

CFA/VISHNO 2016

Comparaison des indicateurs temporels d'un passage d'avion issus d'un modèle aéronautique classique et d'enregistrements au sol

A.-L. Verneil^a, C. Lavandier^b et N. Duchêne^a

^aENVISA, 22 rue Oberkampf, 75011 Paris, France

^bUniversité de Cergy-Pontoise, laboratoire MRTE, 5 Mail Gay Lussac, Neuville sur Oise, 95031 Cergy Pontoise Cedex, France

anne-laure.verneil@env-isa.com



LE MANS

Une étude comparative entre un modèle de bruit aéronautique et des données de mesure a été réalisée dans le cadre d'un projet européen visant à étudier l'influence de nouvelles procédures de vol optimisées afin de réduire le bruit aux abords des aéroports. Ces procédures ont une influence sur le niveau moyen d'un passage d'avion mais aussi sur son évolution temporelle. Les indicateurs d'évolution temporelle, tels que la pente ou la durée au dessus d'un seuil, prennent part au processus perceptif d'évaluation du désagrément lié au bruit des avions. L'évaluation et la comparaison des procédures au sein de ce projet reposent sur des données modélisées et des mesures et enregistrements in situ. La modélisation est réalisée à l'aide du modèle américain INM 7.0 à partir de données météorologiques, de performances et de trajectoires mesurées au cours des vols. Ce modèle est conçu pour modéliser le bruit produit par une journée de trafic et non pas par un passage singulier. Un post-traitement à l'aide du logiciel LEA permet d'extraire l'évolution temporelle des enregistrements sonores. Cette étude présente dans un premier temps la méthode d'extraction de l'évolution temporelle du PNLT (*Tone corrected Perceived Noise Level*) et du niveau en dB(A) à partir du modèle. Puis les variables temporelles, telles que la pente et la durée, issues de la modélisation et des enregistrements sonores sont comparées. Cette étude montre la difficulté d'obtenir des indicateurs temporels pertinents à partir des modèles d'ingénierie, alors que les valeurs de niveaux maximums semblent être correctement prédits par les modèles.

1 Présentation de l'étude

1.1 Introduction

De nombreuses études identifient le bruit comme étant la principale source de nuisance dans l'environnement urbain. Dans le domaine des transports, le bruit de passage d'avions est considéré comme étant le plus gênant [1]. Parallèlement à cela, en 2011, 24 millions de personnes en Europe étaient impactées par les bruits d'avions. Compte-tenu de l'augmentation du trafic aérien, ce nombre ne va cesser de croître et devrait atteindre 30 millions d'ici 2025. C'est pourquoi la réduction du bruit des avions à proximité des aéroports est l'une des préoccupations majeures des acteurs de l'aéronautique.

Dans ce contexte, différentes mesures sont envisagées pour limiter l'impact environnemental de l'aviation, parmi lesquelles on trouve le développement de nouveaux concepts opérationnels visant à réduire le bruit et les émissions de gaz polluants. Le projet européen ATAEGINA s'intéresse à trois procédures de vol dites optimisées (une procédure de décollage, une procédure de croisière et une d'atterrissage), qui ont été développées et testées sur des modèles aéronautiques en laboratoire dans le but de participer à la diminution du bruit et des émissions de polluants. La procédure de décollage – MCDP acronyme de Multi Criteria Departure Procedure – dont traite cet article est l'une des procédures étudiées. L'objectif de ce projet ATAEGINA est de tester en situation réelle, sur des vols commerciaux, ces procédures optimisées. Ces expérimentations en condition réelles doivent permettre d'une part d'identifier les problèmes de mise en œuvre, et d'autre part d'évaluer de manière plus réaliste les avantages escomptés, notamment en termes de diminution du bruit.

Les vols commerciaux expérimentaux, qui ont lieu en ce moment grâce à la participation au projet de la compagnie aérienne TAP sur la plateforme aéroportuaire de Lisbonne, sont instrumentés afin de modéliser les vols avec des paramètres contrôlés (poussée, trajectoires etc. voir §3). Les modélisations ont pour but de comparer les procédures optimisées par rapport aux procédures classiques en contrôlant certains paramètres qui sont par nature aléatoires et non contrôlables par l'équipage, en particulier les conditions météorologiques et la dispersion des trajectoires. En parallèle, des enregistrements sont effectués (voir §2)

pour comparer les indicateurs acoustiques issus des enregistrements et des modèles.

