



N°d'ordre NNT : xxx

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON

opérée au sein de

l'Université Claude Bernard Lyon 1

Ecole Doctorale ED 205

École Doctorale Interdisciplinaire Sciences-Santé

Spécialité de doctorat : **Épidémiologie**

Soutenue publiquement le 07/12/2018, par :

Ali Mohamed Nassur

Effets de l'exposition au bruit des avions sur la qualité du sommeil des riverains des aéroports français

Devant le jury composé de :

CHARBOTEL Barbara, PU-PH, Université Lyon 1

Présidente

ADRIEN Joëlle, Directeure de recherche, INSERM

Rapporteure

MAUNY Frédéric, PU-PH, Université de Franche-Comté

Rapporteur

BRINK Mark, PhD, Senior Scientist, Office fédéral de l'Environnement, Suisse

Examineur

DAVENNE Damien, Professeur des Universités, Université de Caen

Examineur

LAUMON Bernard, Directeur de recherche, IFSTTAR

Directeur de thèse

LÉGER Damien, PU-PH, Université Paris Descartes

Co-directeur de thèse

EVARD Anne-Sophie, Chargée de recherche, IFSTTAR

Encadrante

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1

Président de l'Université

Président du Conseil Académique

Vice-président du Conseil d'Administration

Vice-président du Conseil Formation et Vie Universitaire

Vice-président de la Commission Recherche

Directrice Générale des Services

M. le Professeur Frédéric FLEURY

M. le Professeur Hamda BEN HADID

M. le Professeur Didier REVEL

M. le Professeur Philippe CHEVALIER

M. Fabrice VALLÉE

Mme Dominique MARCHAND

COMPOSANTES SANTE

Faculté de Médecine Lyon Est – Claude Bernard

Faculté de Médecine et de Maïeutique Lyon Sud – Charles Mérieux

Faculté d'Odontologie

Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques

Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation

Département de formation et Centre de Recherche en Biologie Humaine

Directeur : M. le Professeur G.RODE

Directeur : Mme la Professeure C. BURILLON

Directeur : M. le Professeur D. BOURGEOIS

Directeur : Mme la Professeure C. VINCIGUERRA

Directeur : M. X. PERROT

Directeur : Mme la Professeure A-M. SCHOTT

COMPOSANTES ET DEPARTEMENTS DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Faculté des Sciences et Technologies

Département Biologie

Département Chimie Biochimie

Département GEP

Département Informatique

Département Mathématiques

Département Mécanique

Département Physique

UFR Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

Observatoire des Sciences de l'Univers de Lyon

Polytech Lyon

Ecole Supérieure de Chimie Physique Electronique

Institut Universitaire de Technologie de Lyon 1

Ecole Supérieure du Professorat et de l'Education

Institut de Science Financière et d'Assurances

Directeur : M. F. DE MARCHI

Directeur : M. le Professeur F. THEVENARD

Directeur : Mme C. FELIX

Directeur : M. Hassan HAMMOURI

Directeur : M. le Professeur S. AKKOUCHE

Directeur : M. le Professeur G. TOMANOV

Directeur : M. le Professeur H. BEN HADID

Directeur : M. le Professeur J-C PLENET

Directeur : M. Y.VANPOULLE

Directeur : M. B. GUIDERDONI

Directeur : M. le Professeur E.PERRIN

Directeur : M. G. PIGNAULT

Directeur : M. le Professeur C. VITON

Directeur : M. le Professeur A. MOUGNIOTTE

Directeur : M. N. LEBOISNE

Remerciements

Je tiens à exprimer en premier lieu ma profonde gratitude et reconnaissance à Anne-Sophie Evrard, encadrante principale de ma thèse, qui m'a offert l'opportunité de travailler sur ce sujet et qui m'a accordé sa totale confiance pour ce travail. Je la remercie pour sa grande disponibilité, sa patience durant ces années ainsi que pour l'ensemble des conseils et critiques pertinentes qui ont considérablement fait avancer ce travail au quotidien. Ses nombreuses relectures et corrections ont été très appréciables. Merci.

Mes profonds remerciements vont ensuite à Bernard Laumon et Damien Léger, mes directeurs de thèse, pour l'attention qu'ils ont témoignée régulièrement à mon travail, pour l'aide compétente qu'ils m'ont apportée et pour m'avoir soutenu et conseillé tout au long de ce travail de thèse.

Mes remerciements les plus chaleureux à Barbara Charbotel et Mark Brink pour leur compétence et leur rigueur scientifique pendant nos réunions d'avancement de thèse. Une mention spéciale à Mark pour sa disponibilité et son aide précieuse pour les analyses des données de l'« Actiheart ».

Je remercie sincèrement Joëlle Adrien et Frédéric Mauny pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de décortiquer et juger ce travail en tant que rapporteurs. Un grand merci pour leurs remarques enrichissantes et les conseils constructifs pour valoriser ce travail. Je remercie également Damien Davenne pour son intérêt et sa participation au jury de thèse en tant qu'examineur.

Ce travail de thèse a pu être réalisé grâce à un partenariat entre l'Ifsttar, Bruitparif et le Centre du Sommeil et de la Vigilance de l'Hôtel Dieu de Paris. Je remercie chaleureusement Fanny Mietlicki, Carlos Ribeiro, Matthieu Sineau et Philippe Nguyen pour leur gentillesse, leur disponibilité et leur accueil lors de mes déplacements dans leurs locaux. Merci également pour les conseils qu'ils m'ont adressés tout au long de ce travail. Mes remerciements vont aussi à Maxime Elbaz pour sa contribution, son aide et son accueil chaleureux pendant mes visites à l'Hôtel Dieu de Paris.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été financés par l'Ifsttar, les ministères en charge de la santé et de l'environnement et la Direction Générale de l'Aviation Civile.

Je tiens à remercier sincèrement Marie Lefèvre pour ses encouragements, sa disponibilité et pour avoir répondu à mes nombreuses sollicitations. Sa rigueur et ses connaissances m'ont beaucoup apporté.

Je remercie l'ensemble des membres de l'UMRESTTE pour leur accueil et leur gentillesse. Un merci particulier à Amina Ndiaye pour les nombreux échanges et son écoute sans faille, merci d'avoir été là pour moi dans les bons comme dans les moments difficiles. À Marine Dufournet, pour le partage du bureau dans la bonne humeur. À Marie-Pierre Verney, pour sa gentillesse et ses bonbons matinaux. À Marie-Catherine Debrisay pour sa bonne humeur et pour nos échanges sur la recherche d'un monde idéal. À Hélène Tardy, Sylviane Lafont, Blandine Gadegbeku, Cécilia Monchanin et Jean-Louis Martin pour leur attention et leur sympathie. Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Anne-Marie Bigot et Geneviève Boissier pour leurs appuis administratifs sans faille.

Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail et que j'ai omis involontairement de citer.

Mes remerciements vont également aux rencontres et aux amitiés nouées au cours de ces trois années. Clémence, Claire, Dan, Léa, Laura, Mouna, Fleur, Amandine, Maxime, Nadim, Grég, Cédric et Hervé. Merci pour les échanges, les éclats de rires et les moments partagés ensemble. Les parties de tarot me manqueront certainement.

Je remercie l'ensemble de mes proches, sœurs, frères, beaux-frères, tantes et oncles pour leur encouragement et leur soutien sans faille tout au long de mes longues années d'études. Une pensée particulière à ma maman qui malgré la distance et les difficultés ne cesse de m'encourager et me pousser à donner le meilleur de moi-même.

Un merci tout particulier à ma femme Tanalou, ma moitié, celle qui me complète, pour son indéfectible soutien, sa patience, pour avoir partagé mes joies et mes peines. Du fond du cœur, merci pour tout.

À mes enfants, Ihsane, Jaïhane et Inaam, grâce à qui mes journées sont illuminées.

C'est avec émotion que je remercie celui à qui je dois tout, mon père. Il y a encore un an, son enthousiasme et sa fierté d'assister à ma soutenance occupaient nos discussions. Tu es parti beaucoup trop tôt mais je suis fier de toi comme tu l'as toujours été pour moi.

À mon père Ali Mohamed Youssouf...

Laboratoire d'accueil

UMRESTTE

Unité Mixte de Recherche Épidémiologique et de Surveillance Transport Travail
Environnement

Ifsttar

Cité des Mobilités – 25 avenue François Mitterrand
69675 Bron cedex

L'UMRESTTE (UMR T 9405) est une unité mixte de l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) et de l'Université Claude Bernard Lyon 1 (UCBL). Elle a été créée en juillet 1999 pour assurer des missions de recherches épidémiologiques et de surveillance en matière de traumatologie routière, de santé environnementale et de santé au travail.

Résumé

Contexte : Le trafic aérien, en constante augmentation au cours de ces dernières décennies, n'est pas sans impact sur l'environnement et la population. En particulier, le bruit émis par les avions constitue une nuisance importante et un problème majeur de santé publique, notamment en termes de perturbations du sommeil. Pour autant, en France surtout, les conséquences de l'exposition au bruit des avions restent insuffisamment évaluées.

Objectif : L'objectif de ce travail de thèse est de mieux connaître et de mieux quantifier les effets du bruit des avions sur la qualité du sommeil des riverains des aéroports en France, en distinguant qualité subjective et qualité objective.

Méthodes : Pour répondre aux objectifs de cette thèse, nous avons utilisé les données recueillies dans un programme de recherche épidémiologique appelé DEBATS (*Discussion sur les Effets du Bruit des Aéronefs Touchant la Santé*). L'étude principale, dite « étude longitudinale », a inclus 1244 participants vivant à proximité de trois aéroports français d'importance : Paris-Charles de Gaulle, Lyon-Saint-Exupéry et Toulouse-Blagnac. La qualité subjective du sommeil a été évaluée grâce à un questionnaire administré par des enquêteurs au domicile des sujets. Le niveau d'exposition au bruit des avions a été estimé à l'adresse du domicile de chaque participant à partir des cartes de bruit produites par la Direction Générale de l'Aviation Civile. Une étude complémentaire dite « étude sommeil » a permis d'évaluer la qualité objective du sommeil de 112 des 1244 participants à l'étude longitudinale grâce au port d'un actimètre pendant huit jours et d'un Actiheart (enregistreur de la fréquence cardiaque) pendant une nuit. Des mesures acoustiques ont été réalisées pendant ces huit jours en façade et à l'intérieur de la chambre à coucher des participants, afin de caractériser leur exposition au bruit des avions à l'aide d'indicateurs non seulement énergétiques (LAeq, LA90) mais aussi événementiels (nombre d'événements et niveau maximum de bruit de l'évènement ou LAmax).

Résultats : L'analyse de « l'étude longitudinale » a permis de montrer une association entre l'exposition au bruit des avions la nuit (Lnight) et la qualité subjective du sommeil caractérisée par un risque de déclarer dormir moins de 6 heures par nuit (OR=1,63 pour 10 dB(A) ; IC 95% : 1,15-2,32) et de se sentir fatigué au réveil (OR=1,23 pour 10 dB(A) ; IC 95% : 1,00-1,54). Nous n'avons pas trouvé de relation significative avec les autres paramètres subjectifs de la qualité du sommeil rapportés par les sujets eux-mêmes, tels que le temps d'endormissement, les éveils nocturnes, la satisfaction du sommeil et la prise de médicaments pour dormir. Nous avons

également montré une association entre l'exposition au bruit des avions et les paramètres objectifs de la qualité du sommeil avec une augmentation du temps d'endormissement et de la durée des éveils intra-sommeil, une diminution de l'efficacité du sommeil, mais aussi une augmentation du temps total de sommeil et du temps passé au lit (cette dernière pouvant être interprétée comme un mécanisme d'adaptation à la privation de sommeil). Les indicateurs énergétiques, mais plus encore les indicateurs liés aux événements de bruit, sont significativement associés aux paramètres objectifs de la qualité du sommeil. Par exemple, les événements de bruit d'avions détectés à l'intérieur de la chambre à coucher sont associés à une augmentation de la durée totale des éveils intra-sommeil supérieure à 30 minutes (OR=1,10 pour 10 événements ; IC 95% : 1,03-1,16). Enfin, nous avons observé une augmentation significative de l'amplitude de la fréquence cardiaque pendant un événement sonore associé au passage d'un avion et le niveau maximum de bruit de cet événement (L_{Amax}).

Conclusion : Ces résultats, pour la plupart similaires à ceux de la majorité des études de la littérature internationale, confirment que l'exposition au bruit des avions peut diminuer à la fois la qualité subjective et la qualité objective du sommeil. Ils contribuent également à soutenir l'hypothèse selon laquelle les indicateurs acoustiques événementiels pourraient, mieux que les indicateurs énergétiques plus largement utilisés, caractériser les effets du bruit des avions sur le sommeil.

Mots clés : bruit des avions, qualité du sommeil, actimètre, Actiheart, fréquence cardiaque

Abstract

Background: Air traffic, in constant increase during the last decades, is not without impact on the environment and the population. Aircraft noise in particular represents a serious nuisance and a major issue for public health, particularly in terms of sleep disturbances. However, in France especially, the effects of aircraft noise exposure remain insufficiently evaluated.

Objectives: The objective of this PhD is to better know and better quantify the effects of aircraft noise exposure on sleep quality in populations living near airports in France, while distinguishing subjective quality and objective quality.

Methods: In order to meet the objectives of the PhD, we used the data collected in an epidemiological research program called DEBATS (Discussion on the Health Effects of Aircraft Noise). The main study, also called the “longitudinal study”, included 1,244 participants living near three French major airports: Paris-Charles de Gaulle, Lyon-Saint-Exupéry and Toulouse-Blagnac. The subjective quality of sleep was assessed using a questionnaire administered by interviewers at the place of residence of the participants. Aircraft noise levels were estimated at each participant's home address using noise maps produced by the French Civil Aviation Authority. A complementary, also called the “sleep study” allowed us to estimate the objective sleep quality of 112 of the 1,244 participants in the longitudinal study. These 112 participants have worn a wrist actigraph for eight nights and an Actiheart (heart rate recorder) for one night. Acoustic measurements were made during these eight days and nights, both inside the participants' bedrooms and outside (at the exterior façade) in order to characterize their aircraft noise exposure using not only energy indicators (LAeq, LA90) but also events indicators (number of events and maximum level of a noise event or LAm_{ax}).

