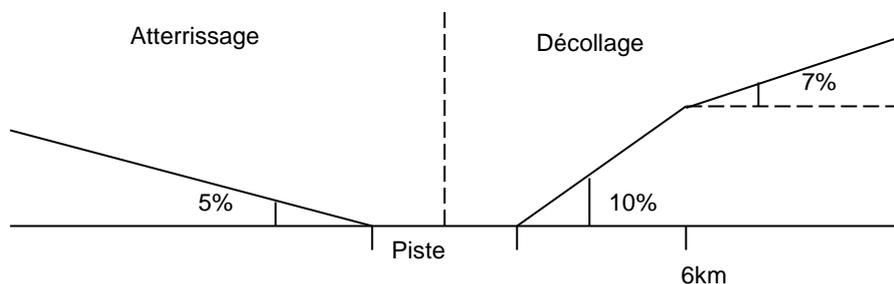
- **Volet 1 : approfondissement de l'approche théorique**, ayant pour objectif de réaliser des tests de simulation sur des configurations de bâti plus complexes – et plus proches de la réalité –, en recherchant à minimiser les effets de réflexions multiples entre façades. Des simulations numériques sont réalisées à l'aide du logiciel CadnaA, sur la base du modèle numérique développé et validé dans le cadre de l'étude précédente (cf. rapport RA-110337-01-B et configurations de calcul rappelées en Annexes 1 et 2).
- **Volet 2 : renforcement de la validation par des mesures acoustiques sur site**, ayant pour objectif de valider les résultats « in situ » à l'aide de données objectives issues de mesures acoustiques sur sites réels.

3. Données d'entrée

3.1 Type d'avion et trajectoires

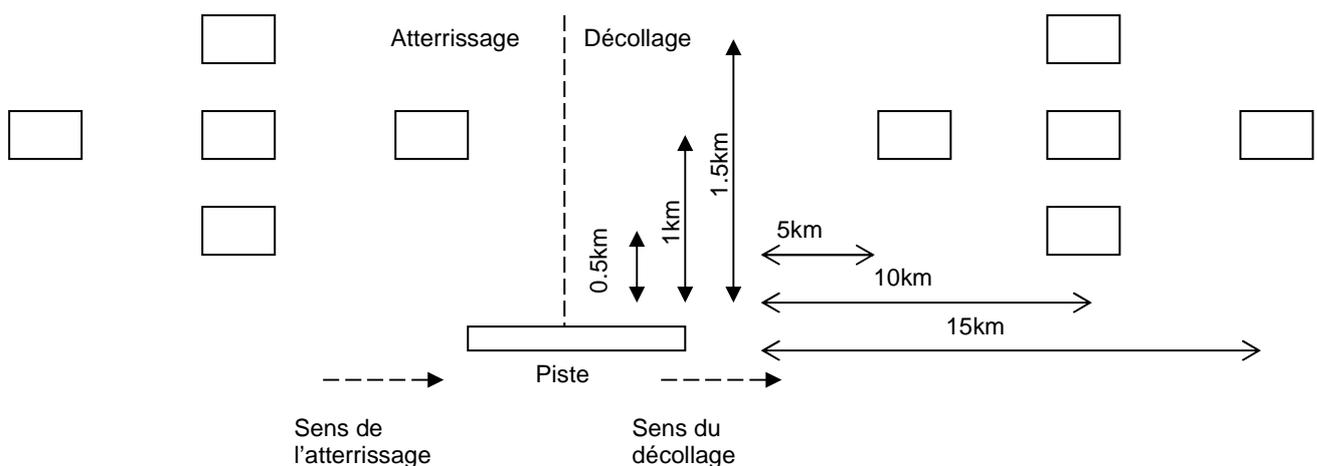
Le type d'avion retenu est l'A320, celui-ci étant considéré comme un modèle représentatif de la flotte aérienne circulant sur le territoire français.

Les trajectoires sont rectilignes, dans l'axe de la piste, testées avec des pentes à 5% pour l'atterrissage, et 10% pour le décollage (réduit à 7% au-delà de 6 km des pistes) comme indiqué sur le schéma suivant :



3.2 Sélection de zones de calculs

Dix zones de calcul ont été choisies, en concertation avec l'ACNUSA, de part et d'autre et à différentes distances des pistes d'un aéroport. Les configurations de calculs portent à la fois sur l'atterrissage et le décollage. Ces zones ont été sélectionnées pour être représentatives d'une typologie de situations d'exposition sonore vis-à-vis du bruit aéroportuaire en limite de PGS. Ces positions / configurations de calculs sont figurées sur le schéma ci-dessous :



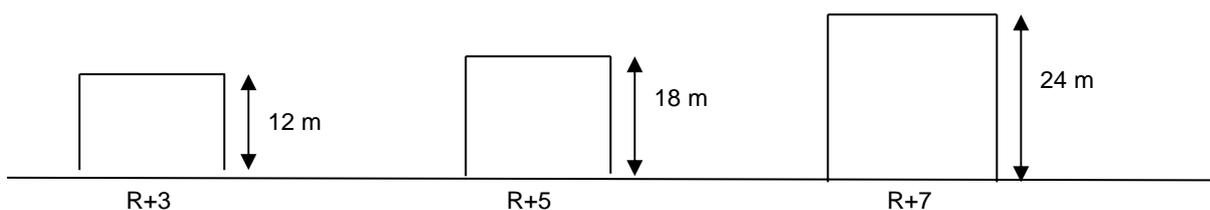
Dans le cadre de cette phase prospective, les calculs seront réalisés uniquement dans les zones centrales à l'atterrissage et au décollage.

3.3 Configurations urbaines retenues

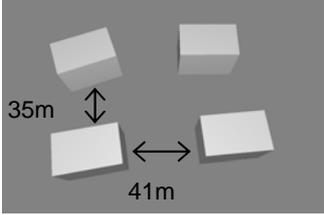
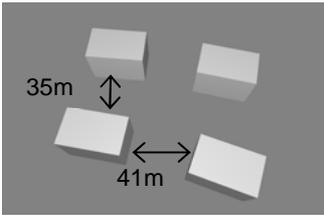
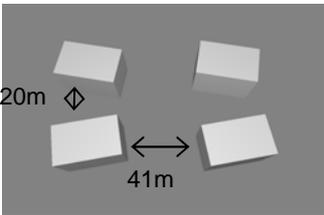
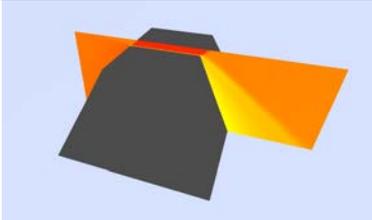
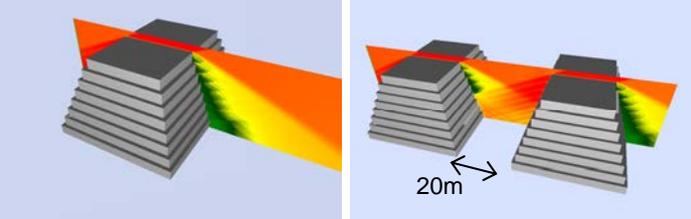
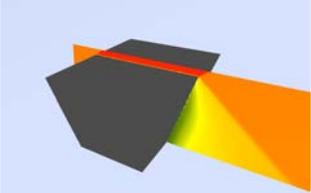
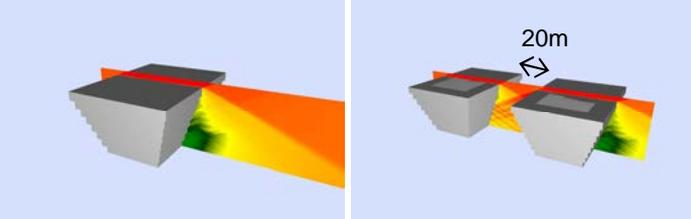
Les configurations urbaines sont basées sur des cas simples, le but étant à ce stade de mettre en évidence des principes et de voir si des premiers critères constructifs peuvent être dégagés, d'un point de vue exploratoire.

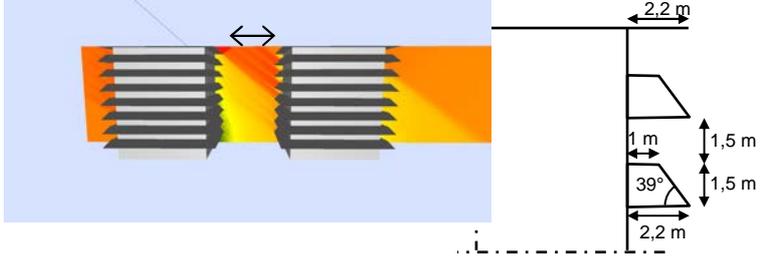
Les dimensions des bâtiments sont similaires à celles retenues dans l'étude initiale, qui étaient issues d'échanges avec des urbanistes (cf. rapport RA-110337-01-B).

Les hauteurs des bâtiments varient de R+3 à R+7 :



Les compositions urbaines testées dans le cadre de cette étude sont toutes basées sur une hauteur de 24m (R+7) ; elles sont présentées page suivante :

Description	Composition urbaine n°	Schémas	
<p><u>Bâtiments non parallèles</u> :</p> <p>4 bâtiments non parallèles, avec différents espacements et angles d'orientation</p>	1.1		
	1.2		
	1.3		
<p><u>Pyramide décroissante « lisse »</u> :</p> <p>Bâtiment avec façade lisse inclinée de 25°</p>	2.1		
<p><u>Pyramide décroissante à paliers</u> :</p> <p>Bâtiment avec paliers en retrait de 1m à chaque étage</p>	3.1 3.2		
<p><u>Pyramide croissante « lisse »</u> :</p> <p>Bâtiment avec façade lisse inclinée de 14°</p>	4.1		
<p><u>Pyramide croissante à paliers</u> :</p> <p>Bâtiment avec paliers en débordement de 1m à chaque étage</p>	5.1 5.2		

Description	Composition urbaine n°	Schémas
<p><u>Bâtiments avec balcons inclinés :</u></p> <p>2 Bâtiment avec balcons donc la face avant est inclinée vers le ciel, muni d'une casquette horizontale au dernier étage</p>	<p>6.1</p>	

3.4 Indicateurs acoustiques

L'indicateur acoustique utilisé dans les calculs se réfère à un L_{Aeq} par rapport à un flux d'avions. En pratique, cela correspond à un L_{Aeq} moyen sur une période de la journée, avec un grand nombre de passages d'avions sur la même trajectoire (A320 uniquement). Le nombre d'avions dans le modèle AzB a été choisi de façon à ce que les niveaux sonores moyens au niveau des zones étudiées soient de l'ordre de 55 dB(A). Ce critère est arbitraire, car dans le cadre de cette étude, nous ne nous intéressons qu'aux différences de niveaux sonores avec et sans bâti, et non aux niveaux absolus. Il est à noter que le nombre d'avions est le même à l'atterrissage qu'au décollage, ce qui explique pourquoi les niveaux sonores sont sensiblement différents au décollage et à l'atterrissage.

Les résultats de calcul sont issus du modèle ISO 9613, qui a été recalé au préalable avec le modèle AzB. Ce recalage est réalisé uniquement sur la puissance acoustique moyenne de la ligne source (qui vaut dans notre modèle $L_w = 92$ dB(A)/mètre linéaire), et non sur les termes correctifs de chaque segment de ligne source.

Afin d'analyser les écarts avec et sans prise en compte des bâtiments, l'indicateur retenu est :

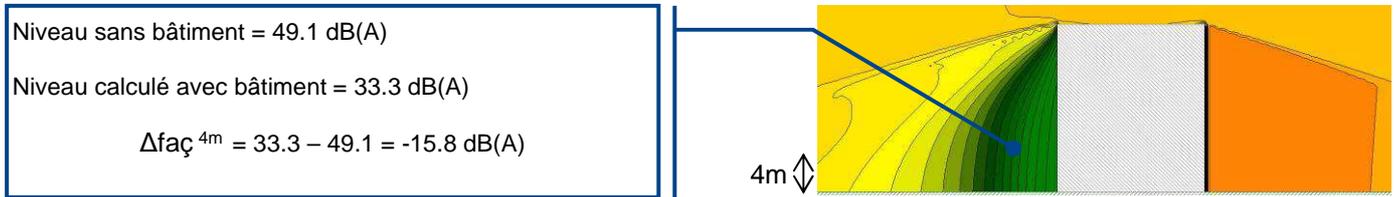
$$\Delta fa\grave{c} = L_{Aeq} \text{ avec présence de bâti} - L_{Aeq} \text{ sans bâti}$$

Cet indicateur est calculé pour :

- Des points récepteurs à une distance de 2m des façades.
- Pour une hauteur de 4m, ainsi que pour une hauteur correspondant au dernier étage.

Ainsi, un **Δ faç positif** indiquera **une augmentation sonore** vis-à-vis de la situation sans bâti.

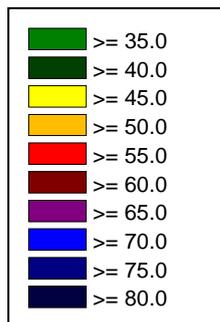
Exemple : Δ faç^{4m} = Niveau sonore en façade à 4m de hauteur - Niveau sonore « en champ libre »



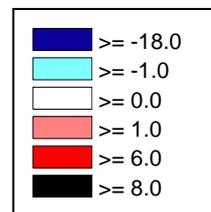
Les cartes de bruit horizontales présentées par la suite sont calculées à 4m de hauteur conformément aux calculs de PGS.

L'échelle de couleur sur les niveaux calculés est basée sur des plages de 5 dB(A) (voir ci-dessous). Les isophones sont représentés par pas de 1 dB(A) au travers de variations de teintes dans ces plages.