Des tests perceptifs en laboratoire, seront réalisés par la suite à partir des enregistrements de vols réels classiques et optimisés. Ils auront pour objectif d'évaluer l'influence de ces procédures sur la gêne des riverains d'aéroport. Ainsi, il sera possible de vérifier si une diminution du niveau sonore, mais aussi un changement dans l'évolution temporelle du passage des avions s'accompagnent ou non d'une diminution statistiquement significative de la gêne ressentie par les riverains, dûe à l'exposition sonore. En effet, des études précédentes ont montrées [2-4] qu'outre le niveau sonore qui prédomine dans le processus d'évaluation de la gêne, certains aspects temporels et spectraux du passage d'avions ont un impact sur la perception du bruit d'avion. Ainsi le niveau sonore, la pente et la durée, les émergences spectrales ou les raies non harmoniques prennent part aux jugements de la gêne provoquée par un passage d'avion.

La gêne provoquée par le bruit des avions n'est pas liée uniquement à des facteurs acoustiques. Des modérateurs, dits facteurs non acoustiques, prennent part à 2/3 de l'évaluation du désagrément lié au bruit d'avions [5]. Or les compagnies aériennes et les plateformes d'aéroports ne maîtrisent pas ces facteurs. Il est donc primordial d'étudier la part de réduction de la gêne exprimée par les riverains due à la modification des procédures de vol hors contexte, c'est-à-dire en laboratoire. Les études perceptives en laboratoire permettent (1) de minimiser la part de la gêne qui est due aux facteurs contextuels autour des aéroports et ainsi de concentrer l'étude sur l'exposition sonore (2) et d'étudier des situations de vols encore exceptionnelles en anticipation de situations futures. Par contre, puisqu'elles minimisent l'influence du contexte social, il est parfois difficile de transférer les résultats à des situations réelles de terrain.

L'étude dont traite cet article s'intéresse à la modélisation des niveaux sonores et des aspects temporels des passages d'avions isolés. Il ne s'intéresse pas aux effets spectraux en tant que tels. Si l'on fait l'hypothèse que ces deux notions ont une influence sur la gêne ressentie par les riverains, il est intéressant de déterminer si les modèles acoustiques classiques utilisés en ingénierie permettent d'évaluer à la fois les niveaux sonores mais aussi les

paramètres perceptifs temporels liés aux passages des avions. Au cours de cette étude, les niveaux et les aspects temporels sont calculés à partir du modèle de bruit INM 7.0®. Ces mêmes indicateurs énergétiques et temporels sont calculés à partir des enregistrements via le logiciel LEA®. Ces indicateurs issus de modèles et d'enregistrements sonores seront comparés.

1.2 Indicateurs temporels

Les indicateurs étudiés ici sont relatifs à l'évolution temporelle du bruit d'avion. Dans cette étude, les aspects temporels sont relatifs à l'évolution de certains niveaux sonores au cours du temps. Trois niveaux sonores ont été étudiés : le L_A niveau pondéré A, le L_C niveau pondéré C et le PNL Perceived Noise level [6], et deux aspects temporels dérivés de ces indicateurs examinés :

- La pente entre l'instant t_0 où le niveau sonore est maximal et l'instant t_1 où le niveau est égal au niveau maximal -10dB. Cet indicateur caractérise notamment la soudaineté du passage d'avion.
- La durée entre les instant t_1 et t_2 auxquels le niveau sonore correspond au niveau maximal -10dB.

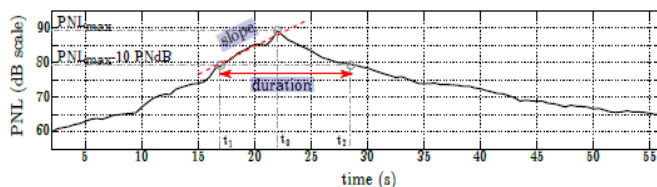


Figure 1 : Identification de la pente et de la durée sur l'évolution temporelle d'un bruit d'avion (schéma issu des travaux de A. Paté et al. [3]).