Results: The “longitudinal study” analysis showed an association between aircraft noise exposure during the night (L_{night}) and the subjective quality of sleep characterized by a risk of reporting to sleep less than 6 hours per night (OR=1.63 for 10 dB(A); 95% CI: 1.15–2.32) and a risk of feeling tired while awakening in the morning (OR=1.23 for 10 dB(A); 95% CI: 1.00–1.54). We did not find any significant relationship with the other subjective parameters of sleep quality reported by the subjects themselves, such as time to fall asleep, nocturnal awakenings, sleep satisfaction, and sleep medication intake. We also showed an association between aircraft noise exposure and the objective parameters of sleep quality with an increase in time of sleep onset and duration of wake after sleep onset, and a reduction in sleep efficiency. Aircraft noise exposure also increased total sleep time and time in bed (this could be a matter of behavioral

adaption to sleep deprivation). The energy indicators, but more still events indicators, were significantly associated with the objective parameters of sleep quality. For example, aircraft noise events detected inside the bedroom were associated with an increase in total duration of wake after sleep onset greater than 30 minutes (OR=1.10 for 10 events; 95% CI: 1.03-1.16). Finally, we observed a significant increase in amplitude of heart rate during a noise event associated with the passage of an aircraft and the maximum noise level of this event (LA_{max}).

Conclusions: These results, mostly similar to those obtained in the majority of studies in the international literature, confirm that exposure to aircraft noise can decrease both subjective and objective quality of sleep. They also contribute to support the hypothesis that acoustic events indicators could, better than energy indicators more widely used, characterize the effects of aircraft noise on sleep.

Keywords: aircraft noise, sleep quality, wrist actigraphy, Actiheart, heart rate

Liste des tables

Table 1 - Les différents stades du sommeil	26
Table 2 - Durée limite d'exposition avant dommages	42
Table 3 - Les valeurs guides de l'OMS	52
Table 4 - Nomenclature des indicateurs acoustiques	128
Table 5 - Indicateurs acoustiques produits pour chaque jour de mesure et pour différentes périodes.....	130
Table 6 - Répartition des participants dans les quatre classes d'exposition au bruit des avions	145
Table 7 - Comparaison des profils démographiques et socio-économiques des participants, des non participants et de la population d'étude	146
Table 8 - Description des quatre indicateurs de bruit estimés dans l'étude longitudinale	149
Table 9 - Comparaison des profils démographiques et socio-économiques des participants de l'étude sommeil et ceux de l'étude longitudinale.....	150
Table 10 - Comparaison des niveaux de bruit estimés et mesurés en termes de L_{night}	151
Table 11 - Distribution of the participants with a short total sleep time (TST) or feeling rather or very tired on awakening in the four levels of aircraft noise	160
Table 12 - Odds ratios for the relationship between a short total sleep time (TST) or the feeling of tiredness on awakening and the major a priori confounders.	161
Table 13 - Odds-ratio ^a for the relationship between a short total sleep time (TST) or the feeling of tiredness on awakening and aircraft noise exposure	163
Table 14 - Odds-ratio ^a for the relationship between a short total sleep time (TST) or the feeling of tiredness on awakening and aircraft noise exposure among the 991 participants who had resided at their address for at least 5 years	164
Table 15 - Distribution des paramètres subjectifs du sommeil dans les quatre classes d'exposition au bruit des avions en termes de L_{den}	172
Table 16 - Odds-ratio ^a pour la relation entre l'exposition au bruit des avions et le temps d'endormissement, les éveils nocturnes, la satisfaction de la qualité du sommeil ou la prise de médicaments pour dormir	173
Table 17 - Description of the 112 participants in the sleep study and of the 1,244 participants in the main DEBATS study	187
Table 18 - Description of noise indicators and objective sleep parameters.....	189
Table 19 - Distribution of the participants according to objective sleep parameters	190

Table 20 - Correlations between noise indicators and objective sleep parameters	192
Table 21 - Odds ratios for the relationship between noise indicators and objective sleep parameters	193
Table 22 - Results of the linear regression models for the relationship between noise indicators and objective sleep parameters.....	195
Table 23 - Description of the 92 participants in the Actiheart study and of the 1244 participants in the main DEBATS (Discussion on the Health Effects of Aircraft Noise) study	215
Table 24 - Description of the outcomes and sound level indicators.	217
Table 25 - Association between energy indicators estimated every 15 s and heart rate measured every 15 s during the sleep period (HR).	217
Table 26 - Analysis of event-related heart rate response.....	218

Liste des figures

Figure 1 - Hypnogrammes d'un sommeil normal et d'un sommeil perturbé par un bruit	27
Figure 2 - Exemples de niveaux de bruit dans l'environnement	35
Figure 3 - Échelle des fréquences sonores.....	36
Figure 4 - PGS de l'aéroport de Lyon-Saint-Exupéry (2004)	115
Figure 5 - PGS de l'aéroport de Toulouse-Blagnac (2003).....	116
Figure 6 - CES de l'aéroport de Paris-Charles De Gaulle (2011)	117
Figure 7 – Sonomètre	123
Figures 8 - Sonomètre situé en façade à l'extérieur de la chambre à coucher et sonomètre situé à l'intérieur de la chambre	123
Figure 9 - Évolution temporelle du niveau sonore LAeq,1s	125
Figures 10 - Évolution temporelle du niveau sonore LAeq,1s au cours des survols d'aéronefs identifiés – Illustration de la corrélation des niveaux extérieurs et intérieurs et du filtrage des bruits provenant de l'intérieur	126
Figure 11 - Exemple d'un événement de bruit de type aéronef.....	132
Figure 12 - Indice Harmonica	133
Figure 13 - Exemple de variation horaire de l'indice Harmonica sur 24 heures	133
Figure 14 - Dosimètre	134
Figure 15 - Fiche Budget Espace-Temps.....	135
Figure 16 - Évolution temporelle du niveau LAeq(1min) en fonction du temps : exemple de mesure individuelle de bruit effectuée à l'aide d'un dosimètre	136
Figure 17 - Agenda du sommeil.....	137
Figure 18 - Actimètre	137
Figure 19 - Enregistreur du rythme cardiaque	139
Figure 20 - Répartition des niveaux de bruit selon l'indicateur Lnight	148
Figure 21 - Noise maps for the three French airports under study.....	157
Figure 22 - Box plots of the sound level indicators measured indoors during the Actiheart measurement night.....	216

Liste des annexes

Annexe 1 - Tableau récapitulatif des articles issus de la revue de la littérature	242
Annexe 2 - Tableau récapitulatif des revues de la littérature.....	254

Liste des abréviations

% Contrib aero : contribution du bruit des aéronefs au niveau de bruit global

AASM : Académie Américaine de la Médecine du Sommeil

Acnusa : Autorité de Contrôle des Nuisances Aéroportuaires

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

AVC : accident vasculaire cérébral

BdF : bruit de fond

bpm : battements de coeur par minute

Bruitparif : Centre d'évaluation technique de l'environnement sonore en Île-de-France

CES : Courbes d'Environnement Sonore

CSHPF : Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France

dB : décibel

DEBATS : Discussion sur les Effets du Bruit des Aéronefs Touchant la Santé

DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile

DGS : Direction Générale de la Santé

DSM : Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders

ECG : électrocardiographie, électro-cardiogramme

EEG : électroencéphalographie, électro-encéphalogramme

EMG : électromyographie

EOG : électrooculographie

ESS : Epworth Sleepiness Scale

EVS : événement de vie et santé

ext : extérieur

GHQ : General Health Questionnaire

HR1 : bpm while event - bpm before event

HR2 : bpm 15 s after event - bpm before event

HR3 : bpm 30 s after event - bpm before event

HRA : amplitude while event

HTA : hypertension

HYENA : HYpertension and Exposure to Noise near Airports

Hz : Hertz

IC : intervalle de confiance

ICSD : International Classification of Sleep Disorders

Ifop : Institut Français d'Opinion Publique

Ifsttar : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

IMC : indice de masse corporelle

INM : Integrated Noise Model

Inpes : Institut National de Prévention et d'Éducation pour la Santé

Inrets : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

INSEE : Institut National de la Statistique et des Études Économiques

INSV : Institut National du Sommeil et de la Vigilance

int : intérieur

LA90 : niveau de bruit dépassé pendant 90% du temps

L_{AE} : niveau d'exposition sonore d'un événement = SEL avec pondération « A »

L_{Aeq} : niveau sonore continu équivalent

L_{Amax} : niveau maximum de bruit

L_{day} : niveau sonore équivalent pour le jour (de 6h à 18h)

L_{den} : niveau sonore équivalent calculé sur les périodes de jour, soir et nuit

L_{dn} : day-night level, niveau équivalent évalué sur une période de 24 heures avec une majoration de 10 dB(A) pour les niveaux la nuit

Levening : niveau sonore équivalent pour la période de soirée (de 18h à 22h)

L_{night} : niveau sonore équivalent pour la période de nuit (de 22h à 06h)

MOR : mouvements oculaires rapides

N : nombre d'événements sonores attribués aux survols des aéronefs

N_{Ax} : nombre d'événements sonores au dessus d'un certain niveau

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

OR : odds ratio

PDK : aéroport de DeKalb-Peachtree

PGS : plans de gêne sonore

PNB : produit national brut

PSG : polysomnographie

PSQI : Pittsburgh Sleep Quality Index

RANCH : Road traffic and Aircraft Noise exposure and children's Cognition and Health

SE : sleep efficiency

SEL : niveau d'exposition sonore

SIG : système d'information géographique

SOL : sleep onset latency

Sumer : surveillance médicale des risques

TB : time in bed

TNS-SOFRES : Société française d'enquêtes par sondages

TSP : total sleep period

TST : total sleep time

WASO : wake after sleep onset

WECPNL : weighted equivalent continuous perceived noise level

Table des matières

PARTIE 1 : CONTEXTE GÉNÉRAL ET OBJECTIFS	23
I. LE SOMMEIL	25
1. Définition	25
2. Organisation d'une nuit de sommeil normale	26
3. Les troubles du sommeil	28
3.1. Définition	28
3.2. L'insomnie	29
3.3. Prévalence des troubles du sommeil en France	29
4. Les facteurs associés aux troubles du sommeil.....	30
4.1. Âge	31
4.2. Sexe	31
4.3. Mode de vie	31
4.4. Troubles mentaux.....	32
4.5. Maladies physiques	32
4.6. Facteurs environnementaux	33
5. Conclusion	33
II. LE BRUIT	34
1. Définition	34
2. Paramètres physiques du bruit	34
3. Le décibel.....	35
4. Indicateurs acoustiques	36
4.1. Indicateurs énergétiques	36
4.2. Indicateurs événementiels.....	37
5. L'exposition au bruit	38
5.1. Exposition professionnelle au bruit.....	38
5.2. Exposition au bruit des transports.....	38
5.3. Exposition au bruit de voisinage	40
5.4. Exposition à la musique amplifiée	40
5.5. Exposition à d'autres types de bruit	41
6. Les effets de l'exposition au bruit sur la santé	41
6.1. Effets sur l'audition.....	41
6.2. Effets extra-auditifs du bruit	43
7. Conclusion	51
III. SYNTHESE DES CONNAISSANCES RELATIVES AUX EFFETS DE L'EXPOSITION AU BRUIT DES TRANSPORTS SUR LE SOMMEIL	53
1. Méthode de revue bibliographique	53
2. Effets de l'exposition au bruit des transports sur le sommeil.....	54
2.1. Latence d'endormissement	55
2.2. Les éveils nocturnes	61
2.3. Le temps de sommeil total.....	68

2.4.	La structure interne du sommeil.....	71
2.5.	Les mouvements du corps	75
2.6.	Les modifications végétatives au cours du sommeil.	76
2.7.	Prise de médicaments pour dormir.....	79
2.8.	La qualité du sommeil subjective.....	80
2.9.	Sentiment de fatigue le matin	83
3.	<i>Habitude au bruit</i>	84
3.1.	Études en laboratoire	84
3.2.	Études in situ	85
4.	<i>Comparaison des effets du bruit routier, ferroviaire et aérien</i>	85
4.1.	Comparaison des effets du bruit des transports sur les paramètres objectifs du sommeil.....	86
4.2.	Comparaison des effets du bruit des transports sur les paramètres subjectifs du sommeil.....	87
5.	<i>Bruit intermittent vs bruit continu</i>	87
6.	<i>Indicateurs énergétiques vs indicateurs événementiels</i>	88
7.	<i>Différences entre études en laboratoire et études in situ</i>	89
8.	<i>Conclusion</i>	90
IV.	OBJECTIFS SPECIFIQUES DE LA THESE.....	92
V.	REFERENCES.....	93
PARTIE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES		111
I.	CONTEXTE.....	113
II.	LA ZONE D'ETUDE DE DEBATS	114
1.	<i>Définition des Plans de Gêne Sonore et des Courbes d'Environnement Sonore</i>	114
2.	<i>Définition de la zone d'étude de DEBATS</i>	117
III.	ÉTUDE INDIVIDUELLE LONGITUDINALE	118
1.	<i>Population de l'étude</i>	118
2.	<i>Période de l'étude</i>	119
3.	<i>Questionnaire</i>	119
4.	<i>Niveaux d'exposition au bruit des avions</i>	121
5.	<i>Analyse statistique des données</i>	121
IV.	ÉTUDE SOMMEIL	122
1.	<i>Population de l'étude</i>	122
2.	<i>Instrumentation</i>	122
2.1.	Mesures acoustiques à l'intérieur et à l'extérieur de l'habitat	123
2.2.	Mesure d'exposition individuelle.....	134
2.3.	Évaluation objective de la qualité du sommeil	136
3.	<i>Analyse statistique des données</i>	139
V.	REFERENCES.....	141
PARTIE 3 : RÉSULTATS		143
I.	DESCRIPTION DE L'ETUDE LONGITUDINALE ET DE L'ETUDE SOMMEIL.....	145
1.	<i>Étude longitudinale</i>	145