Une seconde échelle a été utilisée afin de représenter les augmentations ou diminutions de bruit. Il s'agit d'une **échelle relative** qui a pour valeur nulle lorsque le niveau sonore avec bâtiment est égal au niveau sonore sans bâtiment, et qui devient plus bleue si le bruit est atténué, et plus rouge si le bruit est renforcé. Les isophones sont également représentés par pas de 1 dB(A) au travers de variations de teintes dans les plages de couleur :



Echelle de couleur en dB(A) pour les niveaux calculés (LAeq)



Echelle de couleur en dB(A) pour les **niveaux relatifs** (augmentation ou diminution sonore vis-à-vis de la référence sans bâtiment)

4. Simulations acoustiques

On s'appliquera dans la suite à montrer les effets positifs et négatifs de l'urbanisme sur la répartition du bruit dans les différentes positions et configurations précédemment exposées.

Nota : On appelle effet positif (ou bénéfique) de l'urbanisme un type de bâtiment ou une configuration urbaine qui permet d'obtenir, sur certaines façades du bâti, des niveaux sonores sensiblement inférieurs au niveau sonore en champ libre.

Les résultats de simulations sont présentés dans le rapport de l'étude préalable référencé RA-130280-01-C « Etude des effets du bâti sur l'exposition sonore en milieu aéroportuaire – Annexe simulations ».

5. Synthèse des effets observés

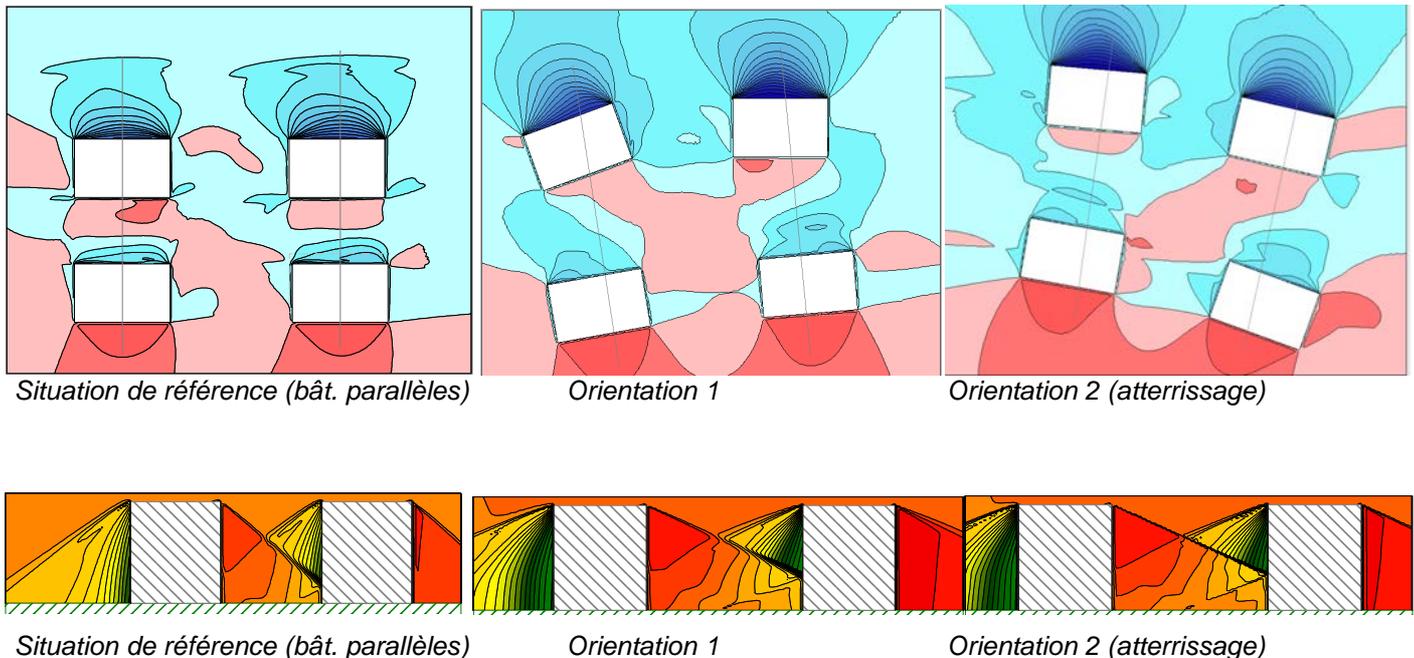
Afin de synthétiser les effets observés, des illustrations comparatives sont proposées pour les cas les plus significatifs, que les effets soient positifs ou négatifs.

5.1 Bâtiments non parallèles

Lorsque des bâtiments rectangulaires sont disposés de manière non parallèle, **on constate globalement les mêmes effets constatés dans l'étude précédente avec des bâtiments parallèles** : les réflexions entre les bâtiments viennent amoindrir l'effet bénéfique que l'on aurait avec un bâtiment seul.

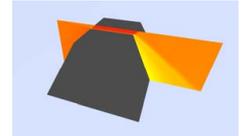
Trois séries de tests ont été réalisés avec un ensemble de 4 bâtiments R+7 orientés de façon non parallèles entre eux, et espacés d'environ 35m pour les 2 premiers tests, et d'environ 20m pour le 3ème.

Les simulations ci-dessous présentent les effets apportés par des bâtiments non parallèles, vis-à-vis d'une situation de référence avec bâtiments parallèles.



Cette disposition de bâtiments n'apporte pas d'intérêt particulier.

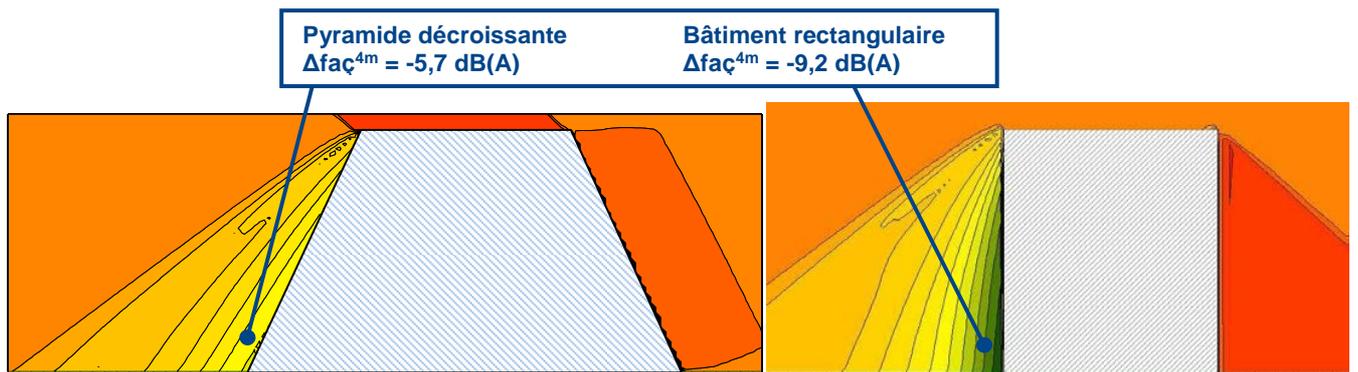
Nous rappelons qu'afin de limiter les réflexions entre les bâtiments dans ce type de configuration, un espacement d'une soixantaine de mètres serait nécessaire (notamment à l'atterrissage, lorsque les avions sont vus sous un angle d'incidence faible ; cf. étude précédente RA-110337-01-B du 08/03/2013).



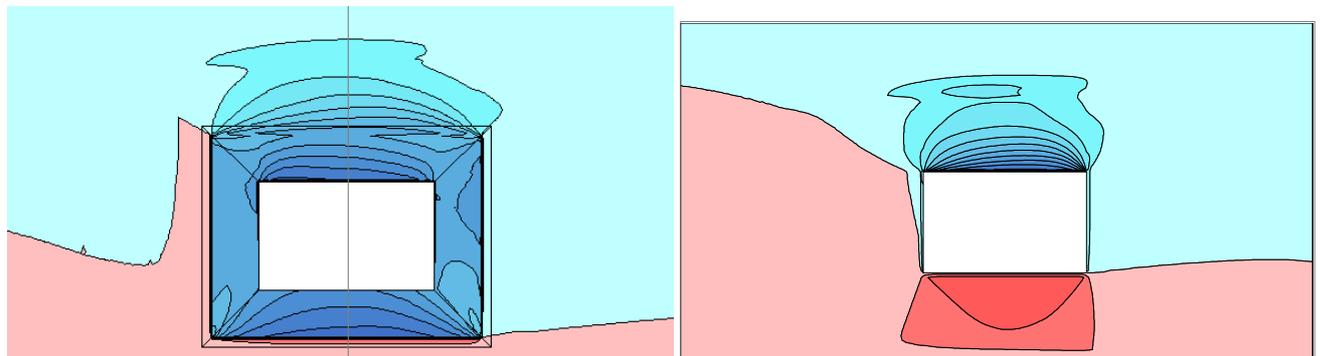
5.2 Pyramide décroissante « lisse »

La pyramide décroissante « lisse » **n'est pas intéressante** car elle est **moins efficace qu'un simple bâtiment rectangulaire**. En effet, la façade arrière est moins bien protégée, alors que l'emprise au sol du bâtiment est supérieure.

Le test a été réalisé avec un seul bâtiment ; avec des façades inclinées à 25°. Des inclinaisons plus faibles devraient avoir des effets qui se rapprocheront d'un bâtiment à façade verticale.



Comparaison de la pyramide décroissante « lisse » avec un bâtiment rectangulaire de même hauteur (décollage)

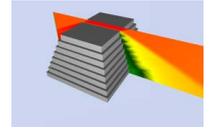


Comparaison de la pyramide décroissante « lisse » avec un bâtiment rectangulaire de même hauteur (décollage)

Au décollage, lorsque les avions sont vus sous un angle d'incidence important, la zone d'ombre derrière le bâtiment est assez limitée : l'atténuation par rapport à une situation sans bâti ne dépasse pas 5 à 6 dB(A), contre environ 9 dB(A) pour un bâtiment rectangulaire.

Cette forme de bâti ne présente donc pas d'intérêt.

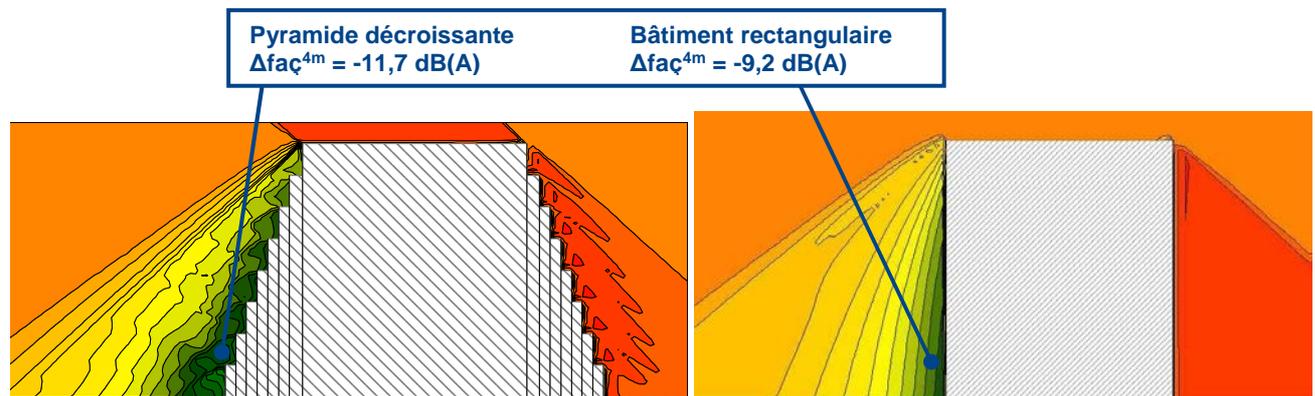
5.3 Pyramide décroissante à paliers



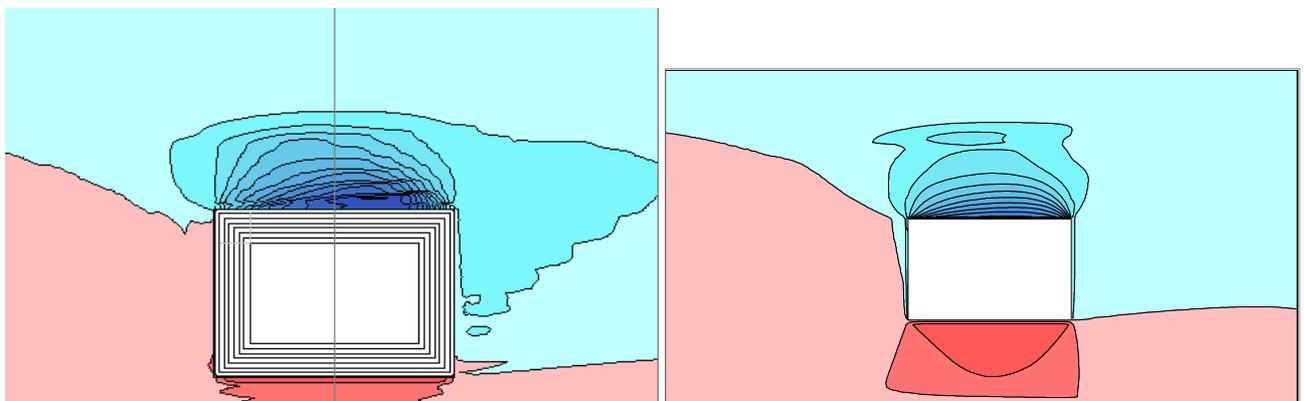
1 pyramide décroissante à paliers

La pyramide décroissante à paliers semble **a priori plus intéressante qu'un bâtiment rectangulaire simple**. La **façade arrière est bien protégée**, en raison des nombreuses diffractions par les arêtes horizontales et verticales du bâtiment, mais également d'un bâtiment plus long.

Les tests ont été effectués avec une pyramide de 24m de hauteur, de 7 étages de 3m chacun, et avec des paliers en retrait de 1m à chaque étage.



Comparaison de la pyramide décroissante à paliers avec un bâtiment rectangulaire (décollage)

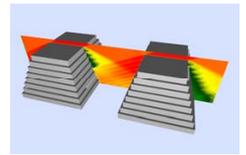


Comparaison de la pyramide décroissante à paliers avec un bâtiment rectangulaire (décollage)

Les cartes de bruit en plan et en coupe montrent que la zone d'ombre avec une pyramide à paliers est légèrement plus étendue que pour un bâtiment rectangulaire.