1.3 Modèle utilisé

INM est le modèle de bruit intégré de la FAA (Federal Aviation Administration). La méthodologie de calcul de bruit de ce logiciel a été développée sur la base de trois documents de référence : la Procédure pour le calcul du bruit des avions au voisinage des aéroports de la SAE [7], le document 29 de l'ECAC [8], la circulaire 205 de l'OACI [9]. INM permet de calculer les indicateurs classiques tels que les niveaux d'exposition pondérés A et C (évalués sur une durée d'exposition correspondante au $L_{max} - 10$ dB), l'EPNL (Effective Perceived Noise Level), des niveaux équivalents sur 24h tel que le L_{Aeq} , le L_{DEN} ou le WECPNL (Weight Equivalent Continuous Perceived Noise Level). INM permet aussi le calcul de métriques basées sur la durée (durée au dessus d'un seuil de niveau sonore) ainsi que le calcul de contour de bruit à partir de paramètres d'entrée. Les paramètres d'entrée comprennent entre autres : les conditions météorologiques à l'aéroport, les types d'avions, les paramètres opérationnels et la trajectoire des vols des avions.

La méthodologie repose sur le calcul du niveau de bruit au sol en tout point de la plateforme aéroportuaire. Le niveau de pression L_p calculé au sol pour un niveau de puissance L_w de l'avion situé à une distance d du récepteur est noté $L_p(W,d)$. Il est calculé à l'aide d'une interpolation ou d'une extrapolation construites à partir de 4 niveaux $L_p(W1,d1)$; $L_p(W1,d2)$; $L_p(W2,d1)$ et $L_p(W2,d2)$. Ces quatre niveaux sont calculés dans le modèle en fonction de

plusieurs paramètres géométriques et physiques associés à des segments de la trajectoire de vol de l'avion. Sur chaque segment, la trajectoire est rectiligne et les paramètres tels que l'inclinaison, la vitesse ou encore la puissance du moteur sont considérés constants. Enfin, des ajustements sont apportés pour prendre en compte l'absorption atmosphérique, l'impédance des ondes acoustiques dans l'air, la durée d'intégration des niveaux en fonction de la vitesse de l'avion et l'atténuation latérale qui dépend de l'impédance du sol.

2 Méthodologie d'enregistrement

Les enregistrements utilisés dans cette étude ont été réalisés par les stations de mesure fixes de l'aéroport de Lisbonne exploitées par ANA Aeroportos de Portugal, l'un des partenaires du projet ATAEGINA. Ces stations de mesures, appelés NMT (Noise Monitoring Station) sont équipées de systèmes de mesures Bruel & Kjaer composés de microphones placés au sommet d'une perche, à environ 2m50 du sol. Chaque système est relié à un réseau internet qui collecte en temps réel les informations relatives aux mesures de bruits, aux enregistrements audio permettant le contrôle des mesures de bruit (notamment pour vérifier que le bruit détecté est bien celui d'un passage d'avion) et aux conditions météorologiques. Sept NMT sont installées aux abords de l'aéroport de Lisbonne, cependant les vols MCDP n'étant expérimentés qu'au départ d'une piste spécifique, seules les données issues des deux stations de mesures NMT 1 et NMT 3 nous intéressent au cours de cette étude (Figure 2).