1.1.	Description de la population de l'étude.....	145
1.2.	Description de l'exposition au bruit des avions	147
2.	<i>Étude sommeil</i>	149
2.1.	Description de la population de l'étude.....	149
2.2.	Description de l'exposition au bruit des avions	151
II.	EFFETS DE L'EXPOSITION AU BRUIT DES AVIONS SUR LES PARAMETRES SUBJECTIFS DE LA QUALITE DU SOMMEIL DES RIVERAINS DES AEROPORTS FRANÇAIS.....	153
1.	<i>INTRODUCTION</i>	155
2.	<i>METHODS</i>	156
2.1.	Study population	156
2.2.	Aircraft noise exposure assessment.....	156
2.3.	Sleep assessment	157
2.4.	Confounding factors.....	158
2.5.	Statistical analyses.....	159
3.	<i>RESULTS</i>	159
4.	<i>DISCUSSION</i>	164
5.	<i>CONCLUSIONS</i>	167
6.	<i>Acknowledgements</i>	168
7.	<i>Funding</i>	168
8.	<i>Ethics approval</i>	168
9.	<i>REFERENCES</i>	168
10.	<i>Résultats complémentaires</i>	172
11.	<i>Discussion des résultats complémentaires</i>	174
12.	<i>Références sur la discussion des résultats complémentaires</i>	177
III.	EFFETS DE L'EXPOSITION AU BRUIT DES AVIONS SUR LES PARAMETRES OBJECTIFS DE LA QUALITE DU SOMMEIL DES RIVERAINS DES AEROPORTS FRANÇAIS.....	179
1.	<i>INTRODUCTION</i>	181
2.	<i>METHODS</i>	182
2.1.	Study population	182
2.2.	Aircraft noise exposure assessment.....	183
2.3.	Sleep assessment	184
2.4.	Statistical analyses.....	186
3.	<i>RESULTS</i>	188
4.	<i>DISCUSSION</i>	197
5.	<i>CONCLUSIONS</i>	201
6.	<i>Acknowledgements</i>	201
7.	<i>Funding</i>	201
8.	<i>REFERENCES</i>	202
IV.	EFFETS DE L'EXPOSITION AU BRUIT DES AVIONS SUR LA FREQUENCE CARDIAQUE PENDANT LE SOMMEIL DES RIVERAINS DES AEROPORTS FRANÇAIS	207
1.	<i>INTRODUCTION</i>	209
2.	<i>METHODS</i>	210
2.1.	Study population	210
2.2.	Aircraft noise exposure assessment.....	211

2.3. Heart rate	212
2.4. Statistical Analysis	213
2.5. Ethics Approval.....	214
3. <i>RESULTS</i>	214
3.1. Energy Indicators	217
3.2. Event-Related Indicators	218
4. <i>DISCUSSION</i>	218
5. <i>CONCLUSIONS</i>	222
6. <i>Author Contributions</i>	222
7. <i>Acknowledgments</i>	222
8. <i>Funding</i>	223
9. <i>Conflicts of Interest</i>	223
10. <i>REFERENCES</i>	224
PARTIE 4 : DISCUSSION GÉNÉRALE, CONCLUSION ET PERSPECTIVES	227
I. DISCUSSION GENERALE	229
II. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	235
III. REFERENCES.....	237
ANNEXES	241

PARTIE 1 : CONTEXTE GÉNÉRAL ET OBJECTIFS

Le sommeil joue un rôle fondamental sur la qualité de vie de l'être humain. Il constitue un facteur important du maintien du bien-être et de la santé, participant à l'équilibre physique et psychologique. Il est déterminant pour la croissance, la maturation cérébrale, le développement et la préservation des capacités cognitives. Il est également essentiel pour l'ajustement de nombreuses sécrétions hormonales et pour le maintien de la température interne. Une altération de la qualité du sommeil peut donc avoir de multiples conséquences néfastes sur la santé.

L'environnement, le style de vie, l'état de santé physique et psychique sont des facteurs qui peuvent favoriser l'apparition et le développement de troubles du sommeil. Le bruit est un facteur environnemental majeur de ces troubles. En France, il fait partie des principales nuisances environnementales. Selon l'enquête TNS-SOFRES de 2010 commandée par le Ministère du développement durable, deux tiers des Français mentionnent le bruit à leur domicile comme première source de nuisance [1]. Une étude de l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) réalisée en 2014 a montré que le bruit est le principal problème récurrent au quotidien des Français malgré un léger recul par rapport à 2013, devant la pollution de l'air et les risques naturels [2]. Les principales sources de bruit dans l'environnement sont généralement associées aux transports (terrestre et aérien), aux industries, à la construction et au voisinage. D'après une enquête de l'Institut National du Sommeil et de la Vigilance (INSV-MGEN 2013), le bruit des transports est le bruit qui dérange le plus (61%) le sommeil, celui des voitures en premier lieu [3]. Concernant le bruit des avions, environ 7% des Français en sont gênés [3]. Le bruit est la deuxième cause environnementale de morbidité derrière la pollution atmosphérique en Europe [4].

I. Le sommeil

1. Définition

Le sommeil est un état complémentaire de l'éveil. Il se caractérise par une suspension périodique, normale et réversible de la conscience, sans perte de la sensibilité sensorielle, pendant laquelle les réserves d'énergie du cerveau sont reconstituées [5]. Un tiers de notre vie y est consacré. Le sommeil est un phénomène biologique essentiel dont dépend une partie importante de la qualité de vie de l'être humain. Il a une fonction réparatrice sur la fatigue physique et mentale, participe au maintien du métabolisme, à la croissance et à la réparation tissulaire, organique et psychologique.

2. Organisation d'une nuit de sommeil normale

Un cycle de sommeil est structuré en deux phases : le sommeil lent avec une activité cérébrale ralentie et le sommeil paradoxal, appelé aussi sommeil à mouvements oculaires rapides, avec une activité cérébrale intense. Le sommeil lent est à son tour composé de trois stades dont les deux premiers (stades N1 et N2) constituent le sommeil lent léger et le dernier le sommeil lent profond (stade N3). La [Table 1](#) représente les différents stades qui composent un cycle de sommeil.

Table 1 - Les différents stades du sommeil

Sommeil lent	• Léger : - Stade N1 : stade de transition, sommeil léger, activité cérébrale rapide, et de faible amplitude, mouvements oculaires lents. - Stade N2 : apparition des ondes lentes, amoindrissement progressive des mouvements oculaires et du tonus musculaire • Profond : - Stade N3 : sommeil profond, ondes cérébrales de haut voltage et de basse fréquence, sommeil réparateur
Sommeil paradoxal	Mouvements oculaires rapides, rêves importants, activité cérébrale de faible amplitude, atonie musculaire

Lorsqu'un individu s'endort, il traverse pendant quelques minutes le stade N1. Ce dernier correspond à la période de transition entre l'état de veille et l'endormissement. Dans ce stade, le sujet est d'abord somnolent mais éveillé. L'activité cérébrale commence à ralentir et le rythme cardiaque et la tension musculaire diminuent. Puis progressivement le sommeil s'approfondit jusqu'au stade N2. À ce stade, l'activité cérébrale continue à ralentir peu à peu. Le sommeil n'est pas très profond, il est encore facile de se réveiller et l'individu se souvient d'avoir dormi. Après quelques dizaines de minutes de stade N2, le ralentissement de l'activité cérébrale s'amplifie et le sommeil s'approfondit encore : c'est le sommeil lent profond (stade N3). Le dormeur est à ce stade profondément endormi et il est difficile de le réveiller car son cerveau est de plus en plus insensible aux stimulations extérieures, voire même de son propre corps. Ensuite, le sommeil lent profond s'interrompt et le sommeil lent léger réapparaît avant de faire place au premier épisode de sommeil paradoxal.

Au cours du sommeil paradoxal, le cerveau est aussi actif qu'en stade N1. À l'électro-oculogramme on retrouve de nombreux mouvements oculaires rapides et symétriques. Le tonus des muscles disparaît complètement et une grande instabilité du pouls, de la pression artérielle

et de la respiration est observée. Ce premier épisode du sommeil paradoxal ne dure que quelques minutes.

La succession de sommeil lent léger, lent profond, et sommeil paradoxal définit un cycle de sommeil dont la durée approximative est de 90 minutes. À ce stade, le dormeur a accompli son premier cycle de sommeil. Quatre à cinq cycles se succèdent ainsi au cours d'une nuit. Les cycles de début de nuit sont plus riches en sommeil lent profond et les cycles de fin de nuit en sommeil paradoxal. La [Figure 1](#) ci-dessous présente les tracés du déroulement d'un sommeil normal et d'un sommeil perturbé au cours de la nuit. Dans l'ancienne nomenclature, le sommeil lent était composé de quatre stades : deux stades pour le sommeil lent léger et deux stades pour le sommeil lent profond. Dans la nouvelle classification, les deux stades du sommeil lent profond ont été regroupés (N3).

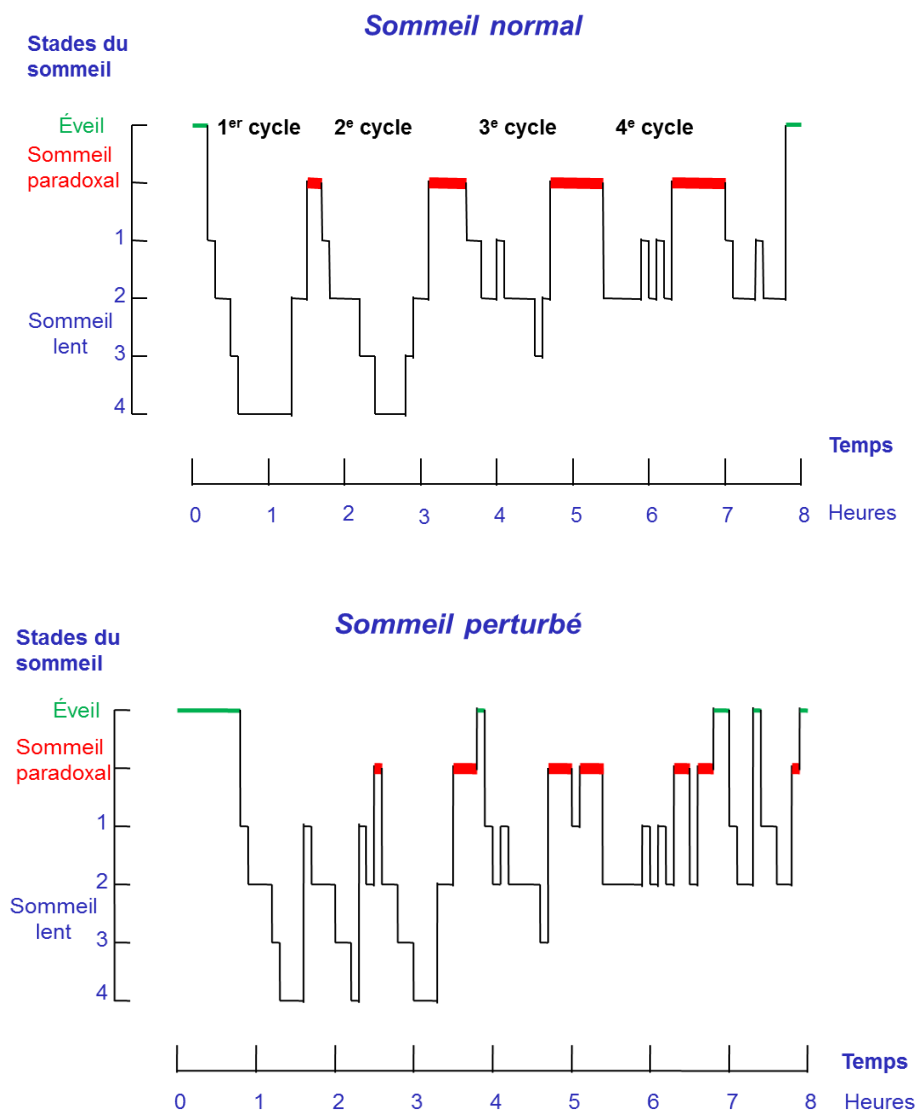


Figure 1 - Hypnogrammes d'un sommeil normal et d'un sommeil perturbé par un bruit

Le sommeil peut être exploré par un enregistrement de l'activité électrique du cerveau grâce à l'électro-encéphalogramme (EEG). En effet, chaque phase du sommeil présente une activité électrique différente.

3. Les troubles du sommeil

3.1. Définition

Les troubles du sommeil sont des dysfonctionnements liés aux habitudes de sommeil. Ils sont classés en deux grandes catégories: les dyssomnies et les parasomnies.

- Les dyssomnies forment l'ensemble des troubles perturbant la quantité et la qualité du sommeil. Elles sont associées à des difficultés à trouver ou à maintenir le sommeil ou à une somnolence diurne. Les dyssomnies peuvent revêtir trois formes distinctes : les carences en sommeil (les insomnies), les excès de sommeil (les hypersomnies) et les troubles du rythme circadien (rythme veille-sommeil).
- Les parasomnies forment quant à elles l'ensemble des événements indésirables qui surviennent à différents stades du sommeil ou pendant la transition veille-sommeil. Elles correspondent à des troubles comportementaux se produisant en marge du sommeil. Elles regroupent les différentes formes de somnambulisme, les cauchemars, le bruxisme (grincements de dents) ou l'énurésie.

Il existe plus de 80 troubles du sommeil. L'Académie Américaine de la Médecine du Sommeil (AASM) en a donc établi une classification, l'International Classification of Sleep Disorders (ICSD), dont la dernière version a été publiée en 2014. L'ICSD-3 regroupe les troubles du sommeil en sept catégories : l'insomnie, les troubles respiratoires liés au sommeil, l'hypersomnolence d'origine centrale, les troubles du rythme circadien, les parasomnies, les mouvements liés au sommeil, et enfin les autres troubles du sommeil.

Outre l'insomnie, les autres troubles du sommeil les plus fréquents sont le syndrome des jambes sans repos, les apnées du sommeil, la narcolepsie-cataplexie et l'hypersomnie idiopathique. Le syndrome des jambes sans repos est un trouble sensori-moteur caractérisé par une envie irrésistible de bouger les jambes et dans certains cas d'autres parties du corps. Les apnées du sommeil sont quant à elles caractérisées par un arrêt ou une diminution du flux respiratoire. La narcolepsie-cataplexie est une hypersomnie invalidante caractérisée dans sa forme complète par

des accès de sommeil dans la journée, de brusques relâchements du tonus musculaire sans perte de conscience (attaques de cataplexie) qui peuvent s'associer à des hallucinations et des paralysies du sommeil. Quant à l'hypersomnie idiopathique, elle est caractérisée par un sommeil nocturne de bonne qualité et/ou de longue durée de 10 heures et plus avec une somnolence excessive durant la journée.