Cette forme de bâti permet de limiter les diffractions latérales. Elle pourrait également être munie d'une casquette horizontale au dernier étage munie d'un matériau absorbant en sous-face.

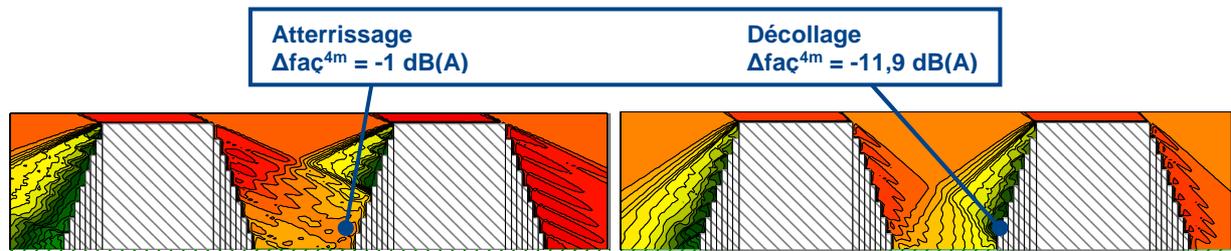
Cette forme de bâti semble donc intéressante, tant que le bâtiment est implanté de façon isolée (loin d'autres bâtiments).



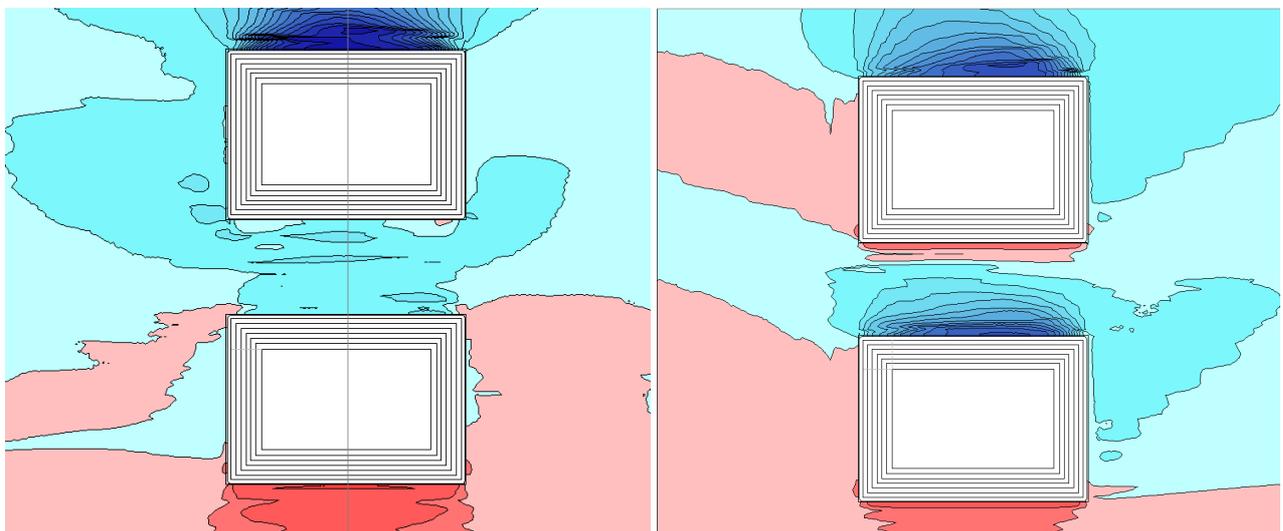
2 pyramides décroissantes à paliers, espacées de 20m

Lorsqu'elles sont placées l'une derrière l'autre, les pyramides décroissantes à paliers **ne permettent pas de limiter les réflexions entre les bâtiments**. Ces réflexions parasites s'estomperont naturellement si l'on éloigne les bâtiments entre eux.

Les tests ont été effectués avec deux pyramides de 24m de hauteur, espacées de 20m au niveau de leur base et de 34m au niveau de leur dernier étage.



Comparaison de 2 pyramides décroissantes à paliers à l'atterrissage puis au décollage



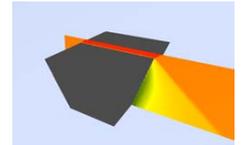
Comparaison de 2 pyramides décroissantes à paliers à l'atterrissage puis au décollage

A l'atterrissage il n'y a quasiment plus de zone d'ombre derrière le premier bâtiment, car les avions sont vus sous un angle d'incidence faible, ce qui favorise les réflexions sur le bâtiment arrière.

Au décollage, la zone d'ombre est quasiment conservée car les avions sont vus sous un angle d'incidence plus élevé.

On notera les limites de la modélisation avec la norme ISO 9613, qui ne prend pas en compte les réflexions multiples sur le sol entre les bâtiments (l'effet de sol est pris en compte comme un effet global dans le sens source-récepteur).

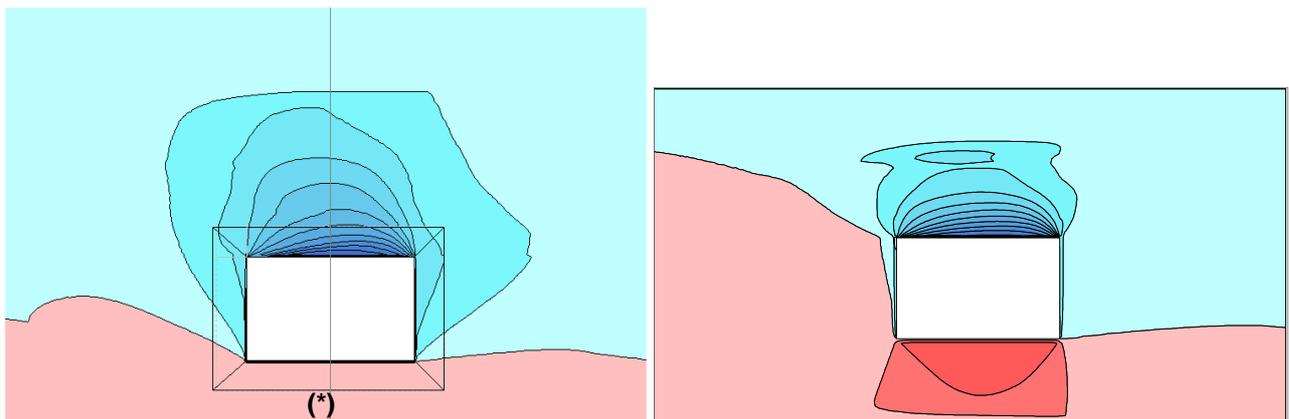
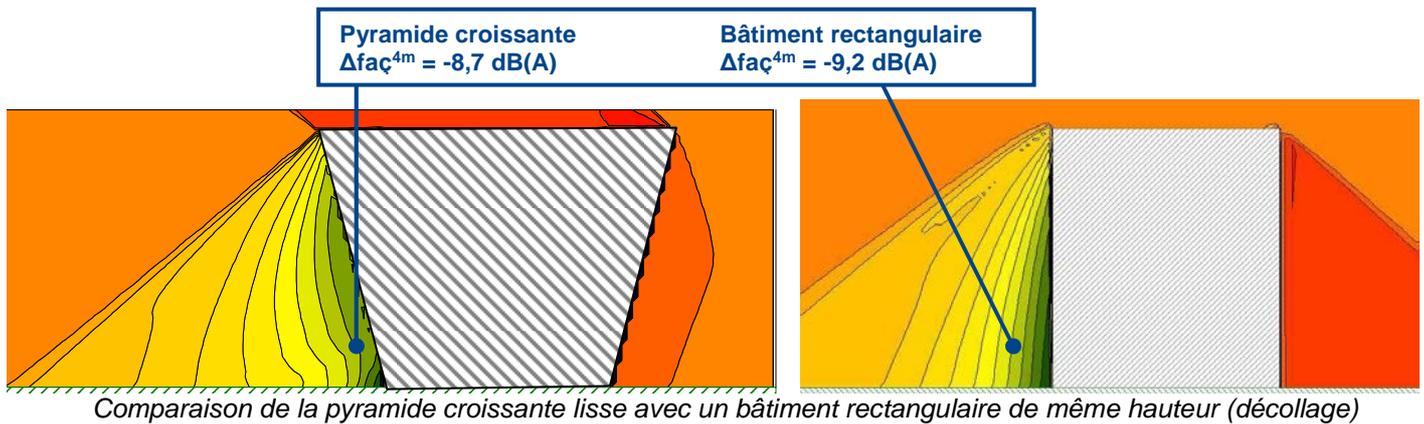
Cette disposition de bâtiments a donc des effets mitigés qui sont difficiles à évaluer au travers des simulations effectuées.



5.4 Pyramide croissante « lisse »

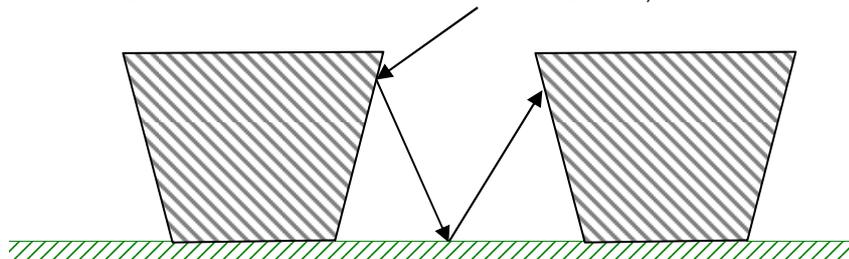
La pyramide croissante « lisse », offre une bonne diffraction sur l'arête horizontale du toit du bâtiment, mais la **façade arrière n'est pas mieux protégée que celle qu'un bâtiment rectangulaire simple**, notamment aux étages bas.

Le test a été réalisé avec un seul bâtiment, avec des façades faiblement inclinées à 14°.



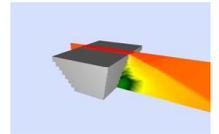
La façade arrière est relativement bien protégée sauf aux étages bas (proche du sol) où l'effet d'atténuation est moindre qu'un bâtiment rectangulaire simple.

(*) Nota : dans le cadre de ce type de façades inclinées vers l'avant, le logiciel utilisé (CadnaA) permet une bonne estimation de la diffraction sur les arêtes, mais donne des résultats non cohérents pour les réflexions en façade (cette réflexion est fortement sous-estimée). Après échanges avec Datakustik (concepteur-éditeur du logiciel), il s'agit d'une limitation interne au fonctionnement du logiciel liée la méthode de calcul utilisée (tirs de rayons). On peut néanmoins estimer « sans calcul » que cette forme de bâti aura tendance à favoriser les réflexions entre les bâtiments, via des réflexions multiples sur le sol.



Cette forme de bâti n'est donc pas intéressante.

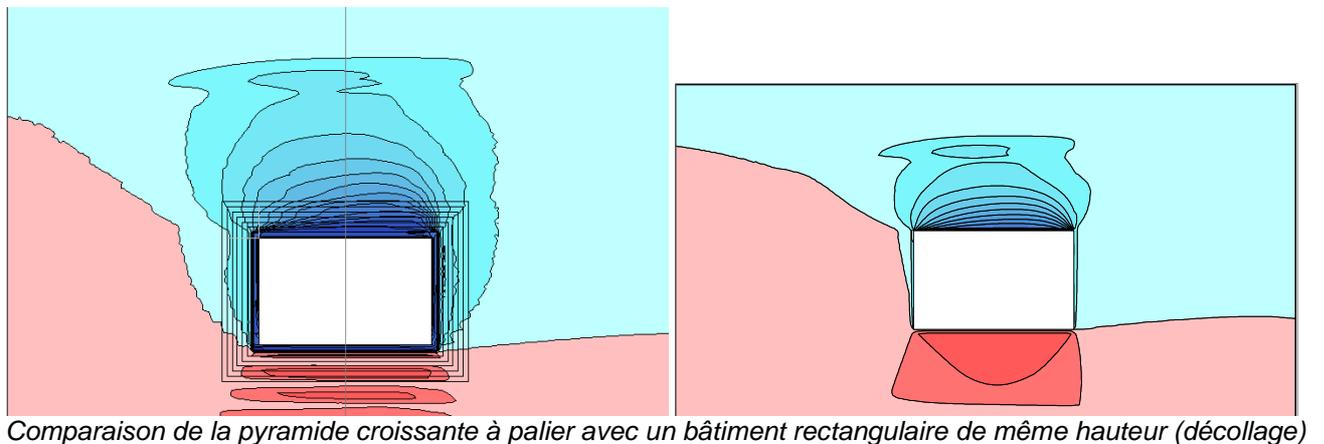
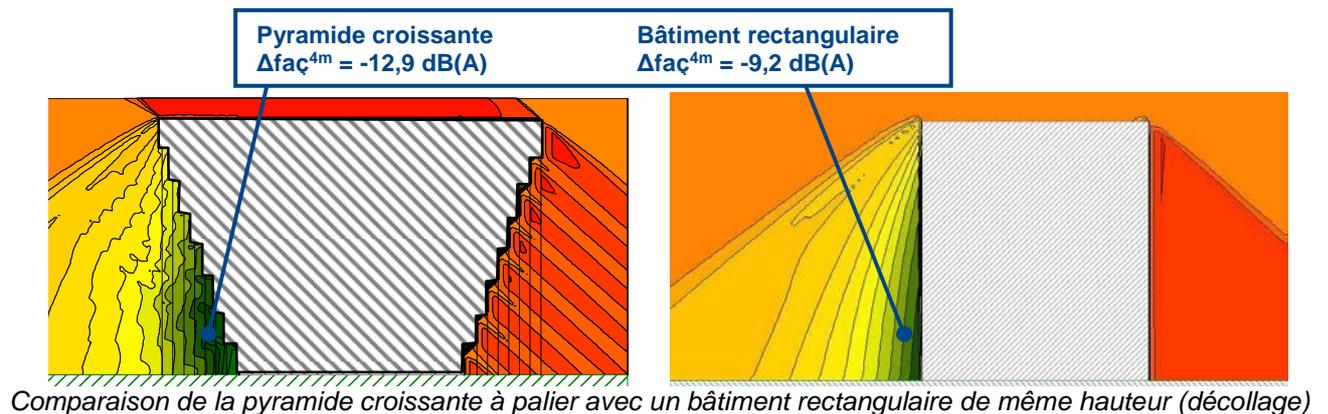
5.5 Pyramide croissante à paliers



1 pyramide croissante à paliers

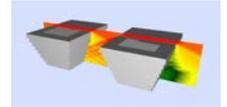
La pyramide croissante à paliers est **a priori plus intéressante qu'un bâtiment rectangulaire simple**. La façade arrière est mieux protégée, notamment grâce à la diffraction sur l'arête horizontale en haut du bâtiment.