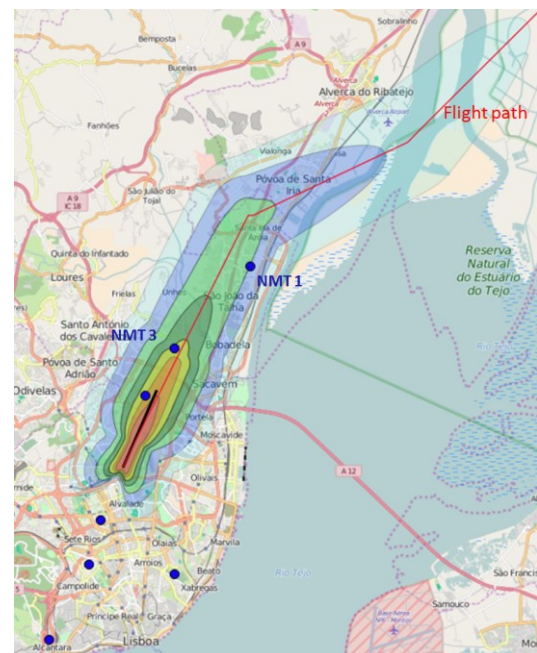


Figure 2 : Points de localisation des NMT.

Les enregistrements réalisés par les NMT sont post-traités afin de ne conserver que les enregistrements relatifs aux bruits d'avion. Nous n'avons pas pu maîtriser ce traitement, c'est pourquoi les sons ont des durées inférieures aux durées classiques de passage des avions. Ils sont enregistrés au format mp3. Les signaux audio ont été analysés avec le logiciel LEA, en transformant les signaux mp3 en signaux wav, permettant ainsi d'en extraire les indicateurs acoustiques énergétiques et temporels.

3 Méthodologie d'obtention de l'évolution temporelle avec INM

Le modèle INM est conçu pour évaluer l'impact d'un aéroport d'un point de vue global, c'est à dire pour un trafic sur une durée (une journée, une semaine, un an...) déterminée, mais n'est pas dédié à étudier des passages d'avions spécifiques. Le modèle ne permet donc pas en premier lieu d'obtenir l'évolution temporelle d'un passage d'avion, ni d'étudier des vols pour lesquels les procédures ne sont pas normalisées. Il est cependant possible de pousser le modèle dans ses retranchements et de réaliser ces modélisations.

Pour cette étude, des données FDR (Flight Data Recording), enregistrées au cours des vols à bord de l'avion, ont été utilisées en entrée du modèle. Ces données contiennent des informations relatives à la trajectoire de l'avion, son altitude, sa vitesse, les configurations des bords et volets... Couplées aux données météorologiques mesurées à l'aéroport elles permettent de définir un scénario de modélisation comprenant :

- La trajectoire spécifique du vol
- La procédure MCDP telle qu'elle a été réalisée lors du test sur vol commercial (initialement, INM ne propose que de modéliser des trajectoires standard ou ICAO)

Ces données peuvent être contrôlées sans utiliser l'interface logicielle, grâce à la manipulation des fichiers .dbf qui caractérisent l'étude. L'utilisation du langage Python peut d'une part permettre de générer les fichiers de l'étude, et d'autre part d'automatiser le processus de modélisation du logiciel. Dans le cas contraire il est nécessaire de lancer une simulation INM pour chaque point de la courbe d'évolution temporelle, et ce pour chaque indicateur.

Une fois l'étude construite, outre les indicateurs de niveaux, INM permet de calculer des indicateurs relatifs à la durée d'exposition. Ces indicateurs sont au nombre de trois : le TALA Time-Above-Level-A, le TALC Time-Above-Level-C et le TAPNL Time-Above-Perceived-Noise-Level. Ils permettent de calculer le temps d'exposition à un niveau sonore préalablement défini (L_A , L_C ou PNL) en un point donné. Le calcul de la valeur de ces durées pour un grand nombre de valeurs de niveaux sonores permet d'obtenir l'évolution au cours du temps de ces indicateurs. La durée d'exposition à chaque niveau sonore (par pas de 0,5 dB) est ainsi obtenue, et permet après répartition symétrique des durées autour du maximum, d'obtenir la forme de l'évolution temporelle de l'indicateur.

4 Comparaisons

4.1 Calage des courbes et types de modèles

L'objectif de l'étude est de comparer les évolutions temporelles d'indicateurs calculés à l'aide de LEA pour les enregistrements et modélisés dans INM grâce aux indicateurs Time-Above pour plusieurs vols. L'obtention de l'évolution temporelle dans INM étant fastidieuse, il est intéressant de vérifier si une méthode plus grossière est envisageable. La figure 3 présente trois types d'évolutions temporelles : l'évolution temporelle issue des

enregistrements et calculée grâce au logiciel LEA, et deux évolutions issues d'INM. L'une est obtenue en calculant le TALC pour un seuil incrémenté par pas de 0,5dB ; tandis que la seconde est construite uniquement à partir des valeurs $L_{C_{MAX}}$ et $L_{C_{MAX}}-10$ dB.