3.2. L'insomnie

Selon la cinquième version du manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux (Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders) ou DSM

-V, l'insomnie est définie comme une plainte d'insatisfaction par rapport à la quantité ou la qualité du sommeil, associée à des difficultés d'endormissement, de maintien du sommeil et/ou de réveil trop précoce au moins trois fois par semaine depuis au moins trois mois, avec répercussions significatives dans la journée de type : altération du fonctionnement social, professionnel, scolaire, universitaire ou comportemental. L'insomnie est souvent liée à un événement particulier ou à un environnement perturbant. Elle peut aussi être causée par d'autres pathologies du sommeil comme le syndrome des jambes sans repos et l'apnée du sommeil, ou encore par la prise de substances toxiques ou de médicaments.

L'insomnie affecte la qualité de vie avec des répercussions sur le fonctionnement diurne : fatigue, irritabilité, baisse d'attention, troubles de mémoire et de concentration, somnolence, dysfonctionnement social ou professionnel. Léger *et al.* [6] ont trouvé que la qualité de vie des insomniaques est significativement moins bonne que celle des bons dormeurs : fatigue physique et psychologique plus élevée, somnolence diurne plus importante, difficultés d'attention et de mémoire plus marquées, activités professionnelles et relations sociales et familiales perturbées.

3.3. Prévalence des troubles du sommeil en France

Selon l'Insee, le temps de sommeil moyen des Français a baissé de 18 minutes entre 1986 et 2010 [7]. Chez les adolescents, cette baisse atteint 50 minutes. Aujourd'hui, les Français dorment en moyenne 7 heures et 47 minutes par nuit, avec de fortes variations entre les personnes. Cette diminution de la durée du sommeil concerne autant les hommes que les femmes (19 minutes pour les femmes et 17 pour les hommes). Selon une enquête publiée par l'Institut national de prévention et d'éducation pour la santé (Inpes) en 2008, 45% des Français

considèrent qu'ils ne dorment pas assez et 25% ne se sentent pas reposés lorsqu'ils se réveillent le matin [8].

En Europe occidentale, les troubles du sommeil touchent près de 31% de la population [2]. En France, 62% de la population déclarent souffrir d'au moins un trouble du sommeil : 16% ont des difficultés pour s'endormir, 42% pour se rendormir pendant la nuit et 19% pour récupérer pendant leur sommeil [8]. L'insomnie est le trouble du sommeil le plus fréquent en France. Selon l'Institut du sommeil et de vigilance, un Français sur cinq en souffrirait [9]. Elle est sévère dans 9% des cas [9]. D'après le Baromètre santé 2010 de l'Inpes, environ 16% des personnes âgées de 15 à 85 ans souffrent d'une insomnie chronique. Les femmes sont les plus touchées avec 19% et 12% pour les hommes [10].

La somnolence excessive est également très fréquente dans la population. Sa prévalence est estimée entre 4 et 20% en fonction du seuil de sévérité et des études [11]. Selon une enquête INSV-MGEN de 2011, 21% des Français ressentent de la somnolence au moins trois fois par semaine, même après une bonne nuit [12]. La somnolence constitue aujourd'hui un enjeu de santé publique car fréquemment mise en cause dans les accidents de la route [13].

En ce qui concerne les autres troubles du sommeil les plus fréquents, la prévalence du syndrome des jambes sans repos est estimée à 8,5 % dans la population française. Elle augmente avec l'âge et les femmes sont plus atteintes que les hommes. Quant à l'apnée du sommeil, sa prévalence chez l'adulte varie selon les études de 3 à 7% chez les hommes et de 2 à 5% chez les femmes [14]. Cette prévalence augmente avec l'âge et le surpoids. La narcolepsie-cataplexie est quant à elle une maladie rare mais probablement largement sous-diagnostiquée avec une prévalence de 0,05% [11]. La prévalence de l'hypersomnie idiopathique est mal connue mais proche de celle de la narcolepsie à savoir 0,05% [11].

4. Les facteurs associés aux troubles du sommeil

Plusieurs facteurs favorisent l'apparition et le développement des troubles du sommeil. Ils peuvent être liés aux caractéristiques personnelles (sexe et âge), au mode de vie, à des troubles d'ordre psychiatrique, psychologique ou physiologique, ou encore à l'environnement.

4.1. Âge

L'organisation du sommeil varie quantitativement et qualitativement tout au long de la vie. Corman et Léger [15] ont montré qu'avec l'âge, la latence d'endormissement augmente, la durée totale de sommeil et l'efficacité du sommeil sont réduites, et la durée du sommeil lent profond diminue. Ohayon [16] a quant à lui trouvé que la prévalence des difficultés à s'endormir et à maintenir le sommeil augmente de manière linéaire avec l'âge. Elle atteint 50% parmi les individus âgés de plus de 65 ans. Avec le vieillissement, les éveils nocturnes se produisent plus fréquemment [17]. Une étude sur événements de vie et santé (EVS) réalisée en 2005-2006 a montré que l'âge présente des associations spécifiques avec chaque trouble du sommeil. Ainsi, les difficultés à se rendormir augmentent avec l'âge alors que le sentiment de fatigue au réveil diminue avec celui-ci [18].

4.2. Sexe

Les femmes sont les plus touchées par les troubles du sommeil. Dans une étude de Léger *et al.* dans la population française [19], 78% des femmes ont déclaré au moins une plainte de sommeil (68% chez les hommes). Concernant l'insomnie, le taux est plus élevé chez les femmes (23%) que chez les hommes (14%). Lorsqu'on considère la définition DSM-IV de l'insomnie sévère, le taux est presque deux fois plus élevé pour les femmes (12%) que pour les hommes (6,3%). Les femmes sont plus susceptibles que les hommes de se plaindre de difficultés pour s'endormir, de difficultés de maintien du sommeil, de conséquences diurnes, d'être insatisfaites de leur sommeil et d'avoir un diagnostic d'insomnie [16].

4.3. Mode de vie

Les troubles du sommeil sont associés de manière significative à plusieurs facteurs liés au mode de vie. L'abus d'excitants tels que l'alcool [20], le tabac [21], le café [22] et les drogues illicites [23] favorise les perturbations du sommeil. Mener une vie stressante ou subir des événements stressants (un divorce par exemple) peut aussi altérer le sommeil [21][22]. Les travailleurs postés ou de nuit sont également plus susceptibles d'avoir des troubles du sommeil [13][23]. Il a été démontré que les personnes les moins diplômées, celles en difficultés financières, les chômeurs, les inactifs, les personnes veuves ou divorcées souffrent davantage de troubles du sommeil [18].

Un temps de sommeil de très courte durée a été aussi retrouvé associé à de nombreuses comorbidités chroniques : obésité, diabète de type 2, HTA et maladies cardiovasculaires [27], [28]. À partir d'une méta-analyse, Cappuccio *et al.* [29] ont montré une tendance constante à l'augmentation du risque d'être court dormeur quand on est obèse, à la fois dans l'enfance et à l'âge adulte.

4.4. Troubles mentaux

Il est bien admis qu'il existe une association entre troubles mentaux et troubles du sommeil [25–27]. Ford et Kamerow [30] ont constaté que 40% des personnes souffrant d'insomnie et 47% de celles souffrant d'hypersomnie présentent un trouble psychiatrique (versus 16% des personnes sans troubles du sommeil). Dans une autre étude, 70% des personnes atteintes d'un trouble de l'humeur souffrent également d'insomnie [33]. Ce taux est de 80% pour les individus ayant une dépression majeure et de 90% pour les troubles anxieux [33]. Dans le Baromètre santé de l'Inpes de 2005, les troubles du sommeil sont significativement associés aux antécédents dépressifs, à l'état anxieux et aux idées suicidaires [34]. Le risque de développer un trouble mental est de 4 à 8 fois supérieur chez les individus dont l'insomnie persiste dans le temps [16]. Dans une étude de Ford et Kamerow, les plaintes d'insomnies sont associées à un fort risque de développer une nouvelle dépression majeure (OR = 39,8 ; IC à 95% = 19,8 à 80,0) [30]. Une autre étude a montré que l'efficacité du sommeil et la durée totale du sommeil sont réduites chez les individus souffrant de trouble mental [31].

4.5. Maladies physiques

Les personnes en mauvaise santé et notamment celles ayant au moins une maladie chronique, souffrent davantage de troubles du sommeil. Dans une étude sur la prévalence des troubles du sommeil dans la population de Los Angeles, la moitié des sujets présentant des troubles du sommeil ont des problèmes de santé récurrents, persistants ou multiples [35]. Les maladies d'origine virale, les maladies neurologiques, les maladies cardiovasculaires, la fièvre, la fatigue chronique, les maux de tête, la maladie de Parkinson, la maladie de Huntington sont autant de facteurs qui favorisent les troubles du sommeil [26]. L'incidence des troubles du sommeil et leur persistance pendant trois ans sont plus élevées chez les sujets atteints d'une maladie cardiaque, d'un accident vasculaire cérébral (AVC) et d'une insuffisance respiratoire [36]. La persistance des troubles du sommeil pendant trois ans est également associée au diabète [36]. Dans une étude suédoise, Andersson *et al.* [37] ont trouvé que l'insomnie est l'une des

conséquences des douleurs chroniques. Il est également bien établi que l'insomnie est plus fréquente chez les personnes atteintes d'un cancer que dans la population générale [38]. Bien que ce ne soit pas toujours une conséquence directe du cancer, les troubles du sommeil préexistants sont souvent aggravés par le cancer [39].

4.6. Facteurs environnementaux

L'environnement a un fort impact sur la qualité du sommeil. Les principaux facteurs environnementaux qui peuvent affecter le sommeil sont le bruit, la température et la lumière. L'exposition au bruit faisant l'objet de cette thèse, nous y reviendrons plus loin.

La température de la chambre à coucher est également importante à considérer. En effet, au moment de l'endormissement la température du corps baisse pour atteindre son minimum entre 2 et 5 heures du matin. Cette baisse de température est essentielle à la qualité du sommeil. Selon certaines études, l'exposition au froid ou à la chaleur entraîne donc une perturbation de la structure du sommeil qui se traduit par une augmentation des éveils intra sommeil, une diminution du sommeil à ondes lentes et une fragmentation du sommeil paradoxal [40]. Haskell *et al.* [41] ont trouvé que les températures ambiantes froides perturbent davantage le sommeil que les températures ambiantes chaudes. Ils ont aussi observé que l'exposition aux températures froides augmente le stade 1, mais diminue le stade 2 et le sommeil paradoxal [41]. Ce dernier est le seul stade réduit de manière significative par la chaleur [41]. Les pourcentages des éveils et la latence du sommeil paradoxal sont plus élevés pendant les nuits chaudes [42]. Les mouvements du corps pendant le sommeil augmentent pour des températures plus élevées et diminuent pour des températures plus basses [42].

La lumière joue aussi un rôle dans la facilitation du sommeil car l'obscurité favorise le bon sommeil et toute lumière peut le perturber, même paupières fermées. L'exposition à des flashes de lumière pendant le sommeil peut perturber ce dernier [40–42]. L'exposition à la lumière en début de nuit retarde la sécrétion de mélatonine, augmente la latence de l'apparition du sommeil et perturbe le rythme circadien [43].

5. Conclusion

Le sommeil est un état fragile de perte de conscience qui permet au corps de récupérer et est indispensable au moins 6 heures par 24 heures. Le sommeil peut connaître de nombreux dérèglements. Sa satisfaction est de plus en plus contrariée par des agressions extérieures, de

façon volontaire ou non, parmi lesquelles le bruit constitue une cause majeure, avec en premier lieu le bruit des transports.

II. Le bruit

1. Définition

Le bruit est défini comme un ensemble de vibrations des molécules d'air qui se propagent en ondes acoustiques et qui engendre une sensation gênante ou désagréable.

2. Paramètres physiques du bruit

Le bruit est caractérisé par des paramètres physiques comprenant l'amplitude, la fréquence et la durée.

- L'amplitude correspond au « volume » sonore. Il s'agit de la variation de pression maximale atteinte par rapport à une pression de référence. L'amplitude est exprimée sur une échelle linéaire en Pascal (Pa) ou sur une échelle logarithmique en décibel (dB).
- La fréquence se caractérise par le nombre d'oscillations de la pression de l'air en une seconde. Elle correspond à la « hauteur » du son, appelée aussi le « ton ». La fréquence est exprimée en Hertz (Hz). Le son est dit aigu si la fréquence est élevée (vibrations rapides), et grave si la fréquence est faible (vibrations lentes).
- La durée correspond à la durée d'émission du son. Elle est exprimée en seconde. On distingue trois types de sons en fonction de leur durée : les sons continus, les sons intermittents et les sons impulsionnels.

Le bruit continu est un bruit qui reste constant et stable sur une période donnée. Il présente des fluctuations d'un niveau inférieur ou égal à 5 dB(A) (voir § 3 pour la définition du décibel). Le bruit intermittent a quant à lui des fluctuations d'un niveau supérieur à 5 dB(A), répétitives ou aléatoires. Il a une durée habituelle supérieure à une seconde. Le bruit impulsionnel consiste en une ou plusieurs impulsions d'énergie acoustique ayant chacune une durée inférieure à une seconde et séparées par des intervalles de temps d'une durée supérieure à 0,2 seconde. Un coup de fusil est un exemple de ce type de bruit.