Les tests ont été effectués avec une pyramide de 24m de hauteur, de 7 étages de 3m chacun, et avec des paliers en débordement de 1m à chaque étage.



La zone d'ombre avec une pyramide décroissante à paliers est légèrement plus étendue que pour un bâtiment rectangulaire.

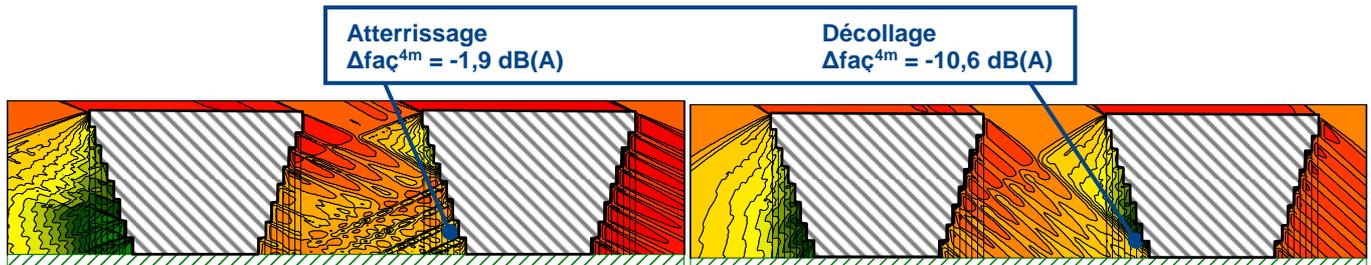
Cette forme de bâti semble donc intéressante, si le bâtiment est implanté de façon isolée (loin d'autres bâtiments).



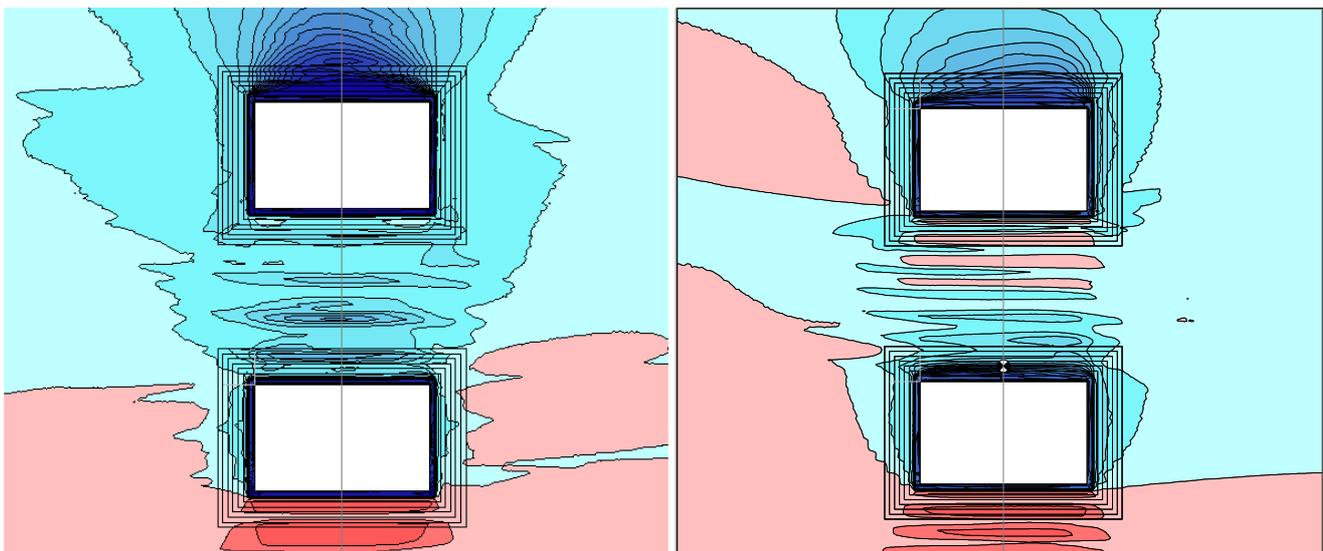
2 pyramides croissantes à paliers, espacées de 20m

Les pyramides décroissantes à paliers **ne permettent pas de limiter les réflexions entre les bâtiments**. Des réflexions parasites apparaissent, et leur effet dépend notamment de la distance séparant les bâtiments.

Les tests ont été effectués avec deux pyramides de 24m de hauteur, espacées de 34m au niveau de leur base et de 20m au niveau de leur dernier étage.



Comparaison de 2 pyramides croissantes à paliers à l'atterrissage puis au décollage



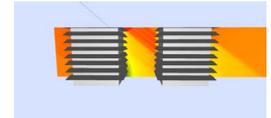
Comparaison de 2 pyramides croissantes à paliers à l'atterrissage puis au décollage

La zone d'ombre qui était visible derrière un bâtiment seul a quasiment disparu du fait des réflexions entre bâtiments.

On notera les limites de la modélisation avec la norme ISO 9613, qui ne prend pas en compte les réflexions multiples sur le sol entre les bâtiments (l'effet de sol est pris en compte comme un effet global dans le sens source-récepteur). Les résultats de calculs sont donc à prendre avec précaution.

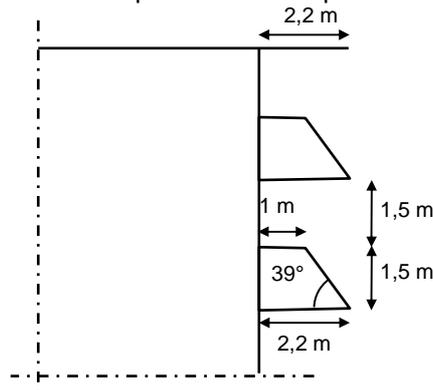
Cette disposition de bâtiments ne semble pas intéressante.

5.6 Bâtiment avec balcons inclinés



Les bâtiments avec des éléments de façade inclinés vers le ciel (ici des balcons) **permettent de limiter très fortement les réflexions entre 2 bâtiments proches**, en renvoyant une partie de l'énergie sonore vers le ciel. Le fait que le bâtiment reste globalement vertical permet de garder un bon effet de diffraction sur la face arrière.

Dans le test qui a été réalisé, les bâtiments sont espacés de 32m, munis d'une casquette horizontale au dernier étage et de balcons dont les profils sont indiqués ci-dessous.

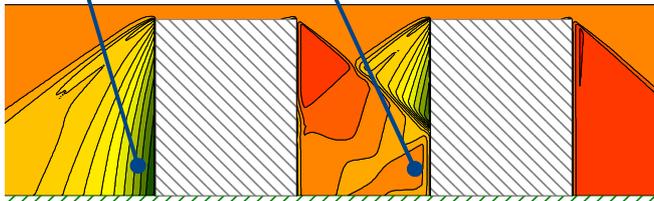


Sans balcons ni casquette
 $\Delta\text{faç}^{4\text{m}} = -8,3 \text{ dB(A)}$

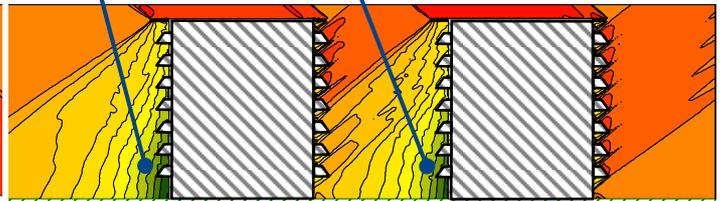
$\Delta\text{faç}^{4\text{m}} = -0,1 \text{ dB(A)}$

Avec balcons inclinés et casquette
 $\Delta\text{faç}^{4\text{m}} = -7,2 \text{ dB(A)}$

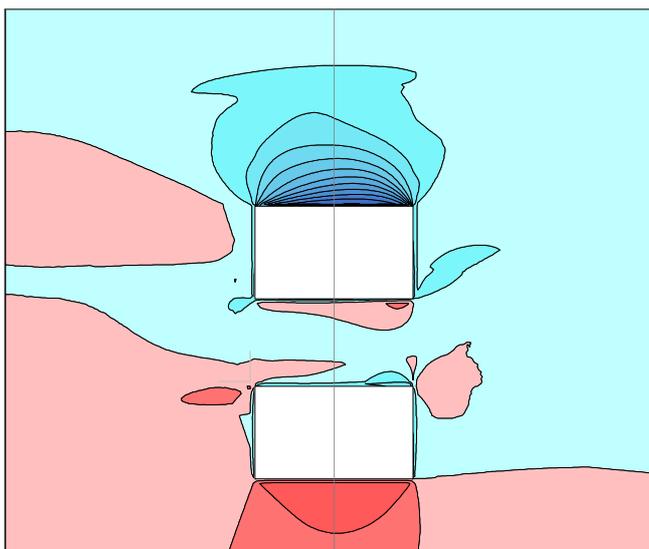
$\Delta\text{faç}^{4\text{m}} = -6,8 \text{ dB(A)}$



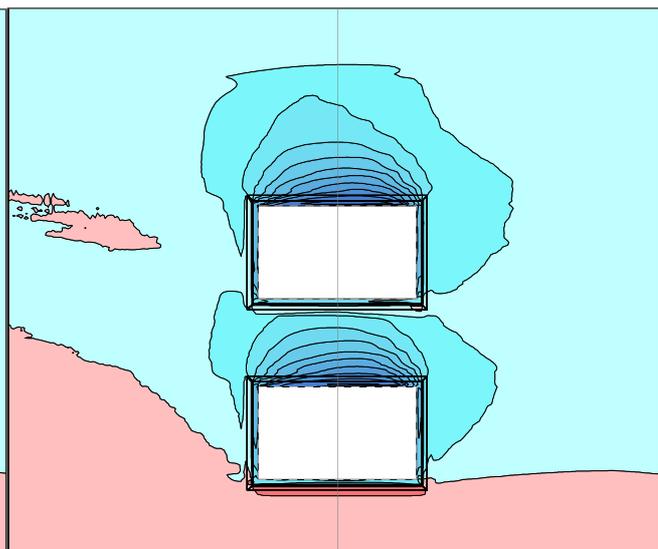
Situation de référence (sans balcons)



Bâtiments avec balcons inclinés (décollage)



Situation de référence (sans balcons)



Bâtiments avec balcons inclinés (décollage)

Cette forme de bâti est intéressante : la façade arrière du premier bâtiment est relativement bien protégée car les réflexions sonores dues au second bâtiment sont en majorité renvoyées vers le ciel.

6. Campagne de mesure de bruit à Toulouse

6.1 Présentation du site et méthodologie de mesurage

Une campagne de mesures a été réalisée afin de disposer de données objectives issues de mesures acoustiques sur un site réel, et confronter les résultats avec ceux obtenus au travers des simulations numériques.

Le site de mesures est situé au Sud-Est de l'aéroport de Toulouse-Blagnac.

Le bâtiment retenu est situé rue Henri Dunant à Toulouse. Il s'agit d'un bâtiment R+4, de 14 m de hauteur environ. Son orientation est quasiment parallèle à la trajectoire des avions.

Les mesures ont été réalisées le 13 novembre 2014 entre 14h et 17h environ en configuration de décollage.

Planche 1 - Plan du site retenu à Toulouse

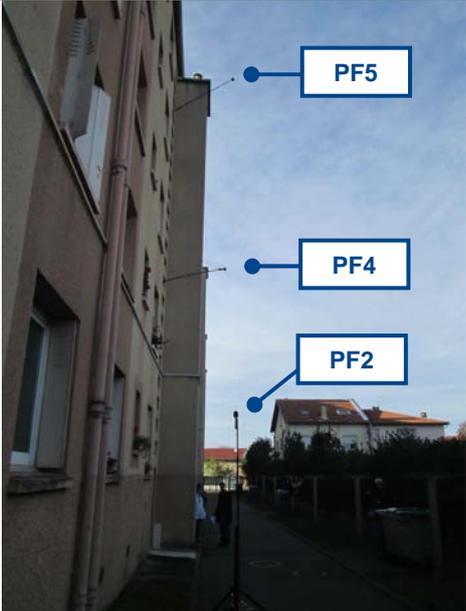


La méthodologie de mesurage est la suivante :

- Instrumentation du bâtiment avec 5 sonomètres : 1 situé en façade exposée pour la mesure de référence, et 4 situés sur la façade calme (dont 1 à l'intérieur d'un logement).
- Utilisation de sonomètres de classe 1, stockage du LAeq 1s et bande de 1/3 d'octave, avec enregistrements audio en continu, afin de pouvoir contrôler la validité des acquisitions lors du post-traitement des mesures.

Le tableau page suivante présente les points de mesure réalisés.