Les courbes sont systématiquement recalées l'une sur l'autre en termes de décalage temporel : les niveaux sonores ne sont pas modifiés, en revanche les évolutions temporelles issues d'INM sont calées sur celles issues des enregistrements audio au point du niveau maximum. Le zéro de l'axe temporel correspond au début du signal audio. Une fois ce calage réalisé, il est possible de comparer les pentes et les durées.

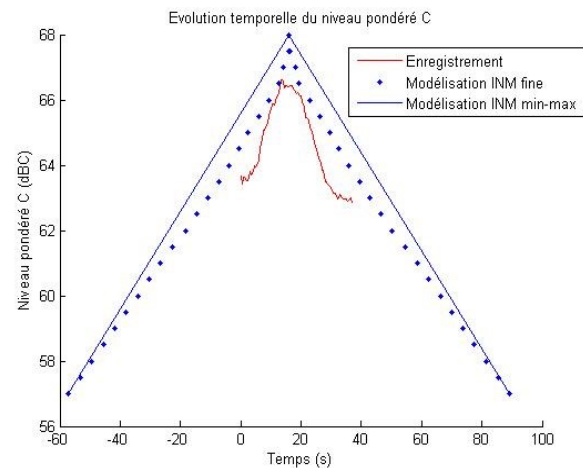


Figure 3 : Comparaison des trois types d'évolutions temporelles du niveau pondéré C pour un seul passage d'avion à procédure optimisée.

	Mesures	Modèle fin	Modèle Min/Max
Pente			
Moyenne	0,25	0,14	0,15
[Min;Max]	[0,22;0,31]	[0,09;0,16]	[0,10;0,18]
R² moyen	0,96	0,99	-
Durée (s)			
Moyenne	80,5	140,8	144,0
[Min;Max]	[68,2;89,7]	[137,5;143,1]	[140;148,6]

Tableau 1 : Moyennes et extrema des pentes et durées issues du L_c pour 5 vols MCDP, calculés à partir des enregistrements et des deux méthodes issues du modèle INM, au point NMT 3.

Le Tableau 1 présente le comparatif des trois types d'évolutions temporelles (mesures, modèle INM fin, et modèle INM ne prenant en compte que les valeurs extrêmes). Les valeurs présentées sont des moyennes (ainsi que les extrema à titre indicatif puisque le nombre de vols étudiés ne permet pas une comparaison statistiquement robuste) des valeurs obtenues à partir des 5 vols MCDP enregistrés ou modélisés au point NMT 3. Les pentes sont obtenues à partir de régressions linéaires des niveaux sonores entre le niveau max et le niveau max - 10 dB. Dans le cas des enregistrements, lorsque la durée du signal ne permet pas d'accéder à la valeur du [niveau maximal - 10dB], la régression est réalisée entre le niveau maximal et

la valeur minimale disponible. La durée est calculée à partir de l'équation de la droite de régression.

On constate que les valeurs obtenues via le modèle fin INM et le modèle moins précis donnent des résultats similaires, et que dans les deux cas le coefficient de détermination des régressions est bon (c'est-à-dire proche de 1). Les valeurs de pentes et de durées sont du même ordre de grandeur que celles obtenues à partir des enregistrements, puisque les rapports entre les indicateurs temporels sont inférieurs à deux.

3.2 Comparaisons enregistrements modèles en termes de niveaux et d'aspects temporels

Les évolutions temporelles des niveaux sonores pondérés A, C et du PNL issus des modélisations et des enregistrements pour 5 vols tests MCDP ayant eu lieu début 2016 ont été calculées. Dans le tableau 2, les pentes et les durées ont été moyennées pour ces 5 vols MCDP. Les résultats sont illustrés sur les graphes 3 à 5 pour un passage représentatif de l'étude.