3. Le décibel

Le traitement acoustique réalisé par l'appareil auditif n'est pas linéaire. La sensation auditive varie plutôt comme le logarithme de la pression acoustique ou de l'intensité sonore. Pour mesurer l'intensité du bruit, on utilise l'échelle des décibels (dB). Le décibel est une unité de mesure relative correspondant à une valeur logarithmique qui exprime le rapport de puissance entre la pression acoustique P et une valeur de référence $P_{\text{réf}}$:

$$dB = 10 \log \frac{P^2}{P_{\text{réf}}^2}$$

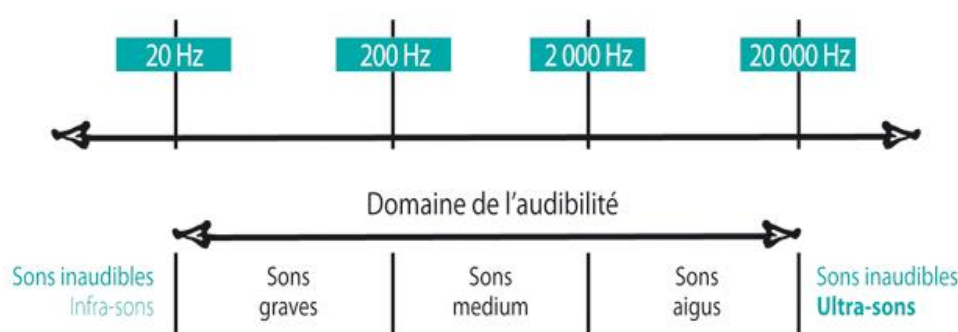
La valeur de référence $P_{\text{réf}}$ correspond à la plus petite pression acoustique perceptible par l'oreille humaine ($P_{\text{réf}} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$). Dans l'environnement, l'intensité des bruits usuels varie de 0 dB à 120 dB. La Figure 2 ci-dessous présente différents niveaux de bruit rencontrés dans l'environnement :



Source : www.bruitparif.fr

Figure 2 - Exemples de niveaux de bruit dans l'environnement

L'oreille humaine ne peut percevoir que les fréquences comprises entre 20 hertz (fréquence la plus grave) et 20 000 hertz (fréquence la plus aiguë) (Figure 3). En deçà de 20 hertz, les sons sont qualifiés d'infrasons, et au-delà de 20 000 hertz, d'ultrasons. L'oreille humaine n'est pas aussi sensible aux sons graves qu'aux sons aigus émis à la même pression acoustique. À niveau équivalent, les sons graves sont perçus moins forts que les sons aigus. C'est la raison pour laquelle une unité de mesure de niveau sonore dite physiologique, décibel A ou dB(A) est utilisée. Elle prend en compte cette sensibilité de l'oreille. Le dB(A) correspond donc au niveau réellement perçu par l'oreille humaine.



Source : Les cahiers du Développement Durable, Belgique

Figure 3 - Échelle des fréquences sonores

4. Indicateurs acoustiques

On distingue deux grandes catégories d'indicateurs acoustiques en fonction des caractéristiques du bruit : les indicateurs énergétiques et les indicateurs événementiels.

4.1. Indicateurs énergétiques

Un indicateur énergétique est un indicateur qui représente la moyenne énergétique du bruit sur une période déterminée. L'indicateur le plus connu et le plus utilisé est le niveau continu équivalent (**LAeq**). Il correspond au niveau sonore moyen sur une période donnée. Il est généralement calculé sur trois périodes¹ de base :

¹ Ces trois périodes ont été fixées par la Directive Européenne 2002/49/CE. Cette directive a pour vocation de définir, à l'échelle de l'Union Européenne, une approche commune visant à éviter, prévenir ou réduire en priorité les effets nocifs de l'exposition des populations au bruit dans l'environnement.

- LA_{eq} jour appelé **L_{day}** pour la période de 6h – 18h.
- LA_{eq} soirée appelé **$L_{evening}$** pour la période de 18h – 22h.
- LA_{eq} nuit appelé **L_{night}** pour la période de 22h – 6h.

Le niveau continu équivalent sur une journée entière (LA_{eq24h}) est également utilisé.

Le bruit n'est pas perçu de la même façon le jour et la nuit. Pour cela, un indicateur prenant en compte la différence de perception selon la période de la journée est souvent utilisé, à savoir le **L_{den}** . Il est calculé à partir des niveaux équivalents sur les trois périodes de base auxquels sont appliqués une majoration de 5 dB(A) pour la soirée et une majoration de 10 dB(A) pour la nuit. Le **L_{den}** est l'indicateur recommandé par la Directive Européenne de 2002 pour l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement [46].

Un autre indicateur souvent utilisé est l'indice fractile ou niveau acoustique fractile (**L_{Ax}**). Il représente le niveau de bruit atteint ou dépassé pendant x% (x est compris entre 0 et 100) de l'intervalle de temps considéré. Il est exprimé en dB(A).

4.2. Indicateurs événementiels

Les indicateurs événementiels s'intéressent aux pics de bruit. Ils traduisent l'émergence d'un événement sonore particulier par rapport au bruit de fond. Parmi les indicateurs événementiels, on peut citer le niveau instantané maximum (**L_{Amax}**), le niveau d'exposition sonore (**SEL**) et le nombre d'événements sonores au-dessus d'un certain niveau (**NA_x**).

Le **L_{Amax}** est le niveau maximum de bruit mesuré, avec une pondération fréquentielle A, pendant une période de temps donnée. Il représente le niveau maximum atteint lors des pics de bruit et permet la prise en compte de crêtes de bruit élevées. Le **SEL** correspond quant à lui au niveau d'exposition acoustique. Il est défini comme étant le niveau de pression acoustique pondéré A, constant pendant une seconde et ayant la même énergie acoustique que l'événement original. Cet indicateur permet de quantifier l'énergie d'un pic de bruit et de comparer différents événements sonores provenant d'une même source ou/et de durées différentes. Le **NA_x** représente le nombre d'événements dépassant un seuil de bruit fixé. Par exemple, le **NA_{62}** correspond au nombre d'événements dont le niveau maximal **L_{Amax}** dépasse 62 dB(A). L'Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires (ACNUSA) préconise l'utilisation de deux de ces indicateurs pour l'évaluation des niveaux de bruit des avions à proximité des aéroports français : le **NA_{62}** et le **NA_{65}** .

5. L'exposition au bruit

Les populations, plus particulièrement celles vivant dans les zones urbanisées, sont régulièrement exposées au bruit. Les sources de bruit sont multiples : bruit en milieu professionnel, bruit des transports, bruit de voisinage, musique amplifiée, bruit dans les écoles et au cours des loisirs.

5.1. Exposition professionnelle au bruit

Selon l'enquête Sumer (surveillance médicale des risques) de 2010 réalisée en France, 18% de l'ensemble des salariés sont exposés à des niveaux de bruit dépassant 85 dB(A) sur leur lieu de travail [47]. Ce sont les salariés du secteur de la construction qui sont les plus exposés avec plus de la moitié des salariés (57%) exposés à des bruits supérieurs à 85 dB(A). Suivent les salariés de l'industrie (39%) et de l'agriculture (38%). Les expositions de longue durée, plus de 20 heures par semaine, à des niveaux dépassant 85 dB(A) concernent 5% des salariés. Les secteurs les plus impactés sont l'industrie (17%), la construction (11%) et l'agriculture (10%) [47].

Il existe deux seuils réglementaires pour la prévention des risques liés à l'exposition au bruit en milieu professionnel : un seuil d'alerte et un seuil de danger. Pour une durée d'exposition journalière de huit heures, la valeur du seuil d'alerte était de 85 dB(A) et celle du seuil de danger de 90 dB(A). Ces seuils ont été abaissés de 5 dB(A) par une Directive Européenne de 2003 [48]. Ainsi, les nouveaux seuils d'alerte et de danger sont respectivement de 80 dB(A) et 85 dB(A).

Le bruit est reconnu depuis 1963 comme une cause de surdité professionnelle dans un cadre bien précis d'exposition à des bruits traumatiques. Cependant la prévention de la surdité professionnelle est une activité classique des médecins du travail, en particulier dans les BTP mais aussi chez le personnel d'aéroport par exemples.

5.2. Exposition au bruit des transports

Près de 60% de la population européenne qui vit en zone urbaine est exposée à des niveaux de bruit des transports supérieurs à la valeur limite réglementaire de 55 dB(A) selon l'indicateur *Lden* [49]. En d'autres termes, plus de 125 millions d'Européens sont exposés à des niveaux

considérés comme gênants et pouvant avoir un impact sur leur santé². Plus de 40% de la population française totale est exposée au bruit des transports à des niveaux dépassant cette valeur limite réglementaire de 55 dB(A). Près de 17 millions de personnes vivant dans les grandes agglomérations sont exposées à des niveaux de bruit de transport supérieurs à 55 dB(A) selon le *Lden* [50]. En dehors des grandes agglomérations, la population exposée est estimée à 9,7 millions de personnes [50].

5.2.1. Bruit routier

En Europe, plus de 100 millions d'Européens sont exposés au bruit du trafic routier à des niveaux dépassant 55 dB(A). Environ 32 millions sont exposés à des niveaux dépassant 65 dB(A) [49]. En France, près de 52 millions de personnes sont affectées par le trafic routier pendant la journée selon l'indicateur *Lden* : 31 millions de personnes sont exposées à un niveau compris entre 42 dB(A) et 55 dB(A), 14 millions entre 55 et 65 dB(A) et 7 millions à des niveaux excédant 65 dB(A) [51]. D'après le rapport de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) de 2013, parmi la population française exposée au bruit de transport à des niveaux dépassant 55 dB(A), 75 % est exposée au trafic routier, 18 % au trafic ferroviaire et 6 % au trafic aérien [50].

5.2.2. Bruit ferroviaire

Le bruit ferroviaire est la deuxième source d'exposition prédominant en Europe. Environ 19 millions d'Européens sont exposés à des niveaux de bruit liés au trafic ferroviaire dépassant 55 dB(A) [49]. En France, 4 millions d'individus sont exposés au bruit des trains à des niveaux excédant 55 dB(A) selon l'indicateur *Lden* [51]. Parmi ces individus, 1 million est exposé à des niveaux supérieurs à 65 dB(A) [51].

5.2.3. Bruit aérien

En Europe, près de 4 millions d'individus sont exposés à des niveaux de bruit du trafic aérien dépassant 55 dB(A) [49]. En France, ce sont les grandes agglomérations et plus particulièrement celles de la région parisienne qui sont les plus survolées par des aéronefs. Environ 1,8 millions

² L'OMS a en effet établi des valeurs guides à ne pas dépasser, pour les différents milieux, afin de protéger les populations (voir).

de Français sont exposés au bruit des aéronefs à des niveaux supérieurs à 55 dB(A), dont 1,6 millions vivent dans des grandes agglomérations ou à proximité [50].

5.3. Exposition au bruit de voisinage

D'après le code de la santé publique, le bruit de voisinage est un bruit de nature à porter atteinte à la tranquillité du voisinage ou à la santé de l'homme par sa durée, sa répétition ou son intensité, dans un lieu public ou privé. Le bruit de voisinage concerne trois catégories de bruits : bruits de comportement (également appelés bruits domestiques), bruits liés aux activités et bruits de chantiers.

Il n'existe pas d'estimation globale de la population exposée au bruit de voisinage. D'un individu à un autre, l'exposition peut différer selon certains critères : le fait de vivre en milieu urbain ou en milieu rural, la qualité du logement en termes d'isolation notamment, le comportement des voisins, etc.

5.4. Exposition à la musique amplifiée

La population et plus particulièrement les jeunes adultes et les adolescents sont constamment exposés à de la musique amplifiée : baladeurs, MP3, concerts, discothèques. Selon l'OMS, dans les pays disposant d'un produit national brut (PNB) intermédiaire à élevé, près de 50% des jeunes âgés de 12 à 35 ans sont exposés à des niveaux sonores dangereux pour leur santé à cause de l'écoute de musique amplifiée par le biais de dispositifs audio personnels. Environ 40% y sont exposés dans des lieux de loisirs [52]. Les niveaux sonores dangereux concernent une exposition supérieure à 85 dB(A) pendant huit heures ou 100 dB(A) pendant 15 minutes [52].

D'après le Baromètre santé de 2014 de l'Inpes, en France, l'écoute fréquente et intensive de musique via un casque ou des écouteurs a triplé entre 2007 et 2014 chez les 18-35 ans, passant de 4% à 13%. Près d'un quart des adolescents (15-19 ans) et 13% des jeunes adultes (15-35 ans) utilisent de manière excessive casques et écouteurs. Cet usage fréquent et intensif diminue avec l'âge et n'est pas lié au sexe [53]. En revanche, la fréquentation des lieux récréatifs (concerts, discothèques notamment) a diminué, mais dans de moindres proportions [53].

5.5. Exposition à d'autres types de bruit

Les bruits peuvent aussi provenir d'autres sources, comme les activités industrielles et commerciales, les cafés et restaurants, les écoles, etc. Il est difficile d'estimer le pourcentage de personnes exposées à ces types de bruit. Cependant, d'après le sondage Ifop de 2014 sur « les Français et les nuisances sonores », environ 6% des Français sont gênés à leur domicile par le bruit des activités commerciales ou industrielles, 15% par les équipements du domicile (ventilation, tuyauteries, ascenseurs, etc.), 6% par les cafés et restaurants [54].

6. Les effets de l'exposition au bruit sur la santé

Le bruit est perçu comme l'un des principaux problèmes environnementaux [4]. Selon l'enquête TNS-SOFRES de 2010 commandée par le Ministère du développement durable, deux tiers des Français mentionnent le bruit à leur domicile comme première source de nuisance [1]. Dans le milieu professionnel, un sondage réalisé début 2005 pour l'Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail, a montré qu'environ 67% des actifs français se disent dérangés par le bruit sur leur lieu de travail. Près de 54% de la population française estime que les principales sources de nuisances sonores sont liées aux transports [1].

L'exposition au bruit peut avoir des effets physiologiques (sur l'audition, les systèmes cardiovasculaire, endocrinien et immunitaire, et sur le sommeil) et des effets psychosociologiques (gêne due au bruit, effets sur la santé mentale, sur les performances, sur les comportements). Dans ce paragraphe, nous nous limiterons aux effets de l'exposition au bruit des transports.

6.1. Effets sur l'audition

Les effets du bruit sur l'audition sont de deux types : la fatigue auditive qui est temporaire et les pertes auditives partielles ou totales qui sont irréversibles. La nocivité du bruit est liée à certains de ses paramètres à savoir sa qualité, sa pureté, son intensité, son émergence et son rythme, mais aussi à la durée d'exposition, la vulnérabilité individuelle, et l'association avec d'autres expositions à risque [55]. Plus un niveau de bruit est élevé, plus la durée d'exposition pouvant causer des lésions auditives est courte ([Table 2](#)).

Table 2 - Durée limite d'exposition avant dommages

Niveau sonore en dB(A)	80	83	86	89	92	95	98	100
Durée d'exposition maximale / jour	8 h	4 h	2 h	1 h	30 min	15 min	7 min 30	5 min

Source : Institut national de recherche et de sécurité (INRS)

Le seuil de nocivité pour une exposition d'une durée de huit heures est de 80 dB(A) [56][55]. En dessous de 80 dB(A), aucune fatigue mécanique n'apparaît [56][55]. Au-delà de 80 dB(A), le bruit peut endommager, de façon irréversible, les structures de l'oreille interne [57] et peut mener à une surdité totale ou partielle [56]. À 120 dB(A), le bruit procure une sensation douloureuse [55].