Planche 2 - Descriptif des points de mesures

Point	Photo	Perception des sources de bruit
<p>Point de référence PF3 Façade avant A h=4m du sol et à 2m en façade</p>		<p>Passage de véhicules à proximité (+++) Trafic lointain (+) Passages d'avions (+++)</p>
<p>PF5 Façade arrière A h=11,6m du sol et à 2m en façade</p>		<p>Trafic lointain (+) Passages d'avions (+++)</p>
<p>PF4 Façade arrière A h=6,6m du sol et à 2m en façade</p>		<p>Trafic lointain (+) Passages d'avions (+++)</p>
<p>PF2 Façade arrière A h=2,65m du sol et à 2m en façade</p>		<p>Trafic lointain (+) Passages d'avions (++)</p>
<p>PF1 Intérieur logement au RdC A h=1,5m du sol</p>		<p>Bruit de fond dans l'appartement (++) Trafic lointain (+) Passages d'avions (++)</p>

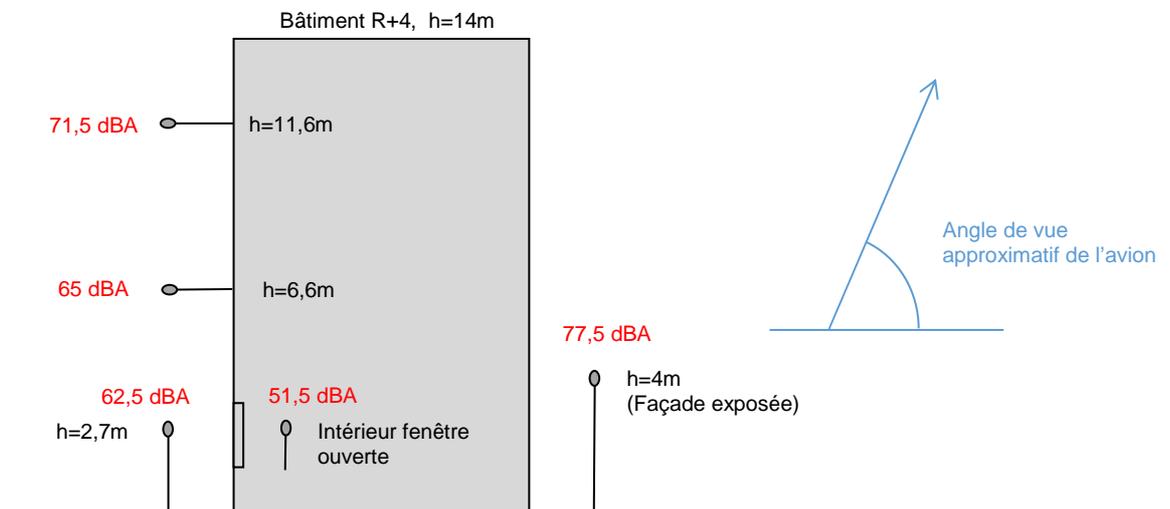
6.2 Résultats de mesures

Les évènements retenus suite au dépouillement des mesures sont présentés ci-dessous. Les résultats sont présentés en termes d'atténuation sonore entre le point de référence en façade exposée (PF3) et les points situés à l'arrière du bâtiment.

Type d'avion	Heure de passage	Altitude (m)	Estimation de la distance latérale la plus courte (m)	Configuration	Différence entre le L _{Amax} en façade et le L _{Amax} en façade arrière [dBA]			
					PF5 h=11,6m	PF4 h=6,6m	PF2 h=2,65m	PF1 Intérieur
A321	15:20	849	350	PF1 fenêtre ouverte	-6,3	-12,5	-14,9	-26,3
E190	15:42	1166	420	PF1 fenêtre ouverte	-6,4	-12,0	-14,0	-27,7
A321	15:50	1044	310	PF1 fenêtre ouverte	-3,3	-11,5	-12,2	-25,9
B738	15:53	1037	440	PF1 fenêtre ouverte	-6,9	-13,3	-15,0	-27,7
A321	16:38	1006	330	PF1 fenêtre fermée	-2,9	-11,7	-13,0	-46,3
A320	16:53	1150	330	PF1 fenêtre fermée	-1,3	-9,7	-10,7	-46,6

Commentaires :

- Les analyses sont ici effectuées en L_{Amax}. Les niveaux sonores en L_{Aeq} et par bande d'octave sont disponibles en Annexe 3.
- Les atténuations mesurées sont de l'ordre de 11 à 15 dBA au point PF2 (h=2,65m) et de 10 à 13 dBA au point PF4 (h=6,6m). Au PF5 (h=11,6m) situé au dernier étage, elles sont de l'ordre de 1 à 7 dBA.
- Les mesures à l'intérieur du logement montrent des atténuations fenêtre ouverte (1 battant seulement est ouvert) qui sont 11 à 14 dBA plus élevées qu'au point PF2 situé en extérieur. Cette atténuation complémentaire correspond à l'atténuation apportée par la fenêtre ouverte.
- On notera d'ailleurs que les mesures d'isolation de façade réalisées avec source artificielle indiquent un D_{nTA, tr} de 12 dB fenêtre ouverte, et de 37 dB fenêtre fermée (cf. fiches en Annexe 3).
- On notera également que les niveaux sonores L_{Amax} à l'intérieur du logement sont de l'ordre de 47 à 51 dBA fenêtre ouverte et de 26 à 30 dBA fenêtre fermée.
- Les niveaux sonores au passage d'un A321 (1^{er} évènement à 15h20, niveaux L_{Amax} arrondis à 0,5 dBA) sont illustrés ci-dessous :

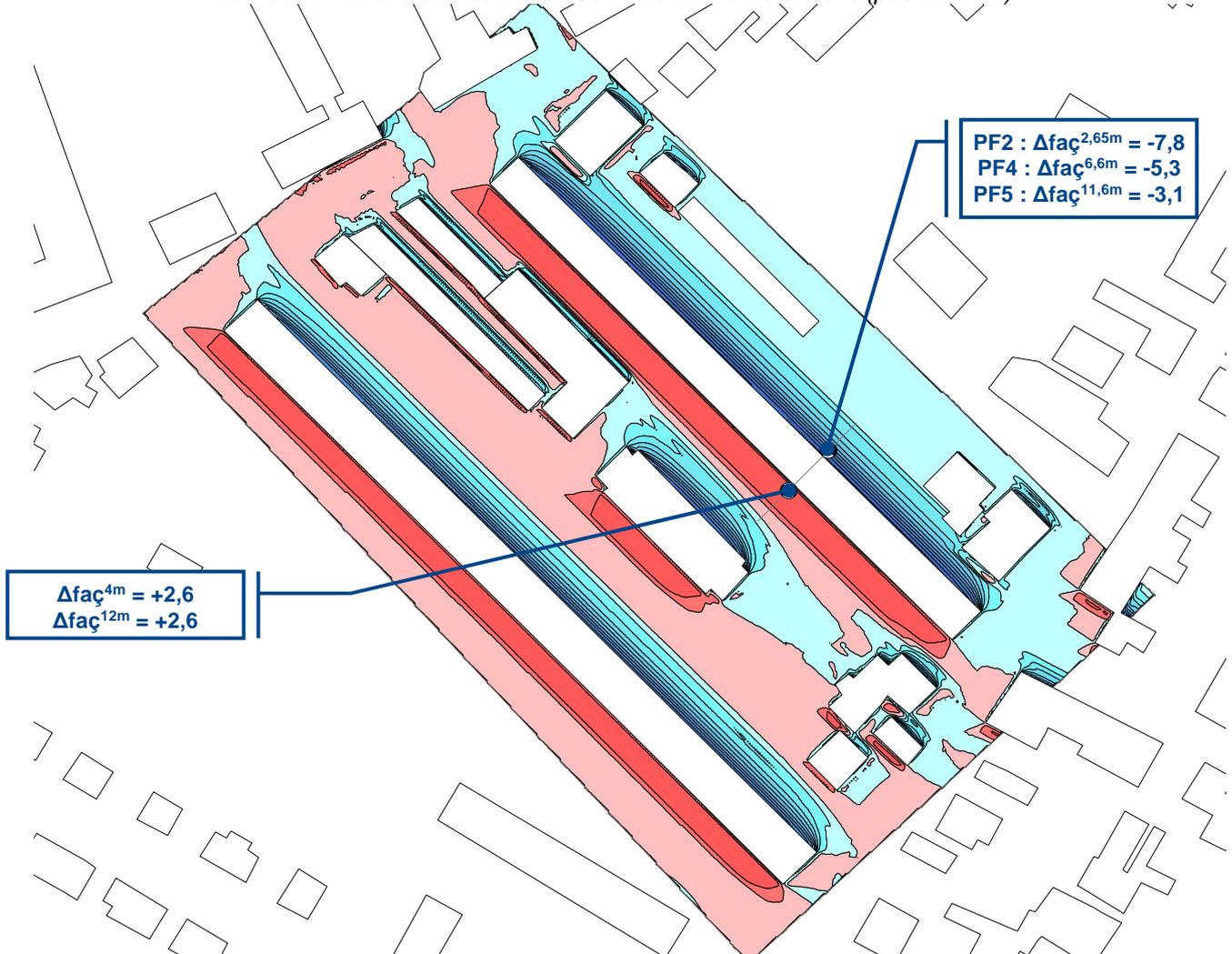


6.3 Simulation acoustique du site de mesure

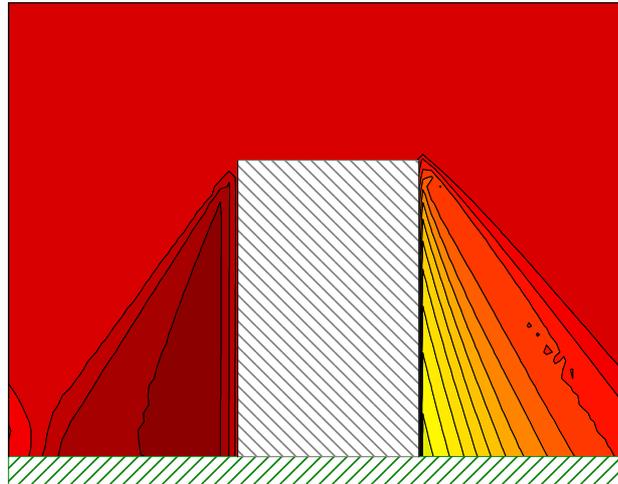
Une simulation acoustique du site de mesures à Toulouse a été réalisée sur la base du modèle acoustique précédemment développé, et complété avec les données d'entrée suivantes :

- Utilisation de la BD Topo : bâti en 3D autour de la zone de mesurage. La topographie du terrain retenue comme « plate » (son effet peut en effet être considéré comme négligeable).
- Modélisation des décollages selon la trajectoire nominale fournie par l'ACNUSA. Cette trajectoire rectiligne correspond à celle observée en moyenne lors des mesures sur site.
- Utilisation du même type d'avion (A320) que celui pris comme hypothèse dans le modèle théorique.
- Utilisation du même profil de décollage que celui pris comme hypothèse dans le modèle théorique (pente à 10% jusqu'à 6km, puis 7%).
- Paramètres de modélisation identiques à ceux de l'étude théorique. Les paramètres de température et d'humidité relative sont de 10°C et 70% (paramètres standard ISO 9613).
- Les atténuations sont présentées de la même façon que pour les simulations théoriques : il s'agit d'une différence entre le niveau calculé avec et sans présence de bâti.

Modélisation du site de Toulouse : Carte de bruit différentielle (pas de 1 dB)



Modélisation du site de Toulouse – vue en coupe (pas de 1 dB)



Les comparaisons mesures/calcul sont présentées dans le tableau ci-dessous. Les résultats sont exprimés en terme de différence entre le niveau sonore en façade et celui derrière le bâtiment.

Planche 3 - Comparaison mesures / calculs

Type d'avion	Heure de passage	Différence entre le niveau sonore en façade et derrière le bâti								
		PF5 h=11,6m			PF4 h=6,6m			PF2 h=2,65m		
		Mesure [LAeq]	Calcul [LAeq]	Ecart	Mesure [LAeq]	Calcul [LAeq]	Ecart	Mesure [LAeq]	Calcul [LAeq]	Ecart
A321	15:20	-6,9	-5,7	-1,2	-11,9	-7,9	-4	-13,7	-10,4	-3,3
E190	15:42	-6,4		-0,7	-11,0		-3,1	-12,4		-2
A321	15:50	-2,3		3,4	-8,4		-0,5	-9,8		0,6
B738	15:53	-6,9		-1,2	-10,3		-2,4	-12,1		-1,7
A321	16:38	-2,1		3,6	-6,5		1,4	-8,1		2,3
A320	16:53	-4,4		1,3	-8,8		-0,9	-7,8		2,6
Atténuation moyenne		-4,8		0,9	-9,5		-1,6	-10,7		-0,3

Commentaires :

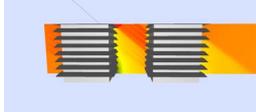
- Les comparaisons mesures / calcul sont réalisées sur les niveaux sonores LAeq (en effet les niveaux sonores calculés correspondent à des LAeq et non des LAm_{ax}).
- Les atténuations mesurées sont variables d'un passage d'avion à l'autre, et les écarts entre mesure et calculs sont globalement inférieurs à 3 dBA (cases en vert).

On peut donc considérer que les atténuations calculées derrière les bâtiments dans l'ensemble de cette étude sont globalement cohérentes avec celles mesurées.

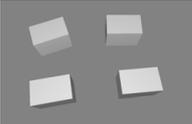
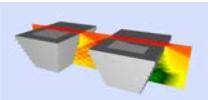
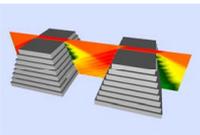
7. Conclusion

Sur la base des tests effectués dans cette étude et des résultats de l'étude précédente (cf. rapport RA-110337-01-B), il est possible de dégager certaines tendances, plus ou moins prévisibles intuitivement, répondant à l'objectif de l'étude.

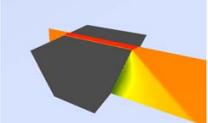
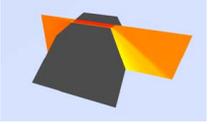
Les principes bénéfiques qui se dégagent des variations de formes urbaines sont les suivants :

- Afin de limiter les réflexions entre bâtiments, un moyen efficace est que les façades possèdent des éléments non verticaux inclinés vers le ciel. Sur une des formes proposées ce sont les faces avant des balcons qui sont inclinées vers le ciel. Le bâtiment doit rester globalement vertical, afin de garder un effet d'écran efficace sur la face arrière du bâti. 
- L'espacement entre les bâtiments reste un moyen efficace de limiter les réflexions parasites entre bâtiments. Les ordres de grandeur sont les mêmes que ce qui a été identifié lors de la précédente étude : un espacement minimum d'une soixantaine de mètres est nécessaire, notamment à l'atterrissage, lorsque l'avion est vu sous un angle d'incidence faible.