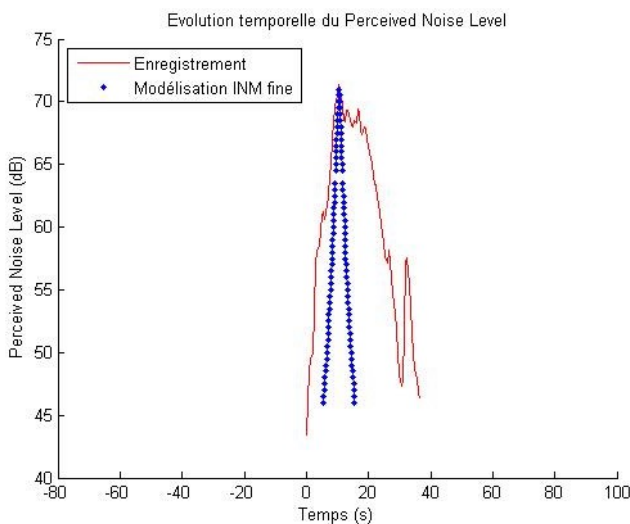


Figure 4 : Evolution temporelle du PNL issu d'INM et d'un enregistrement représentatif.

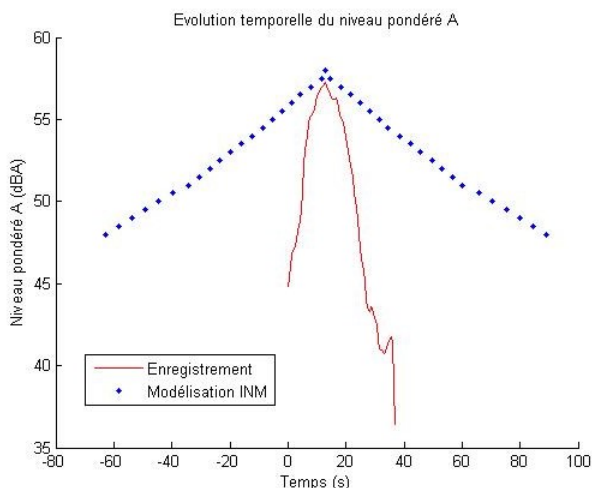


Figure 5 : Evolution temporelle du L_A issu d'INM et d'un enregistrement représentatif.

	Pente moyenne		Durée moyenne	
	INM	Audio	INM	Audio
L_A dB(A)	0,13 R ² =0,99	1,07 R ² =0,94	150,9	19,7
L_C dB(C)	0,14 R ² =0,99	0,25 R ² =0,96	140,8	80,5
PNL(dB)	5,56 R ² =0,95	2,35 R ² =0,91	3,24	17

Tableau 2 : Comparaisons des indicateurs moyens issus des évolutions temporelles calculées à partir d'INM et des enregistrements.

Concernant les données issues des enregistrements, elles semblent cohérentes : le PNL et le L_A sont de durées globales similaires et possèdent des dynamiques de variation similaires. Il est à noter que le calcul de la pente du PNL n'ont été réalisées que sur la pente montante du signal puisque celui-ci n'est pas symétrique, en revanche la durée est celle qui sépare les deux valeurs PNL-10dB du signal. Le signal du L_C est tronqué mais la durée calculée grâce à la régression linéaire est bien plus importante que celles du L_A et du PNL : cela est probablement dû au fait que cet indicateur porte davantage d'énergie dans les graves, ainsi le temps où le niveau est fort peut être plus long. Les résultats issus des enregistrements semblent donc réalistes.

La comparaison entre les évolutions calculées à l'aide d'INM et celles issues des enregistrements n'est pas évidente. En effet, si pour le L_C , les valeurs de pentes sont proches, pour le L_A la pente et la durée issus du modèle et de la mesure sont très différentes : la dynamique du niveau calculés par INM est bien plus faible que celle mise en avant par la modélisation, tandis que la durée est bien plus longue. Les résultats ne sont plus dans le même ordre de grandeur.