Une exposition de quelques secondes à des niveaux de 120 à 140 dB(A) suffit à provoquer des dégâts irréversibles. Une exposition chronique à des niveaux de bruit élevés, ou particulièrement intenses, peut également provoquer des sifflements d'oreilles ou des bourdonnements appelés acouphènes [56][57][58]. Ces derniers peuvent s'installer de façon définitive [58]. En Europe, les acouphènes dus à l'exposition au bruit sont d'après l'OMS à l'origine de 22 000 années de vie en bonne santé perdues [4].

Dans la littérature, les études sur les effets du bruit sur l'audition s'intéressent plutôt à l'exposition professionnelle au bruit et à celle pendant les loisirs [59]. Ces études mettent en évidence une association entre l'exposition à des niveaux excessifs et la perte auditive [59] [60]. Les niveaux de bruit pouvant affecter l'audition ne se rencontrent qu'accidentellement à proximité des infrastructures de transport. Une étude menée chez des employés de zones aéroportuaires a montré une perte auditive liée à l'exposition continue au bruit des avions [61]. Autour des aéroports, des études ont montré des liens significatifs entre l'exposition au bruit des avions à un niveau élevé et la perte d'audition [62], [63]. En outre, des lésions des organes internes de l'appareil auditif causées par l'exposition au bruit des avions à des niveaux pouvant atteindre 100 dB(A) pendant un survol, ont été trouvées chez les enfants vivant à proximité d'un aéroport [62]. Ces lésions ont aussi été observées chez des adultes exposés fréquemment au bruit des avions ($L_{dn}^3 > 75$ dB(A)) [63]. Chez les travailleurs liés à la coordination de la circulation routière, la prévalence de la perte d'audition due au bruit routier est plus élevée pour

³ L_{dn} (day-night level) : niveau équivalent évalué sur une période de 24 heures avec une majoration de 10 dB(A) pour les niveaux mesurés la nuit

les travailleurs des milieux les plus bruyants (L_{Aeq} compris entre 71 et 80 dB(A) et L_{Amax} pouvant atteindre 108 dB(A)) [64].

6.2. Effets extra-auditifs du bruit

Outre les effets du bruit sur l'audition, d'autres effets physiologiques et psychosociologiques peuvent exister.

6.2.1. Effets établis

6.2.1.1. La gêne

Le bruit peut provoquer une gêne. Elle est définie par l'OMS comme « *un sentiment de déplaisir associé à un agent ou à une condition dont un individu ou un groupe sait ou croit qu'ils ont un effet nocif* » [65]. La gêne fait partie des principaux effets associés au bruit. Elle est l'effet du bruit le plus fréquemment étudié [66]. Elle correspond à un effet subjectif qui dépend de l'intensité sonore, de sa répétitivité, de sa signature fréquentielle, de la période de la journée, de son caractère subi, du niveau de bruit de fond préexistant, et enfin de la perception et de la tolérance de l'individu [57][65]. La gêne est ressentie de manière très variable d'un individu à un autre, et pour un même individu d'une situation à une autre. En tant que mesure physique, le bruit n'expliquerait au mieux que 30 à 40% de la gêne [55]. Plusieurs autres co-déterminants peuvent aussi expliquer la gêne : des facteurs sociodémographiques (âge, sexe, niveau d'études, dépendance par rapport à la source de bruit, statut d'occupation des lieux, habitudes socio-culturelles etc.), des facteurs d'attitude (sensibilité au bruit, peur de la source, etc.) et des facteurs contextuels (état personnel du moment, différence entre bruit choisi et bruit subi, etc.). Pour faire face à la gêne, l'individu peut avoir des comportements tels que la fermeture des fenêtres, la non utilisation des espaces extérieurs, la réduction des activités sociales (sortir, avoir des invités, etc.) et l'envie de déménager [66].

De très nombreuses études ont mis en évidence des relations positives entre la gêne et l'exposition au bruit des transports [33][65–75]. En France, 44% de la gêne éprouvée par la population à son domicile est due au bruit des transports, 36% à celui de la circulation routière, 5% à celui des avions et 3% à celui des trains, RER ou métro [78]. D'après l'OMS, 654 000 années de vie en bonne santé sont perdues par an à cause de la gêne liée à l'exposition au bruit environnemental en Europe occidentale [4]. Si le bruit de la circulation routière gêne le plus

grand nombre d'individus, le bruit des avions semble être le bruit le plus gênant [66]. À l'inverse le bruit le moins gênant est le bruit ferroviaire [66].

6.2.1.2. Les troubles du sommeil

Il est aujourd'hui bien établi par les différentes études menées en laboratoire et sur le terrain, que l'exposition au bruit perturbe le sommeil [34][66][87–95]. Selon l'OMS, les troubles du sommeil constituent la plus sérieuse conséquence de l'exposition au bruit environnemental en Europe occidentale [89]. Ils sont à l'origine de 903 000 années de vie en bonne santé perdues [43].

L'exposition au bruit la nuit dégrade la qualité du sommeil sur le plan subjectif comme sur le plan objectif [15][51]. Elle prolonge le temps d'endormissement (qui peut augmenter de quelques minutes à près de 20 minutes [91]), provoque des réveils intermittents et prématurés, des changements de phase de sommeil, des mouvements du corps, des changements de posture, des réponses du système autonome, augmente le temps total d'éveil au détriment du sommeil profond et/ou du sommeil paradoxal et diminue la durée totale du sommeil [15][66][53][55–57][59] [66][98–100]. Sur le plan subjectif, on observe une diminution de l'auto-estimation de la qualité du sommeil, de l'humeur ainsi que des performances [98][101–103]. Les lignes directrices portant sur le bruit la nuit, et publiées par l'OMS, concluent, d'après une revue de la littérature, que l'exposition au bruit environnemental conduit à des changements de stade de sommeil, à des réveils, à l'auto-déclaration de troubles de sommeil ainsi qu'à l'augmentation de la prise de médicaments [89]. Les effets de l'exposition au bruit des transports, et plus particulièrement à celui des avions, faisant l'objet de ce travail de thèse, seront développés dans la troisième partie de ce manuscrit.

6.2.1.3. Les effets sur le système cardiovasculaire

L'exposition au bruit peut avoir des effets sur le système cardiovasculaire. Elle peut provoquer une accélération du rythme cardiaque et rétrécir les vaisseaux sanguins. Ces modifications entraînent alors une augmentation de la pression artérielle et peut donc favoriser l'apparition d'autres troubles cardiovasculaires [51].

- Hypertension artérielle

L'exposition au bruit peut augmenter le risque d'hypertension artérielle. Une étude de Rosenlund *et al.* comparant le nombre de diagnostics d'hypertension artérielle dans une

population exposée et dans une population non-exposée au bruit des avions, a trouvé des liens significatifs entre le niveau d'exposition et le risque d'hypertension artérielle [99]. À des niveaux continus équivalents supérieurs à 55 dB(A), le risque d'être diagnostiqué d'une hypertension artérielle est multiplié par 1,6 (IC à 95% = 1,0 à 2,5) comparé à des niveaux continus équivalents inférieurs à 55 dB(A). L'Odds-Ratio (OR) est de 1,8 (IC à 95% = 1,1 à 2,8) pour les niveaux maximum (L_{Amax}) supérieurs à 72 dB(A) comparés aux niveaux maximum inférieurs à 72 dB(A) [99]. L'étude HYENA (HYpertension and Exposure to Noise near Airports) regroupant près de 4 800 individus vivant à proximité de six aéroports européens (Milan, Berlin, Stockholm, Londres, Amsterdam et Athènes) a mis en évidence une relation entre l'exposition au bruit des avions la nuit et le risque d'hypertension (OR pour 10 dB(A) = 1,14 ; IC à 95% = 1,01 à 1,29) [100]. Evrard *et al.* [101] ont quant à eux observé une relation entre l'exposition au bruit des avions la nuit et le risque d'hypertension artérielle chez les hommes uniquement (OR pour 10 dB(A) = 1,34 ; IC à 95% = 1,00 à 1,97). L'étude HYENA a également montré une relation exposition-réponse entre l'exposition au bruit du trafic routier sur une journée entière et le risque d'hypertension (OR pour 10 dB(A) = 1,10 ; IC à 95% = 1,00 à 1,20) [100]. Cette relation est plus forte chez les hommes avec un OR de 1,54 (IC à 95% = 0,99 à 2,40) dans la catégorie d'exposition la plus élevée (> 65 dB(A)) [100].

En 2002, une méta-analyse regroupant 43 études épidémiologiques publiées entre 1970 et 1999 a montré qu'il existe une relation entre l'exposition au bruit des aéronefs et le risque d'hypertension [102]. Pour une augmentation du niveau de bruit aérien de 5 dB(A), le risque relatif a été estimé à 1,26 (IC à 95% = 1,14 à 1,39) [102]. Dans une autre méta-analyse regroupant cinq études épidémiologiques publiées entre 1977 et 2008 sur l'association entre l'exposition au bruit des avions et le risque d'hypertension, l'OR a été estimé à 1,13 (IC à 95% = 1,00 à 1,28) pour une augmentation du niveau de bruit des avions de 10 dB(A) [103]. Si une relation positive est trouvée entre l'exposition au bruit des avions et une pression artérielle élevée, les effets sont encore plus prononcés pour les mesures subjectives de l'hypertension artérielle comme la prise de médicament et l'hypertension auto-déclarée [103]. Concernant l'exposition au bruit du trafic routier, une méta-analyse regroupant 24 études publiées entre 1970 et 2010 a montré une association positive et significative avec l'hypertension (OR pour 5 dB(A) = 1,03 ; IC à 95% = 1,01 à 1,06) [104].

En étudiant 328 enfants âgés de 3 à 7 ans, Beljovic *et al.* [105] ont montré que la pression artérielle systolique est significativement plus élevée chez les enfants exposés au bruit du trafic routier que chez les enfants non-exposés [105]. En outre, la prévalence des enfants ayant des

valeurs hypertensives est plus élevée pour ceux exposés au bruit routier (5,7%) que pour ceux qui ne sont pas exposés (1,5%) [105].

- *Maladies cardiaques ischémiques*

D'après l'OMS, chaque année en Europe occidentale, l'exposition au bruit environnemental est à l'origine de 61 000 années de vie en bonne santé perdues pour cause de maladie cardiaque ischémique [4]. Van Kempen *et al.* [102] ont trouvé que l'exposition au bruit du trafic routier augmente le risque de maladie cardiaque ischémique. Une méta-analyse de Babisch *et al.* [106] sur des publications de 1970 à 1999 a montré que l'exposition au bruit des transports routiers augmente faiblement mais significativement le risque de maladie cardiaque ischémique (risque relatif pour 5 dB(A) = 1,09 ; IC à 95% = 1,05 à 1,13). D'autres études vont également dans le même sens [35][36].

Dans une étude rétrospective d'environ 6 millions de personnes âgées (≥ 65 ans) résidant à proximité des aéroports aux États-Unis, Correia *et al.* ont trouvé que le bruit est significativement associé à l'hospitalisation pour maladie cardiaque ischémique [109]. En Suisse, une étude a mis en évidence une relation entre la mortalité par infarctus du myocarde à proximité des aéroports et le niveau et la durée d'exposition au bruit des avions [110]. Pour une exposition supérieure à 60 dB(A), le risque de décès par infarctus du myocarde est 1,30 fois plus élevé (même si c'est de façon non significative) que pour des niveaux inférieurs à 45 dB(A) (IC à 95% = 0,96 à 1,76) [110]. Ce risque est 1,48 fois plus élevé et de manière significative chez les personnes habitant au même endroit depuis au moins 15 ans (IC à 95% = 1,01 à 2,18) [110].

6.2.1.4. Les performances cognitives

L'exposition au bruit peut avoir des effets délétères sur les performances cognitives. Plusieurs études sur ce sujet ont été menées, particulièrement chez les enfants, dans les milieux scolaires. Qu'il s'agisse d'une exposition au domicile ou à l'école, le bruit a un effet sur les performances des enfants avec des difficultés de concentration, des fonctions cognitives altérées, un retard dans l'apprentissage, des problèmes de comportement et un retard du temps de réaction [66][111]. L'étude RANCH (Road traffic and Aircraft Noise exposure and children's Cognition and Health), réalisée auprès de 2 844 enfants, âgés de 9 à 10 ans, dans 89 écoles autour de trois aéroports européens majeurs (Amsterdam, Madrid et Londres), a trouvé que l'exposition chronique au bruit des avions est associée à une baisse des performances scolaires. Elle a aussi

montré que l'exposition chronique au bruit des avions est linéairement associée à l'altération de l'apprentissage de la lecture ainsi que de la mémoire de reconnaissance [112], [112], [113]. Plusieurs études ont montré que l'exposition au bruit des avions compromet la bonne exécution de tâches cognitives (lecture, résolution de problèmes, mémorisation) [111]. Matsui *et al.* ont trouvé que l'exposition au bruit des avions au domicile a un impact sur les performances des enfants, avec notamment une détérioration de la mémoire [114]. Les troubles de mémoire augmentent aussi linéairement avec l'exposition au bruit du trafic routier [112]. Wilkinson et Campbell ont comparé les performances de 12 individus au lendemain de nuits exposées et de nuits non exposées au bruit routier, et ils ont montré une détérioration des temps de réaction consécutive à l'exposition au bruit la nuit [115]. Elmenhorst *et al.* [116] ont mis en évidence, en laboratoire et in situ, des relations entre l'exposition au bruit des avions la nuit et une augmentation des temps de réaction. Le temps de réaction moyen est prolongé lorsque le LA_{eq} ou le nombre d'événements du bruit aérien augmente [116]. Les performances des individus le lendemain sont également significativement détériorées [116].

6.2.2. Effets discutés

Outres les effets énumérés ci-dessus, plusieurs autres effets extra-auditifs du bruit ont été étudiés. Ils sont plus ou moins documentés.

6.2.2.1. Les troubles anxio-dépressifs

Une association entre l'exposition au bruit et la prévalence de troubles anxio-dépressifs n'a pas été démontrée clairement. L'exposition au bruit pourrait intensifier le développement de tels troubles préexistants [117]. Une étude auprès des riverains âgés d'au moins 16 ans de l'aéroport de Heathrow à Londres a montré que la prévalence de la dépression augmente avec le niveau d'exposition au bruit des avions [118]. Une autre étude menée autour de l'aéroport Kadena au Japon a mis en évidence une relation entre les niveaux de bruit des avions militaires et la dépression [119]. Autour de l'aéroport d'Elmas en Sardaigne, Hardoy *et al.* [120] ont trouvé une association entre l'exposition au bruit des avions et l'anxiété (OR = 2,00 ; IC à 95% = 1,0 à 4,2). Stansfeld *et al.* [117] ont quant à eux observé une association entre le bruit du trafic routier et les symptômes d'anxiété à Caerphilly au Royaume-Uni.