Les configurations dont les effets semblent mitigés :

- L'orientation des bâtiments : Lorsque des bâtiments rectangulaires sont disposés de manière non parallèle on constate globalement les mêmes effets qu'avec des bâtiments parallèles : des réflexions entre les bâtiments se produisent dans les 3 cas testés. 
- Les pyramides croissantes à paliers : La façade arrière est bien protégée, notamment grâce à la diffraction sur l'arête horizontale en haut du bâtiment, qui agit comme un écran incliné. Mais cette forme de bâti ne permet pas de limiter les réflexions entre bâtiments. 
- Les pyramides décroissantes à paliers : La façade arrière est bien protégée, en raison d'un bâtiment plus long, et d'une bonne limitation des diffractions latérales. Mais cette forme de bâti ne permet pas de limiter les réflexions entre bâtiments. 

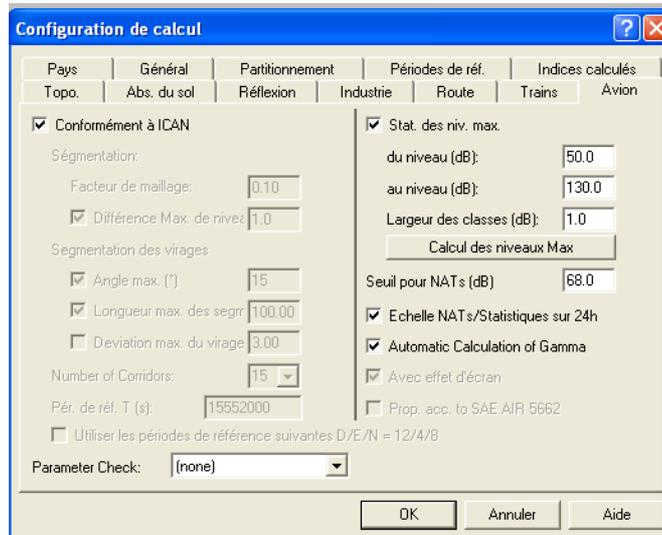
Les configurations dont les effets semblent peu intéressants :

- La pyramide croissante « lisse » : la façade arrière n'est pas mieux protégée que celle d'un bâtiment rectangulaire simple. De plus cette forme de bâti aura tendance à favoriser des réflexions entre 2 bâtiments proches, via des réflexions sur le sol. 
- La pyramide décroissante « lisse » : La façade arrière est moins bien protégée que celle d'un bâtiment rectangulaire simple. 

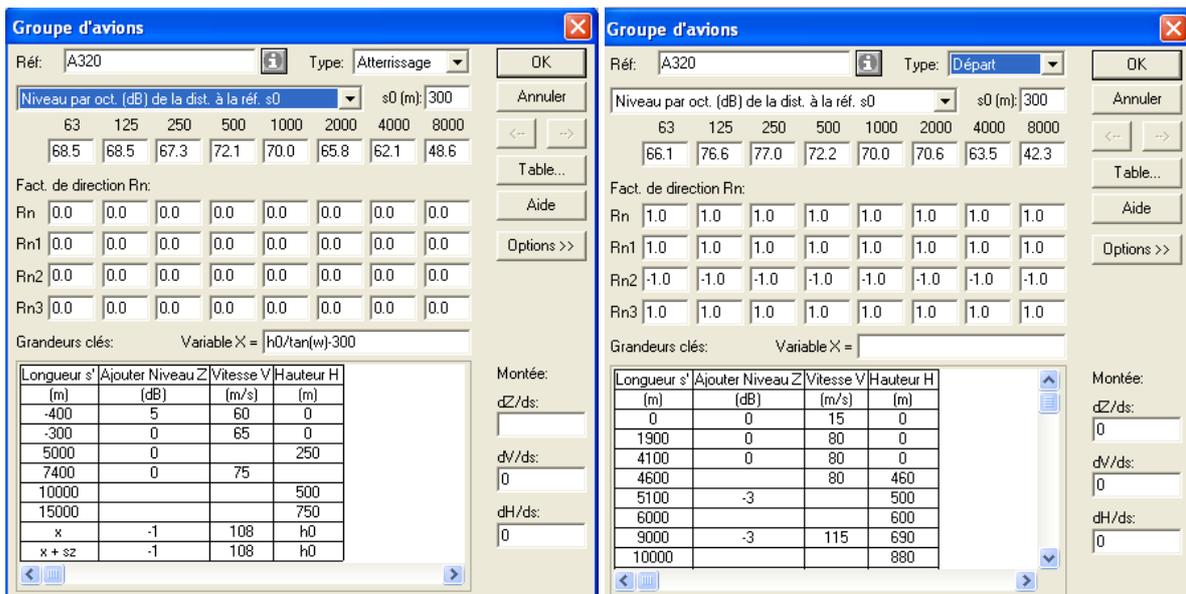
En résumé, des moyens de protection existent, mais ils doivent être pensés le plus en amont possible des projets d'urbanisation. On retiendra qu'un bâtiment bien placé et bien orienté par rapport aux trajectoires permet d'offrir une façade relativement protégée en zone de bruit, ce qui permet d'ouvrir les fenêtres sans être exposé à un bruit intolérable.

Annexe 1. Configurations de calcul AzB

Paramètres de calcul utilisés pour AzB2008 :



Norme utilisée : AzB 2008



Caractéristiques des groupes d'avion (Atterrissage)

(Décollage)

Spectres d'émission pour l'A320 : Lmax en dB à une distance 1000 pieds normalisés à 70 dB à 1000 Hz :

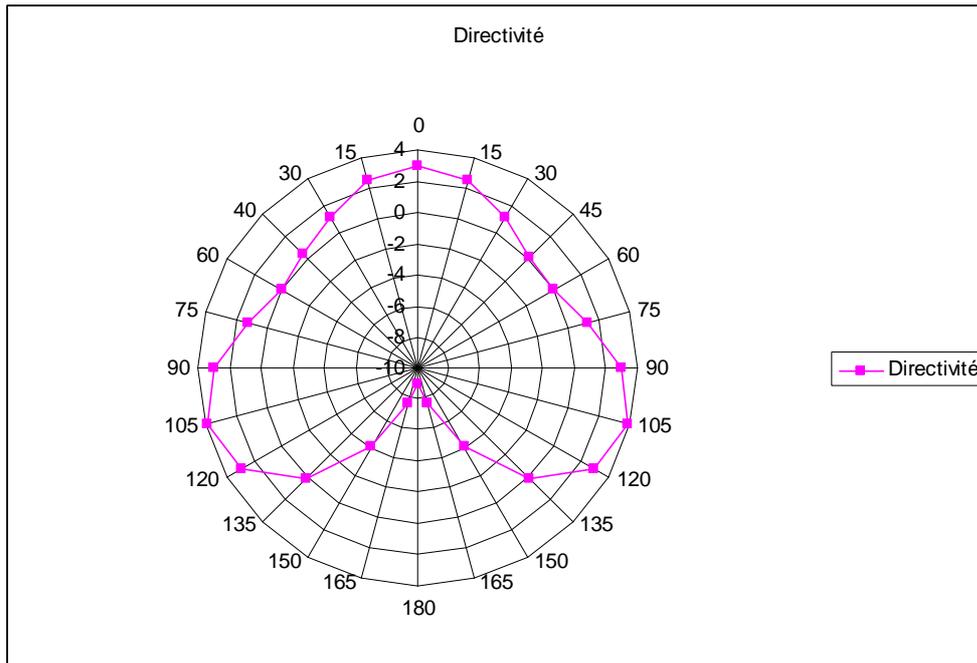
Bande octave	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
Spectre au décollage à 300m	66,1	76,6	77	72,2	70	70,6	63,5	42,3
Spectre à l'atterrissage à 300m	68,5	68,5	67,3	72,1	70	65,8	62,1	48,6

Les coefficients R_{n1} , R_{n2} et R_{n3} permettent de décrire la courbe de directivité dans le plan horizontal en fonction de l'angle θ (avec référence $\theta = 0$ au « nez » de l'avion) pour chaque bande d'octave.

$$\text{Directivité}(\theta) = 3.(R_{n1} \cdot \cos(\theta) + R_{n2} \cdot \cos(2\theta) + R_{n3} \cdot \cos(3\theta))$$

La norme AzB considère qu'en atterrissage la source ne présente pas de directivité particulière (les 3 coefficients R_{n1} , R_{n2} et R_{n3} valent zéro).

Le plan de vol est issu de la documentation Cadna-A FLG et AzB2008 pour la catégorie d'avion correspondante à l'airbus A320.



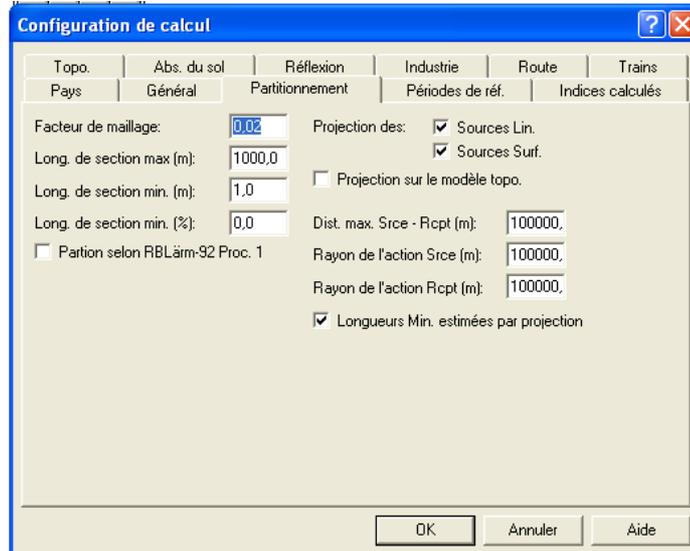
Directivité au décollage

Directivité à l'atterrissage : pas de directivité considérée.

Annexe 2. Configurations de calcul ISO 9613

Paramètres de calcul utilisés pour la ISO 9613 :

- Facteur de maillage : 0.02 (la ligne source est découpée par le logiciel en sources ponctuelles espacées au maximum de 0.02d, d étant la distance source-récepteur).



- Diffraction : prise en compte des diffractions horizontales et latérales
- Effet de sol : le coefficient G de l'ISO 9613 est choisi à 0 (sol réfléchissant)
- Température : 20°C
- Humidité : 50%
- Bâtiments avec perte par réflexion de 1dB ($\alpha = 0.21$)
- Toit des bâtiments réfléchissants (G=0).
- Nombre de réflexions : 8 (baissé à 4 pour certaines configurations trop gourmandes en temps de calcul)
- Spectre d'émission au décollage et à l'atterrissage: idem AzB
- Directivité au décollage : Idem AzB
- Directivité à l'atterrissage : Aucune (idem AzB)
- Calculs en « conditions favorables », sans prise en compte d'effets météorologiques particuliers (rose des vents, etc.).

Annexe 3. Fiches de mesures détaillées



ACNUSA Dépouillement mesures

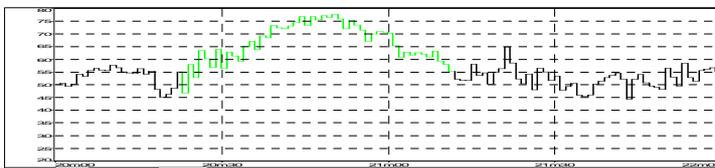
Selon la norme NFS-31-010

Heure : 15 h20

Avion : A321

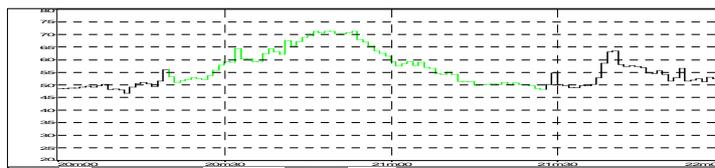
PF3 : Façade exposée, h=4m

L_{Amax} : 77,6 dBA



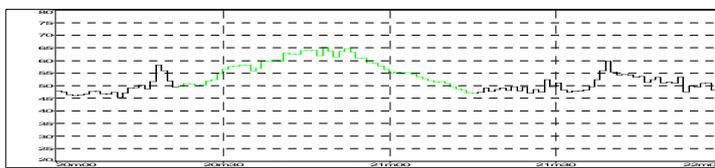
PF5 : Façade calme, h=11,6m

L_{Amax} : 71,3 dBA



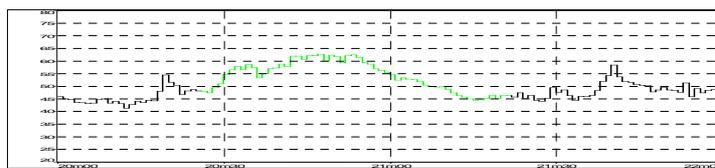
PF4 : Façade calme, h=6,6m

L_{Amax} : 65,1 dBA



PF2 : Façade calme, h=2,65m

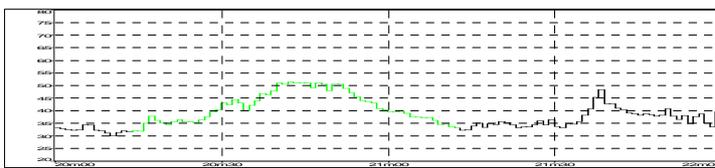
L_{Amax} : 62,7 dBA



PF1 : Façade calme, dans logement RdC

fenêtre ouverte

L_{Amax} : 51,3 dBA

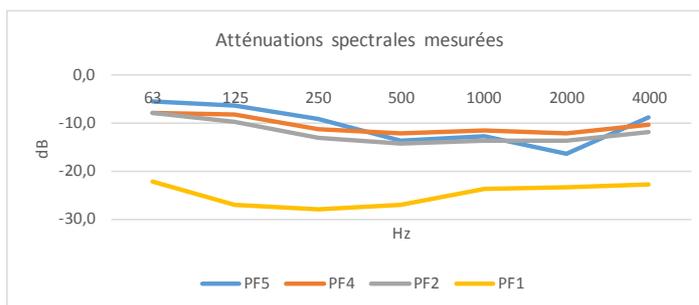


Niveaux sonores mesurés

	(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	L _{Aeq}	L _{Amax}
Exposée	PF3	70,5	69,8	70,0	70,8	65,9	61,0	42,5	71,1	77,6
Calme	PF5	64,9	63,6	60,8	57,3	53,0	44,4	33,6	64,2	71,3
Calme	PF4	62,7	61,6	58,8	58,5	54,3	48,9	32,1	59,2	65,1
Calme	PF2	62,6	60,1	57,1	56,5	52,2	47,4	30,7	57,4	62,7
Intérieur	PF1	48,2	42,6	42,1	43,6	42,3	37,4	19,7	45,9	51,3