Dans le cas du PNL, la comparaison de la pente pour la phase ascendante montre que les valeurs sont similaires (rapport de 2) tandis que les durées sont bien différentes. En revanche on observe que contrairement aux enregistrements la durée du PNL et du L_A modélisés dans INM ne concordent pas du tout.

La formule utilisée pour calculer les Time-Above desquels sont tirés les évolutions temporelles modélisées dans INM est la suivante :

$$TA_{fr} = \left(\frac{4}{\pi} \right) \cdot t_0 \cdot \left[10^{\frac{[L_E, fr - L_{S_{mx}, fr}]}{10}} \right] \cdot \left[10^{\frac{[L_{S_{mx}, fr} - L_0]}{20}} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{60}$$

Où : L_E correspond au Noise Exposure Level ajusté pour le vol, $L_{S_{mx}}$ au niveau maximal ajusté pour le vol, L_0 au seuil de niveau sonore indiqué par l'utilisateur au dessus duquel la durée est calculée et t_0 un coefficient égal à 1 seconde pour le calcul du TALA et du TALC et à 10 secondes pour calcul du TAPNL. La différence de coefficient t_0 pourrait expliquer les différences de durée et dynamique entre l'évolution temporelle du PNL et celle du L_A calculés dans INM. Cependant il est difficile sans investigations

approfondies de comprendre toutes les subtilités du calcul du Time-Above dans INM.

5 Conclusion

Cette étude préliminaire montre qu'il est possible de manipuler un modèle ingénierie afin d'en extraire des indicateurs, quand bien même il n'a pas été conçu dans cette optique.

La comparaison entre les indicateurs temporels issus des enregistrements et de INM met en exergue que le niveau maximal calculé est toujours concordant quelque soit la source. Les niveaux pondérés C issues des deux méthodes semblent en accord. Ce n'est pas le cas des valeurs de PNL et L_A issus d'INM, l'origine des disparités pointées dans le paragraphe précédent devra être étudiée.

D'autre part les enregistrements audio utilisés étant de qualité un peu faible, notamment de part le fait qu'une partie d'entre eux est tronquée, la même étude va être réalisée sur des enregistrements propres réalisés très récemment au Portugal. Ces enregistrements seront de plus utilisés lors de prochains tests perceptifs.

Remerciements

Ce travail a été financé par un contrat CIFRE entre le laboratoire MRTE de l'Université de Cergy-Pontoise et la société ENVISA dans le cadre du projet européen ATAEGINA. Ce travail a pu être réalisé grâce à la participation de Mme Pereira et M. Gouveia (ANA Aeroportos de Portugal) qui ont fournis les enregistrements.

Références

- [1] H. M. Miedema, H. Vos, Exposure-response relationships for transportation noise, *Journal of the Acoustical Society of America* **104**(6), 3432-3445 (1998)
- [2] Barbot, B. (2008). Caractérisation perceptive des bruits d'avions: Influence de leur qualité sonore confrontée à la répétition des événements sur l'expression de la gêne fonctionnelle. Université de Cergy-Pontoise
- [3] Y. Wang, S. Liu, Y. Dong and J. Cai, *Effets of acoustic characteristics on annoyance of aircraft fluover noise*, Noise Control Engineering Journal 63-3, pp. 279-286 (2015)
- [4] A. Paté, C. Lavandier, Influence of temporal aspects of aircraft sound signature on perceived unpleasantness, *Internoise 2015*
- [5] R. Guski. Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise and Health*, Vol.1, No.3, pp. 45-12, 1999.
- [6] Kryter, K. D. (1959). Scaling human reactions to the sound from aircraft. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 31(11), 1415-1429.
- [7] Society of Automotive Engineers, Committee A-21, Aircraft Noise, Procedure for the Computation of Airplane Noise in the Vicinity of Airports, Aerospace Information Report No. 1845, Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, Inc., March 1986.
- [8] European Civil Aviation Conference (ECAC), Report on Standard Method for Computing Noise Contours around Airports, Doc 29 (3rd Edition), July 2005
- [9] International Civil Aviation Organization (ICAO), Recommended Method for Computing Noise around Airports, Circular 205-AN/1/25, March 1987.