D'autres études n'ont pas trouvé de relation entre l'exposition au bruit et les troubles anxio-dépressifs [121][122]. Autour de l'aéroport d'Amsterdam Schiphol, aucune association n'a été observée entre l'exposition au bruit des avions et la consommation de sédatifs ou

d'antidépresseurs prescrits [121]. Une étude réalisée auprès de 275 enfants avec une moyenne d'âge de 10 ans et 8 mois autour de l'aéroport de Heathrow à Londres, n'a pas non plus trouvé d'association entre les troubles anxio-dépressifs et l'exposition au bruit des avions [122]. Une autre étude comparant les scores de dépression et d'anxiété de 169 enfants exposés à des niveaux de bruit d'avion élevés ($LA_{eq16h} > 66$ dB(A)) et ceux de 171 enfants exposés à des niveaux inférieurs à 57 dB(A), n'a pas non plus trouvé d'association entre l'exposition chronique au bruit des avions et les troubles anxio-dépressifs [123].

Dans une étude réalisée autour de l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle (Insomnia, Impact des Nuisances. SOnores (Maladies et INsomnie) à proximité des Aéroports), les individus exposés au bruit des avions sont plus nombreux à déclarer un problème d'anxiété ($p=0,02$) et de dépression ($p=0,05$) que les individus non exposés [124]. Après ajustement sur les variables âge, sexe, couverture sociale, logement (propriétaire versus locataire), lieu de naissance (France versus hors France), double vitrage, emploi, niveau d'études et statut marital, la différence concernant la dépression est significative. L'évaluation des troubles psychologiques grâce au General Health Questionnaire (GHQ) composé de 28 items a montré que la sous-échelle « anxiété et insomnie » (items 8 à 14) est plus élevée dans la population exposée avec une p-value à la limite de la signification. La sous-échelle de « dépression » (items 22 à 28) est quasiment identique dans les deux groupes [124].

6.2.2.2. Sécrétion d'hormones de stress

Le bruit peut provoquer une augmentation de la sécrétion des hormones de stress : les catécholamines (noradrénaline, adrénaline) et le cortisol. Les modifications de la sécrétion de ces hormones sont des facteurs de risque de maladies cardiovasculaires, et notamment d'hypertension et d'infarctus du myocarde [125]. D'après Babisch, l'élévation du taux nocturne des hormones de stress peut entraîner une élévation de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle, des arythmies cardiaques, des agrégations plaquettaires, ou encore une augmentation du métabolisme des graisses [126].

Plusieurs études ont trouvé un effet significatif de l'exposition au bruit des transports sur la sécrétion des hormones de stress (noradrénaline, adrénaline, cortisol) [126]. Maschke *et al.* ont montré que la concentration des catécholamines augmente avec le niveau de bruit des avions [127]. Autour de l'aéroport de Munich, Evans *et al.* [128] ont également trouvé une association entre l'exposition au bruit des avions et une sécrétion très élevée de catécholamines. En revanche, aucune différence significative n'a été observée pour la sécrétion de cortisol [128].

Sur un sous-échantillon de l'étude HYENA, une augmentation de 6,07 nmol/L (IC à 95% = 2,32 à 9,81) des niveaux de cortisol le matin (augmentation de 34%) a été trouvée chez les femmes exposées au bruit des avions à des niveaux $LAeq24h > 60$ dB(A), en comparaison aux femmes exposées à un $LAeq24h \leq 50$ dB(A) [129]. Chez les enfants, une étude longitudinale sur les changements de l'exposition au bruit des avions après l'inauguration d'un nouvel aéroport, a révélé une relation entre l'exposition au bruit des avions et les concentrations des hormones de stress [130]. Ising et Ising [131] ont trouvé une corrélation entre l'exposition au bruit du trafic routier et l'excrétion de cortisol dans la première moitié de la nuit. Ils ont également montré que l'exposition à long terme au bruit du trafic routier la nuit, même à des niveaux faibles ($L_{max} < 55$ dB (A)), augmente le risque de troubles chroniques des sécrétions des hormones de stress [131]. En France, l'étude DEBATS a montré que l'exposition au bruit des avions modifie le rythme circadien du cortisol avec un taux de cortisol inchangé le matin, une variation plus faible la journée et un niveau élevé le soir [132].

6.2.2.3. Accident vasculaire cérébral

L'exposition au bruit peut augmenter le risque d'accident vasculaire cérébral (AVC). Selon une étude réalisée sur 8 millions de personnes vivant dans le grand Londres entre 2000 et 2010, l'exposition à long terme au bruit de la circulation routière augmente le risque d'être hospitalisé pour un AVC. Pour les populations vivant à proximité des voies à grande circulation (80 dB(A)), le risque d'être hospitalisé pour un AVC est de 5%. Il passe à 9% pour les personnes âgées de 75 ans et plus [133]. Notons que d'après cette étude, des associations positives, non significatives, ont également été observées entre l'exposition au bruit diurne et la mortalité par maladie cardiovasculaire, maladie cardiaque ischémique et AVC [133]. Une cohorte danoise de 57 053 sujets a également mis en évidence une association entre l'exposition au bruit routier et le risque d'AVC (ratio des taux d'incidence pour une augmentation de 10 dB(A) = 1,14 ; IC à 95% = 1,03 à 1,25) [134]. Chez les participants âgés de plus de 64 ans, le risque d'AVC est de 27% pour une augmentation de 10 dB(A) (IC à 95 % = 1,13 à 1,43) [134].

6.2.2.4. Obésité

Dans une récente étude suédoise de 5 075 individus, Pyko *et al.* [135] ont trouvé que les participants exposés à des niveaux de bruit routier ≥ 45 dB(A), ont 1,18 fois plus de risque

d'obésité centrale⁴ (IC à 95% = 1,03 à 1,34) et un rapport taille-hanche multiplié par 1,29 (IC à 95% = 1,14 à 1,45) que les participants exposés à des niveaux < 45 dB(A). Une augmentation du niveau de bruit routier de 5 dB(A) augmente aussi significativement le tour de taille de 0,21 cm (IC à 95% = 0,01 à 0,41) [135]. L'obésité centrale a été également associée au bruit des avions et au bruit ferré ; avec un risque particulièrement élevé (OR = 1,95 ; IC à 95% = 1,24 à 3,05) lorsque les bruits des trois modes de transport sont combinés [135]. Dans une autre étude, Erikson *et al.* [136] ont également montré que l'exposition au bruit des avions est associée à l'augmentation du tour de taille. Cette augmentation est de 1,51 cm (IC à 95% = 1,13 à 1,89) pour un accroissement du niveau d'exposition au bruit de 5 dB(A) [136]. En considérant les hommes seuls, l'augmentation est de 2,26 cm (IC à 95% = 1,83 à 2,69). Pour les femmes, l'augmentation est de 1,58 cm (IC à 95% = 1,13 à 2,03) [136].

À l'inverse, une étude réalisée en Norvège auprès des résidents d'Oslo n'a pas trouvé d'association significative entre l'exposition au bruit routier et les marqueurs d'obésité dans la population [137]. Toutefois, l'étude a montré qu'il existe une association positive entre l'exposition au bruit de la circulation routière et les marqueurs d'obésité chez les femmes très sensibles au bruit. Chez les hommes très sensibles au bruit, les associations sont très faibles [137].

6.2.2.5. Le diabète

Eriksson *et al.* [136] ont étudié les effets de l'exposition à long terme au bruit des avions sur le diabète de type 2 auprès des résidents de Stockholm. Aucune association n'a été mise en évidence entre l'exposition au bruit des avions et le prédiabète ainsi que le diabète de type 2 sur toute la population étudiée. Cependant, pour le diabète de type 2, une modification de l'effet selon le sexe a été observée, avec des associations plus fortes chez les femmes mais non significatives (OR = 1,51 ; IC à 95% = 0,69 à 3,32 pour celles exposées à 50-54 dB(A) ; OR = 2,78 ; IC à 95% = 0,80 à 9,60 pour celles exposées $\geq$ 55 dB(A) ; comparés aux femmes exposées à < 50 dB(A)) [136].

Une autre étude basée sur une cohorte de 57 053 résidents danois a rapporté que l'exposition au bruit du trafic routier est associée à un risque plus élevé de diabète avec des associations plus fortes chez les femmes que chez les hommes [138]. Les auteurs ont montré qu'une

⁴ L'obésité centrale appelée aussi obésité abdominale, est une obésité localisée principalement au niveau du tronc. Elle est caractérisée par un tour de taille supérieur à 90 cm chez la femme et 100 cm chez l'homme.

augmentation de 10 dB(A) du niveau de bruit routier au moment du diagnostic et au cours des cinq années précédant le diagnostic est associée à un risque élevé de diabète avec un ratio des taux d'incidence de 1,08 (IC à 95% = 1,02 à 1,14) et de 1,11 (IC à 95% = 1,05 à 1,18) respectivement. Après application d'une définition plus stricte du diabète, les ratios des taux d'incidence sont de 1,11 (IC à 95% = 1,03 à 1,19) au moment du diagnostic et de 1,14 (IC à 95% = 1,06 à 1,22) au cours des cinq années précédant le diagnostic. Chez les femmes, l'association entre l'exposition au bruit routier et le diabète est plus forte, avec un ratio de 1,11 (IC à 95% = 1,03 à 1,20), que chez les hommes (ratio des taux d'incidence = 1,05; IC à 95% = 0,98 à 1,13) [138].

7. Conclusion

Le bruit constitue une nuisance majeure dans l'environnement. Il provient de plusieurs sources et est omniprésent, particulièrement dans les environnements urbains. L'exposition chronique au bruit à des niveaux élevés ou particulièrement intenses, peut entraîner une altération du système auditif. Ces effets auditifs sont le plus souvent associés aux expositions professionnelles ou de loisirs. L'exposition au bruit a également des effets extra-auditifs. Elle peut provoquer une gêne, affecter le système cardiovasculaire et les performances, et perturber le sommeil. L'OMS a donc établi des valeurs limites d'exposition au bruit à ne pas dépasser afin de protéger les populations (voir [Table 3](#)). Selon l'OMS, le bruit causé par les transports est chaque année à l'origine de plus d'un million d'années de vie en bonne santé perdues en Europe occidentale [4]. Il est la deuxième cause environnementale de morbidité derrière la pollution atmosphérique en Europe [4].

Table 3 - Les valeurs guides de l'OMS

	Environnement spécifique	Effet sur la santé	Niveau moyen (L_{Aeq})	Niveau maximum (L_{Amax})
JOUR	Zone résidentielle (à l'extérieur)	Gêne sérieuse Gêne modérée	55 50	
	Salle de classe	Perturbation de l'intelligibilité de la parole	35	
	Cour de récréation	Gêne	55	
	Cantine*	Gêne liée à l'effet cocktail	65	
	Hôpital	Interférence avec le repos et la convalescence	30	40
	Zone commerciale	Gêne importante	70	
	Musique	Effets sur l'audition	100 (15 min) 85 (8h)	110
	Impulsions sonores (feux d'artifices, armes à feu...)	Effets sur l'audition		140 (adultes) 120 (enfants)
NUIT	Zone résidentielle (à l'extérieur)	Troubles du sommeil :		
		Valeur cible intermédiaire 1	55	
		Valeur cible intermédiaire 2	40	
		Objectif de qualité	30	
		Insomnie	42	
		Utilisation de sédatifs	40	
	Chambre à coucher	Hypertension	50	
		Infarctus du myocarde	50	
		Troubles psychologiques	60	
		Perturbation des phases du sommeil		35
		Eveil au milieu de la nuit ou trop tôt le matin		42

* Recommandation GIAC (Groupement de l'Ingénierie Acoustique)

Source : www.bruitparif.fr

III. Synthèse des connaissances relatives aux effets de l'exposition au bruit des transports sur le sommeil

La perturbation du sommeil par le bruit constitue la première plainte rapportée dans les enquêtes réalisées à proximité des aéroports [139]. Ces plaintes concernent en grande partie le trafic nocturne [140]. Les effets du bruit environnemental sur la qualité du sommeil ont fait l'objet de nombreuses recherches et études en laboratoire ou in situ à travers le monde, mais encore peu nombreuses en France.

La revue de la littérature effectuée dans le cadre de cette thèse porte sur l'association entre l'exposition au bruit des transports et les perturbations du sommeil. Les expérimentations en laboratoire et les études sur le terrain ont été prises en compte. Les différents modes de transport (routier, aérien, ferré) ont été distingués. La première partie est une synthèse de la littérature concernant les effets sur le sommeil de l'exposition au bruit des transports. La deuxième partie compare les effets des différents modes de transport, les indicateurs de bruit utilisés et les résultats des études de laboratoire et des études in situ.

1. Méthode de revue bibliographique

La recherche de la bibliographie concernant les effets du bruit des transports sur le sommeil a été réalisée dans la base de données bibliographique PubMed, à l'aide des mots clés suivants : « *sleep* », « *noise* », « *transportation* », « *sleep disturbance* », « *sleep disorder* », « *noise transportation* ». Plusieurs combinaisons de ces mots-clés ont été effectuées, conduisant chacune à l'identification d'un certain nombre d'articles :

- ("sleep" AND/OR "noise") AND/OR "transportation": 34 816 articles,
- "sleep" AND "noise": 1 531 articles,
- ("sleep" AND "noise") AND "transportation": 176 articles,
- (("sleep disturbance" OR "sleep disorder") AND "noise") AND "transportation": 42 articles,
- ("sleep disturbance" OR "sleep disorder") AND "noise transportation": 38 articles.