Atténuations mesurées par rapport au point de référence PF3

	(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	L _{Aeq}	L _{Amax}
Calme	PF5	-5,6	-6,3	-9,3	-13,6	-12,9	-16,5	-8,9	-6,9	-6,3
Calme	PF4	-7,8	-8,2	-11,3	-12,3	-11,7	-12,0	-10,4	-11,9	-12,5
Calme	PF2	-7,9	-9,7	-12,9	-14,4	-13,7	-13,6	-11,8	-13,7	-14,9
Intérieur	PF1	-22,3	-27,2	-27,9	-27,2	-23,6	-23,6	-22,8	-25,2	-26,3





ACNUSA Dépouillement mesures

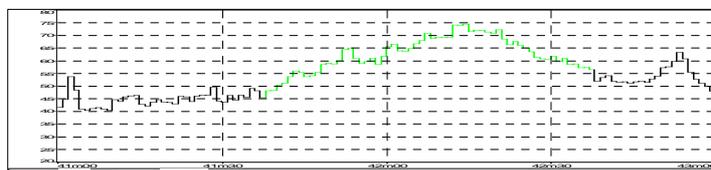
Selon la norme NFS-31-010

Heure : 15 h42

Avion : E190

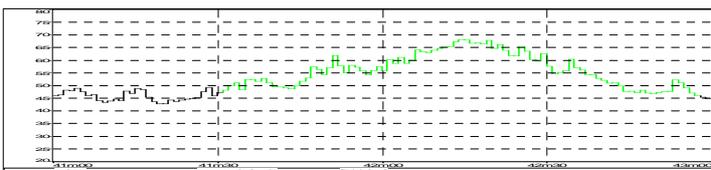
PF3 : Façade exposée, h=4m

L_{Amax} : 74,5 dBA



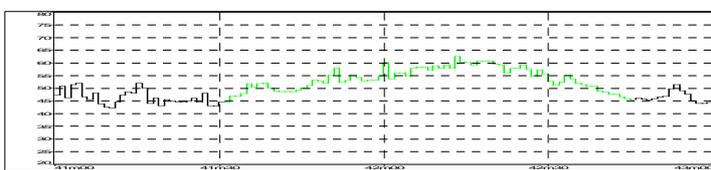
PF5 : Façade calme, h=11,6m

L_{Amax} : 68,1 dBA



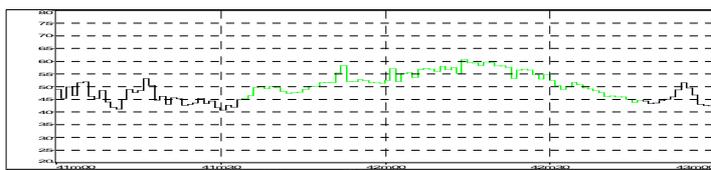
PF4 : Façade calme, h=6,6m

L_{Amax} : 62,5 dBA



PF2 : Façade calme, h=2,65m

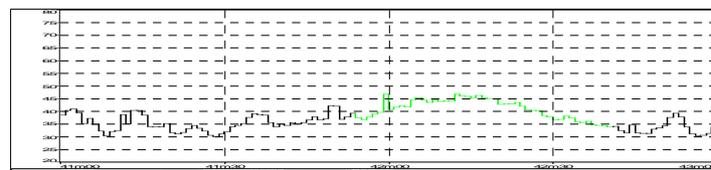
L_{Amax} : 60,5 dBA



PF1 : Façade calme, dans logement RdC

fenêtre ouverte

L_{Amax} : 46,8 dBA

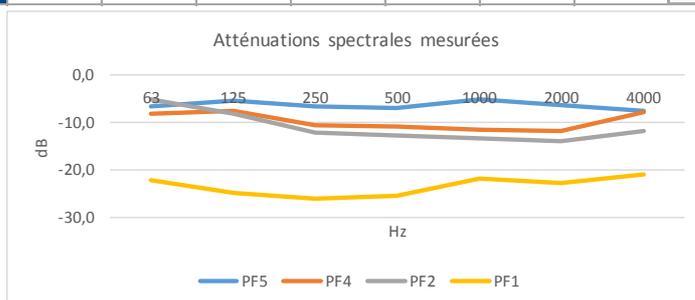


Niveaux sonores mesurés

	(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	L _{Aeq}	L _{Amax}
Exposée	PF3	68,2	67,5	68,8	66,8	60,7	52,6	41,2	66,9	74,5
Calme	PF5	61,6	62,1	62,2	59,7	55,4	46,3	33,8	60,5	68,1
Calme	PF4	60,1	60,0	58,3	55,9	49,1	40,9	33,4	55,9	62,5
Calme	PF2	63,1	59,3	56,7	54,1	47,5	38,6	29,3	54,5	60,5
Intérieur	PF1	46,0	42,6	42,7	41,4	38,9	30,0	20,2	42,7	46,8

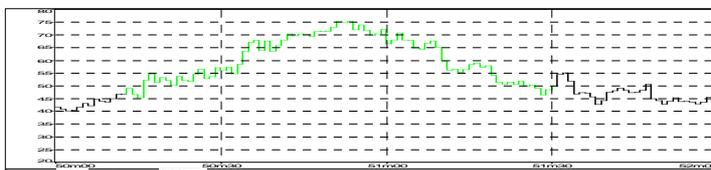
Atténuations mesurées par rapport au point de référence PF3

	(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	L _{Aeq}	L _{Amax}
Calme	PF5	-6,6	-5,5	-6,6	-7,0	-5,2	-6,3	-7,4	-6,4	-6,4
Calme	PF4	-8,1	-7,5	-10,4	-10,9	-11,6	-11,6	-7,8	-11,0	-12,0
Calme	PF2	-5,1	-8,3	-12,0	-12,6	-13,2	-14,0	-11,9	-12,4	-14,0
Intérieur	PF1	-22,2	-25,0	-26,1	-25,3	-21,8	-22,6	-21,0	-24,2	-27,7



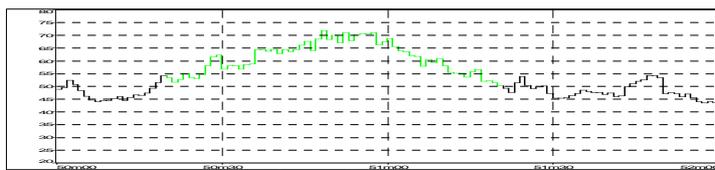
PF3 : Façade exposée, h=4m

L_{Amax} : 75,2 dBA



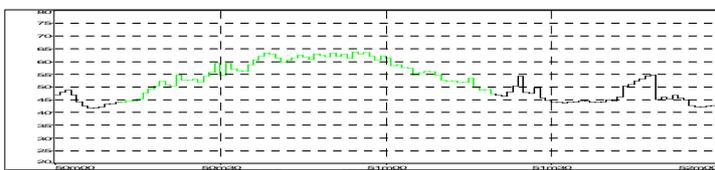
PF5 : Façade calme, h=11,6m

L_{Amax} : 71,9 dBA



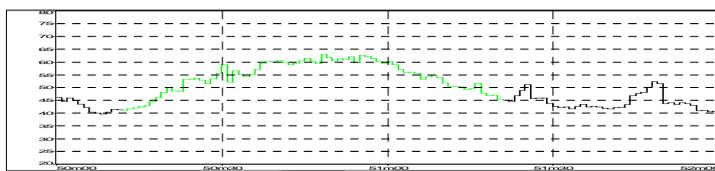
PF4 : Façade calme, h=6,6m

L_{Amax} : 63,7 dBA



PF2 : Façade calme, h=2,65m

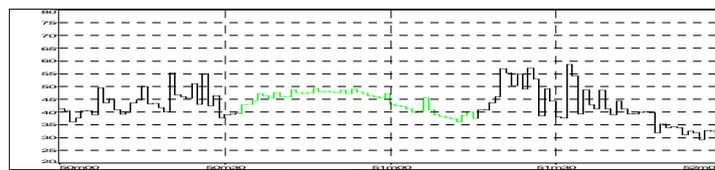
L_{Amax} : 63,0 dBA



PF1 : Façade calme, dans logement RdC

fenêtre ouverte

L_{Amax} : 49,3 dBA

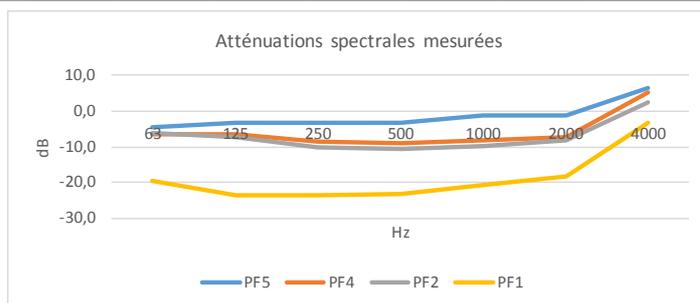


Niveaux sonores mesurés

	(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	L _{Aeq}	L _{Amax}
Exposée	PF3	71,1	69,7	69,1	66,4	62,0	53,8	33,2	67,2	75,2
Calme	PF5	66,7	66,5	65,6	63,0	60,8	52,5	39,7	64,9	71,9
Calme	PF4	64,7	63,1	60,4	57,6	53,7	46,5	38,7	58,8	63,7
Calme	PF2	64,9	62,4	59,0	55,9	52,1	45,6	35,7	57,4	63,0
Intérieur	PF1	51,4	46,3	45,4	43,1	41,4	35,7	29,7	45,7	49,3

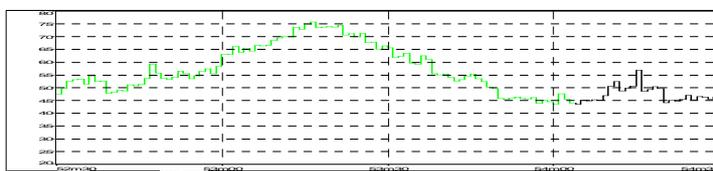
Atténuations mesurées par rapport au point de référence PF3

	(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	L _{Aeq}	L _{Amax}
Calme	PF5	-4,3	-3,2	-3,5	-3,4	-1,2	-1,3	6,5	-2,3	-3,3
Calme	PF4	-6,4	-6,6	-8,7	-8,9	-8,3	-7,3	5,5	-8,4	-11,5
Calme	PF2	-6,2	-7,3	-10,1	-10,6	-9,9	-8,3	2,6	-9,8	-12,2
Intérieur	PF1	-19,7	-23,5	-23,7	-23,4	-20,6	-18,2	-3,5	-21,5	-25,9



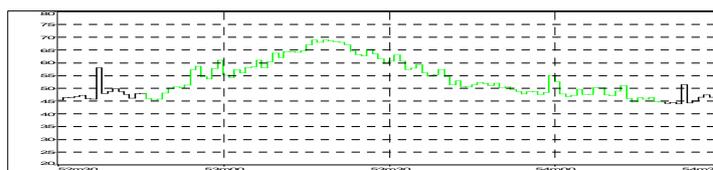
PF3 : Façade exposée, h=4m

LAmax : 75,7 dBA



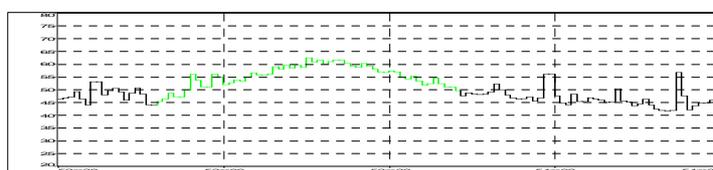
PF5 : Façade calme, h=11,6m

LAmax : 68,8 dBA



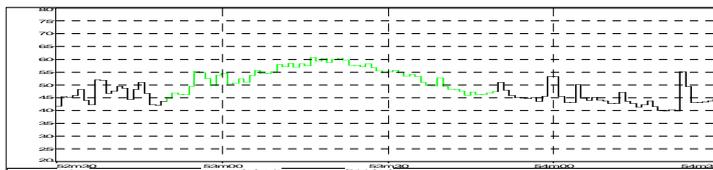
PF4 : Façade calme, h=6,6m

LAmax : 62,4 dBA



PF2 : Façade calme, h=2,65m

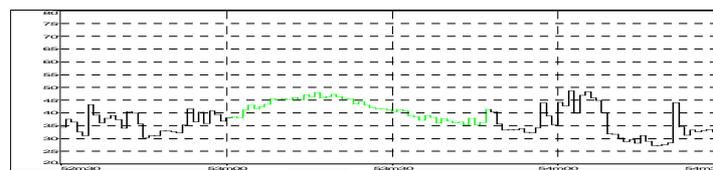
LAmax : 60,7 dBA



PF1 : Façade calme, dans logement RdC

fenêtre ouverte

LAmax : 48,0 dBA

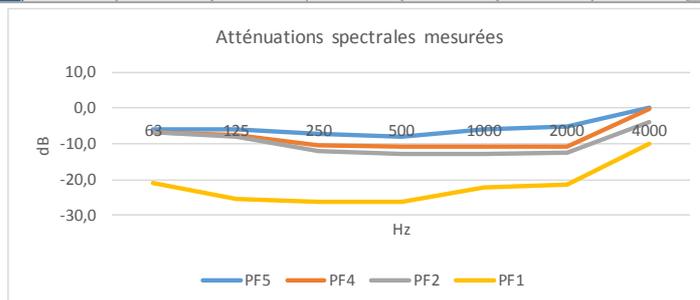


Niveaux sonores mesurés

	(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	LAeq	LAmax
Exposée	PF3	71,1	70,9	70,1	66,9	61,3	52,8	33,9	67,4	75,7
Calme	PF5	65,2	65,0	62,9	58,9	55,4	47,6	34,1	60,5	68,8
Calme	PF4	64,2	63,6	59,9	56,1	50,5	42,0	33,5	57,1	62,4
Calme	PF2	64,5	62,8	58,2	54,0	48,6	40,4	30,0	55,3	60,7
Intérieur	PF1	50,3	45,4	44,1	40,9	39,4	31,6	24,0	43,2	48,0

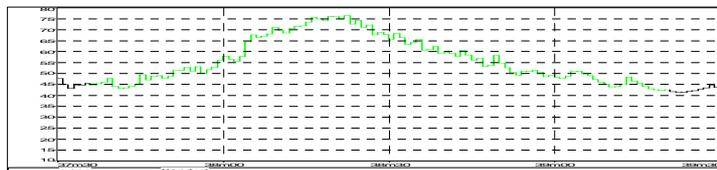
Atténuations mesurées par rapport au point de référence PF3

	(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	LAeq	LAmax
Calme	PF5	-5,9	-5,9	-7,2	-8,0	-5,9	-5,2	0,2	-6,9	-6,9
Calme	PF4	-6,9	-7,3	-10,2	-10,8	-10,8	-10,8	-0,4	-10,3	-13,3
Calme	PF2	-6,6	-8,1	-11,9	-12,9	-12,7	-12,4	-3,9	-12,1	-15,0
Intérieur	PF1	-20,8	-25,5	-26,1	-26,0	-21,9	-21,2	-9,9	-24,2	-27,7



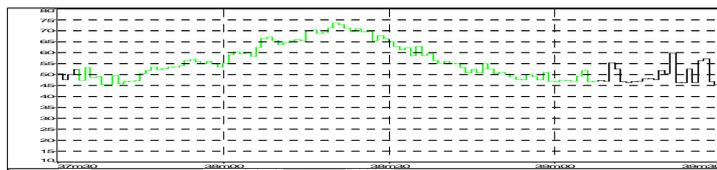
PF3 : Façade exposée, h=4m

L_{Amax} : 76,3 dBA



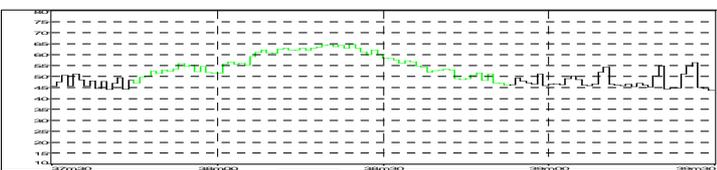
PF5 : Façade calme, h=11,6m

L_{Amax} : 73,4 dBA



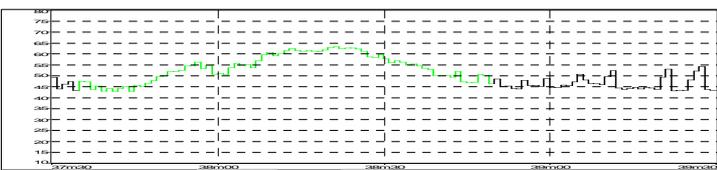
PF4 : Façade calme, h=6,6m

L_{Amax} : 64,6 dBA



PF2 : Façade calme, h=2,65m

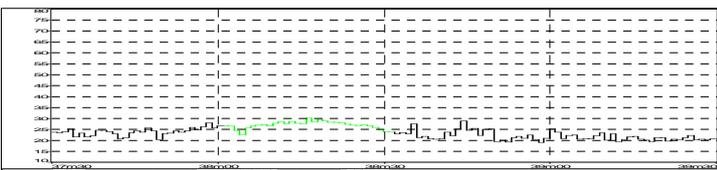
L_{Amax} : 63,3 dBA



PF1 : Façade calme, dans logement RdC

fenêtre fermée

L_{Amax} : 30,0 dBA

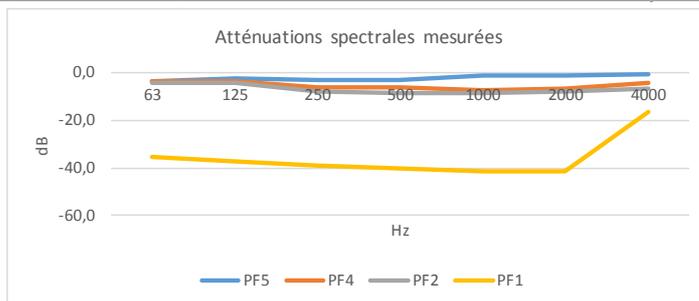


Niveaux sonores mesurés

	(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	L _{Aeq}	L _{Amax}
Exposée	PF3	69,3	67,8	68,0	66,0	61,8	54,3	33,8	66,7	76,3
Calme	PF5	65,6	65,5	65,1	63,1	60,5	52,8	32,8	64,6	73,4
Calme	PF4	65,2	64,2	61,9	59,6	54,6	47,4	29,7	60,2	64,6
Calme	PF2	64,8	63,1	60,1	57,4	53,0	46,1	26,8	58,6	63,3
Intérieur	PF1	34,0	30,7	29,2	26,0	20,1	13,0	17,3	27,4	30,0

Atténuations mesurées par rapport au point de référence PF3

	(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	L _{Aeq}	L _{Amax}
Calme	PF5	-3,7	-2,3	-3,0	-2,9	-1,3	-1,6	-1,0	-2,1	-2,9
Calme	PF4	-4,1	-3,6	-6,1	-6,4	-7,2	-6,9	-4,1	-6,5	-11,7
Calme	PF2	-4,6	-4,7	-7,9	-8,6	-8,8	-8,2	-7,0	-8,1	-13,0
Intérieur	PF1	-35,3	-37,1	-38,8	-40,0	-41,7	-41,3	-16,5	-39,3	-46,3





ACNUSA Dépouillement mesures

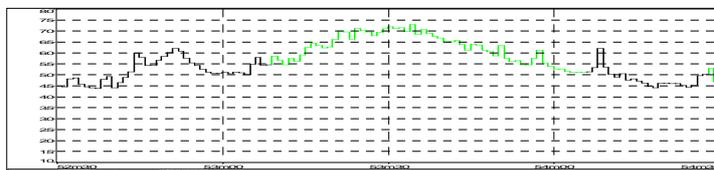
Selon la norme NFS-31-010

Heure : 16h53

Avion : A320

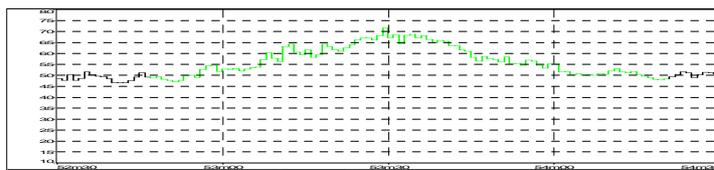
PF3 : Façade exposée, h=4m

L_{Amax} : 72,9 dBA



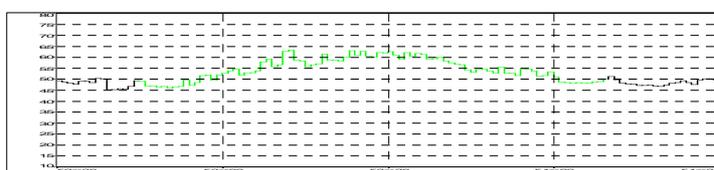
PF5 : Façade calme, h=11,6m

L_{Amax} : 71,6 dBA



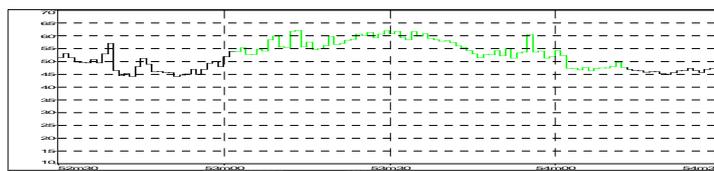
PF4 : Façade calme, h=6,6m

L_{Amax} : 63,2 dBA



PF2 : Façade calme, h=2,65m

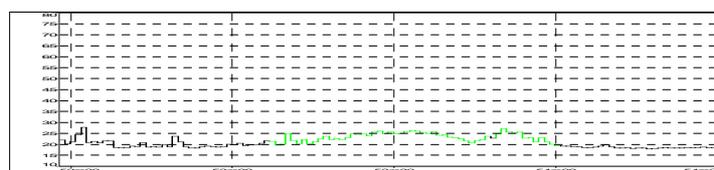
L_{Amax} : 62,2 dBA



PF1 : Façade calme, dans logement RdC

fenêtre fermée

L_{Amax} : 26,3 dBA

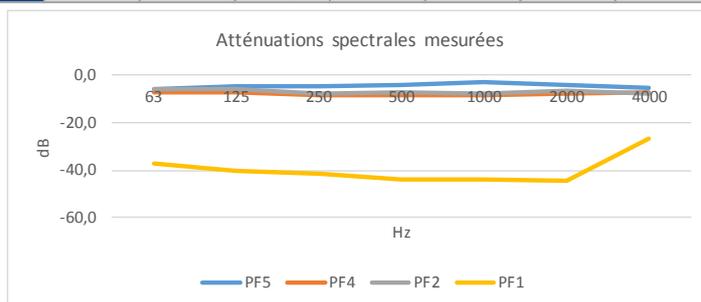


Niveaux sonores mesurés

	(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	L _{Aeq}	L _{Amax}
Exposée	PF3	70,7	69,0	68,0	65,1	60,3	53,1	36,2	66,2	72,9
Calme	PF5	64,7	64,2	63,1	60,8	57,0	48,8	30,4	61,8	71,6
Calme	PF4	63,2	61,7	59,2	56,8	51,7	44,9	29,0	57,4	63,2
Calme	PF2	64,7	62,8	60,0	57,6	52,4	46,1	28,3	58,4	62,2
Intérieur	PF1	33,5	28,9	26,8	21,2	16,6	8,4	9,3	23,7	26,3

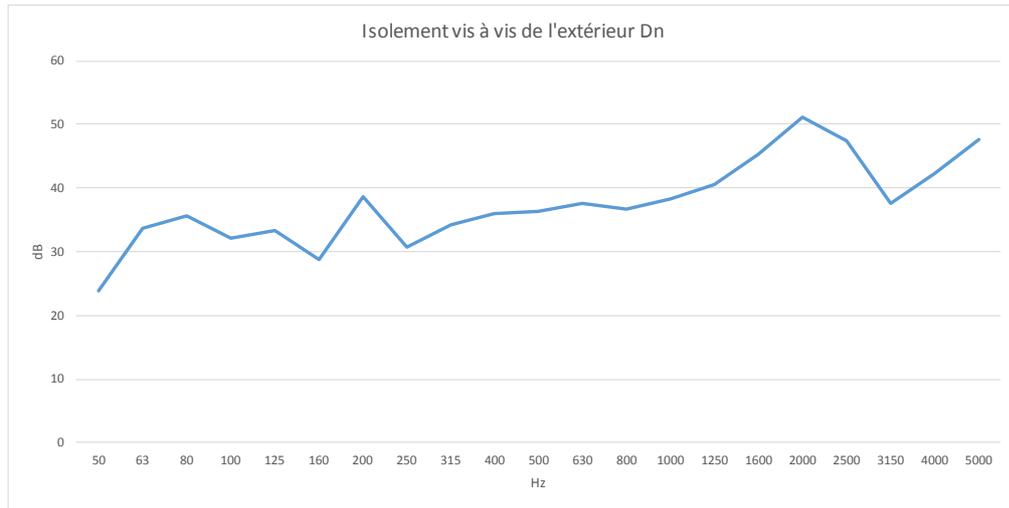
Atténuations mesurées par rapport au point de référence PF3

	(Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	L _{Aeq}	L _{Amax}
Calme	PF5	-6,0	-4,8	-5,0	-4,4	-3,3	-4,3	-5,8	-4,4	-1,3
Calme	PF4	-7,5	-7,3	-8,8	-8,4	-8,5	-8,2	-7,3	-8,8	-9,7
Calme	PF2	-6,0	-6,2	-8,1	-7,6	-7,9	-7,0	-8,0	-7,8	-10,7
Intérieur	PF1	-37,2	-40,1	-41,2	-43,9	-43,7	-44,7	-26,9	-42,5	-46,6



Isolation de façade fenêtre fermée, mesuré avec source de bruit artificielle

Bande tiers oct (Hz)	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	A	DnTA,tr
Niveau extérieur 2m en façade (PF2)	51,4	51,3	56,0	68,7	70,4	73,1	78,8	71,0	74,6	72,7	73,0	78,6	81,2	81,5	80,0	75,4	78,0	76,7	74,8	72,6	73,8	88,6	
Niveau sonore intérieur logement (PF1)	28	18	20	37	37	44	40	40	40	37	37	41	45	43	40	30	27	29	37	30	26	49,28	
Isolément Dn	24	34	36	32	33	29	39	31	34	36	36	38	37	38	41	45	51	48	38	42	48		37



Isolation de façade fenêtre ouverte (1 battant uniquement), mesurée avec source de bruit artificielle

Bande tiers oct (Hz)	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	A	DnTA,tr
Niveau extérieur 2m en façade (PF2)	51,7	50,5	55,0	68,6	70,1	72,4	78,0	71,0	75,5	73,1	72,3	78,2	81,0	81,7	79,6	74,3	78,0	76,5	74,3	72,0	72,7	88,4	
Niveau sonore intérieur logement (PF1)	44	38	32	52	54	62	61	60	59	67	62	64	66	68	68	65	62	62	60	58	59	75,19	
Isolément Dn	7	13	23	17	16	10	17	11	16	7	11	14	16	13	12	9	16	15	14	14	14		12