La combinaison ("*sleep*" AND "*noise*") AND "*transportation*" avec 176 articles a finalement été retenue car à la lecture de leurs titres et mots-clés, ils semblaient le mieux correspondre à notre sujet. À partir de ces 176 articles, un premier tri a été effectué par lecture du résumé : 92

articles ont ainsi été sélectionnés pour être lus et étudiés. D'autres articles et revues ont été ajoutés à cette liste à partir des références de certains de ces articles. Des rapports d'experts, des livres, des actes de conférences et colloques scientifiques internationaux pertinents, cités en référence des articles sélectionnés ou retrouvés à partir de moteurs de recherche sur internet ont également été inclus. Au final, 65 articles, 27 revues de la littérature et six rapports ont été lus et analysés et ont permis de réaliser la synthèse des effets de l'exposition au bruit des transports sur le sommeil. Un tableau récapitulatif figure en Annexe.

2. Effets de l'exposition au bruit des transports sur le sommeil

Les effets du bruit sur le sommeil peuvent se traduire par la modification de plusieurs paramètres physiologiques macroscopiques du sommeil tels que la latence d'endormissement, le nombre d'éveils intra-sommeil, le temps d'éveil intra-sommeil, le temps de sommeil, la modification de la structure du sommeil (nombre de changements de stade et rythmes propres aux stades de sommeil), le nombre de mouvements du corps et les modifications végétatives au cours du sommeil. La perturbation du sommeil est mise en évidence par la constatation de modification des valeurs normales de ces paramètres en présence de bruit et le retour à la normale en l'absence de ce dernier [141].

Les troubles du sommeil peuvent être appréciés grâce à des mesures objectives ou grâce à des mesures subjectives.

Les mesures objectives sont principalement effectuées grâce à un enregistrement polysomnographique PSG de paramètres physiologiques : l'activité électrique cérébrale (électroencéphalographie ou EEG), l'activité oculomotrice (électrooculographie ou EOG), et l'activité des muscles de surface (électromyographie ou EMG). D'autres mesures peuvent être réalisées sur les activités végétatives comme la fréquence cardiaque (électrocardiographie (ECG), enregistrement du rythme cardiaque par un Actiheart), la fréquence respiratoire, ainsi que sur les mouvements du corps (actimétrie également appelée actigraphie).

Les mesures subjectives sont quant à elles le plus souvent réalisées à l'aide de questionnaires appropriés et validés de type agendas du sommeil qui portent sur l'auto-estimation de la latence d'endormissement, du nombre et de la durée des éveils intra-sommeil, de la durée totale de sommeil, de la qualité du sommeil, du sentiment de fatigue le matin au réveil et la consommation de médicaments rapportée. Ces questionnaires peuvent être administrés indépendamment des évaluations objectives ou les compléter. Toutefois, leurs résultats peuvent

ne pas être en adéquation avec ceux des mesures objectives réalisées au chevet du dormeur car l'appréciation de la « gêne » ressentie pendant le sommeil peut sur-estimer ou sous-estimer la perturbation réelle subie par l'organisme [141]. Dans une revue de la littérature, Kawada rapporte que si les paramètres objectifs du sommeil sont généralement plus sensibles que les paramètres subjectifs, dans certaines circonstances, le sommeil subjectif est un meilleur indicateur des effets du bruit sur le sommeil que les paramètres objectifs évalués par la polysomnographie [97].

Les études mesurant les paramètres objectifs du sommeil ont été réalisées dans la majorité des cas en laboratoire et dans une moindre proportion au domicile des sujets car plus coûteuses, complexes et lourdes à mettre en place. Or, in situ, ces études permettent de se placer dans des conditions d'observation plus réalistes qu'en laboratoire, bien que dormir avec des appareils ne soit pas vraiment naturel. Les études épidémiologiques concernant les effets du bruit sur le sommeil rapportés dans des questionnaires sont les plus nombreuses dans la littérature. La perturbation de la qualité du sommeil constitue l'un des deux principaux effets susceptibles d'être rapportés par une population exposée au bruit (avec la gêne) [141]. Son évaluation par des questionnaires est plus rapide et plus accessible que celle des paramètres objectifs. Elle permet également de mesurer l'impact du bruit sur le sommeil à partir d'échantillons de personnes de plus grande taille. Dans la suite, nous distinguerons les effets de l'exposition au bruit des transports sur les paramètres du sommeil mesurés de façon objective de ceux rapportés dans des questionnaires.

2.1. Latence d'endormissement

Les résultats des études s'intéressant à la latence d'endormissement en lien avec l'exposition au bruit des transports sont contrastés. La plupart du temps, des associations positives sont observées mais elles sont non significatives, le temps d'endormissement pouvant augmenter de quelques minutes à près de 20 minutes [141].

2.1.1. Études en laboratoire

2.1.1.1. Bruit routier

Mesures objectives

Les résultats des études en laboratoire concernant les effets du bruit routier sur la latence d'endormissement mesuré de manière objective sont contrastés. Certaines études ont montré

que la latence d'endormissement augmente significativement de façon monotone avec le nombre d'événements de bruit. Öhrström et Rylander l'ont ainsi démontré en exposant 28 sujets au bruit routier avec 4, 8, 16 et 64 événements de 50 ou 60 dB(A) [142]. Dans une autre étude, Öhrström a également trouvé une augmentation significative et monotone de la latence d'endormissement chez 12 individus exposés à 16, 32, 64 et 128 événements de bruit routier la nuit [143]. Comparativement aux nuits calmes, l'augmentation du temps d'endormissement est de 12 minutes pendant les nuits bruyantes avec 64 événements de bruit [143]. L'exposition à des niveaux de bruit élevés la nuit entraîne aussi une augmentation significative de la latence d'endormissement. Saletu *et al.* [144] ont ainsi trouvé une augmentation significative de la latence d'endormissement de 16,5 minutes chez les jeunes (moyenne d'âge 25 ans) et une augmentation de 11,8 minutes non significative chez les personnes âgées (62 ans de moyenne d'âge) pour une exposition au bruit routier la nuit de 68 à 83 dB(A) par rapport aux nuits de contrôle sans exposition.

D'autres études n'ont pas trouvé d'effet de l'exposition au bruit routier sur la latence d'endormissement. Chez des sujets jeunes (21-34 ans) exposés à des niveaux de bruit routier variant de 45 à 65 dB(A), Saletu et Grunberger [145] n'ont pas observé d'augmentation significative de la latence d'endormissement. Kuroiwa *et al.* n'ont pas non plus montré de différence significative pour la latence d'endormissement entre des jeunes exposés au bruit routier à un niveau continu de 49,6 dB(A) et d'autres exposés à un niveau continu de 30 dB(A) [146]. Avec les mêmes niveaux d'exposition que dans l'étude de Kuroiwa, Kawada n'a pas non plus trouvé de différence significative concernant la latence d'endormissement [147]. Outre les différences de niveaux de bruit qui ne sont pas élevées dans ces deux dernières études, les sujets expérimentés sont tous de jeunes garçons âgés de 19 à 21 ans, et leurs effectifs sont faibles, à savoir neuf pour la première étude [146] et onze pour la deuxième [147]. Avec 47 dB(A) pour les nuits bruyantes et 32 dB(A) pour les nuits silencieuses, Thiessen et Lapointe ont aussi observé que la latence d'endormissement moyenne n'est pas affectée par le bruit continu du trafic routier la nuit, mais ce résultat peut être expliqué par des différences individuelles importantes qui peuvent être de signes opposés [148].

Mesures subjectives

Des difficultés à s'endormir ainsi qu'un prolongement de la latence d'endormissement sont souvent rapportés après exposition au bruit routier [108]. Griefahn a trouvé que la latence d'endormissement augmente significativement avec le niveau d'exposition au bruit routier

[149]. Dans une autre étude, la latence d'endormissement augmente avec le nombre d'événements de bruit routier [142]. À 64 événements de bruit, le temps d'endormissement augmente significativement de 22 minutes pour une exposition à 50 dB(A) et de 14 minutes pour une exposition à 60 dB(A) par rapport aux nuits sans bruit [142]. Öhrström a observé une augmentation significative monotone la latence d'endormissement chez 12 individus exposés à 16, 32, 64 et 128 événements de bruit routier la nuit [143]. La latence d'endormissement augmente avec le niveau de bruit, même à des niveaux faibles. Skanberg et Öhrström ont trouvé une augmentation non significative de la latence d'endormissement de 4,4 minutes après exposition au bruit routier à des niveaux de L_{Aeq} de 33 dB(A) [150].

2.1.1.2. Bruit aérien

Mesures objectives

Deux études principales ont étudié la relation entre l'exposition au bruit des avions et la latence d'endormissement mesuré objectivement en laboratoire. Elles ont montré contre toute attente une diminution de la latence d'endormissement lorsque l'exposition au bruit des avions augmente [151] [152]. En étudiant 128 sujets exposés au bruit des avions avec un nombre d'événements variant de 4 à 128 et des niveaux de pression acoustique maximale allant de 45 À 80 dB (A) pendant 13 nuits consécutives, Basner et Samel [151] ont trouvé une augmentation de la latence d'endormissement uniquement la première nuit d'exposition au bruit des avions. De la seconde nuit d'exposition à la douzième nuit, une diminution significative et constante de la latence d'endormissement a été observée bien que 43 % des sujets soient encore réveillés lors du premier événement de bruit. Ce résultat peut être expliqué par le déficit de sommeil accumulé à cause des changements relativement mineurs dans la structure du sommeil pendant les nuits précédentes.

Mesures subjectives

Dans une étude de Basner *et al.*, les sujets déclarent plus de difficultés d'endormissement pendant les nuits d'exposition au bruit des avions que pendant les nuits sans exposition au bruit [82]. Cependant, cette différence n'est pas significative [82].

2.1.1.3. Bruit ferroviaire

Mesures objectives

Saremi *et al.* [153] sont les seuls à s'être intéressés à l'effet de l'exposition au bruit ferroviaire sur la latence d'endormissement. Ils ont exposé 38 sujets au bruit ferroviaire pendant trois nuits consécutives et réalisé des mesures polysomnographiques. La première nuit est silencieuse (35 dB(A)), les deuxième et troisième nuits sont exposées à des niveaux de bruit ferroviaire équivalents de 40 et 50 dB(A), respectivement. Au cours de ces trois nuits, les auteurs ont observé une augmentation non significative de la latence d'endormissement.

2.1.1.4. Combinaison des bruits des différents modes de transport

Mesures objectives

L'exposition au bruit des différents modes de transport entraîne une augmentation de la latence d'endormissement mesuré de façon objective, la plupart du temps non significative. Di Nisi *et al.* l'ont démontré en laboratoire avec une augmentation non significative du temps d'endormissement de 1,3 minute chez les sujets exposés au bruit des transports (routier, aérien et ferroviaire) la nuit par rapport aux sujets non exposés [154]. Marks et Griefahn l'ont également démontré en exposant 24 sujets aux bruits des différentes modes de transport avec un niveau de 32 dB(A) pour les nuits tranquilles et de 39, 44 et 50 dB(A) pour les nuits bruyantes [68]. Ils ont ainsi trouvé une augmentation à la limite de la significativité de la latence d'endormissement pendant les nuits bruyantes [68]. De la même façon avec 32 sujets, Griefahn *et al.* ont trouvé une augmentation non significative de la latence d'endormissement pendant les nuits bruyantes (39, 44 et 50 dB(A)) [155].

Mesures subjectives

Dans une étude de Basner *et al.*, les sujets estiment leur endormissement plus difficile avec la combinaison des trois sources d'exposition au bruit (routier, aérien et ferroviaire), qu'avec une exposition à une seule source [82]. Dans une étude de Marks et Griefahn, les sujets déclarent avoir plus de mal à dormir pendant les nuits bruyantes (exposition au bruit routier, aérien et ferroviaire) que pendant les nuits calmes, avec une augmentation significative du temps d'endormissement de 7,4 minutes [68].

2.1.2. Études in situ

2.1.2.1. Bruit routier

Mesures objectives

Les résultats des études réalisées in situ sont également contrastés. Certaines ont montré une augmentation de la latence d'endormissement mesuré objectivement après exposition au bruit routier alors que d'autres n'ont pas trouvé d'effet. Pirrera *et al.* [156] ont observé une latence d'endormissement plus longue, mais de façon non significative dans le groupe des individus exposés au bruit du trafic routier par rapport aux individus non exposés. Cependant, dans le groupe des individus exposés au bruit routier, la latence d'endormissement de ceux ayant leur chambre du côté de la rue augmente significativement (27 minutes en moyenne) par rapport à ceux qui ont leur chambre de l'autre côté (11 minutes en moyenne). À l'aide de mesures actimétriques, Öhrström et Skånberg ont trouvé une augmentation non significative de la latence d'endormissement (+ 4,2 minutes) après une exposition au bruit routier [94]. Toutefois, la latence d'endormissement est significativement plus longue chez les hommes que chez les femmes [94]. Öhrström *et al.* ont également observé qu'après une exposition au bruit routier, la latence d'endormissement est significativement plus longue chez les enfants que chez les parents (19 vs 10 minutes) [157].

Eberhardt et Akselsson ont réalisé des mesures polysomnographiques chez sept jeunes hommes âgés de 21 à 27 ans et vivant le long de routes à forte circulation la nuit. Ils n'ont pas trouvé de différence significative de la latence d'endormissement entre les nuits bruyantes et les nuits silencieuses [158].

Dans une étude longitudinale, Öhrström et Skånberg [95] ont observé, contre toute attente, une augmentation non significative (+ 10,7 minutes) de la latence d'endormissement après réduction du trafic routier la nuit (180 véhicules par nuit en 1999 contre 1 375 véhicules en 1997) chez les personnes vivant dans une zone fortement exposée. Dans la zone non exposée, une augmentation non significative de 2,3 minutes a également été observée [95].

Mesures subjectives

Des difficultés d'endormissement ainsi qu'un allongement de la latence d'endormissement sont souvent rapportés après exposition au bruit routier. Jakovljevic *et al.* ont trouvé que les habitants des zones bruyantes (> 65 dBA) déclarent avoir plus de difficultés à s'endormir et à se

rendormir après s'être réveillés la nuit que les habitants des zones calmes (< 55 dBA) [84]. Selon les auteurs, vivre dans une zone bruyante augmente significativement de 2,7 fois le risque d'avoir des difficultés pour s'endormir et de 1,9 fois le risque d'avoir des difficultés pour se rendormir après s'être réveillé [84]. En revanche, la latence d'endormissement n'est pas significativement différent dans les deux zones [84]. Öhrström *et al.* ont trouvé que les personnes exposées à des niveaux mesurés à l'extérieur de 72 dBA ont plus de difficultés à s'endormir que les personnes exposées à 56 dBA, alors que la latence d'endormissement n'est pas significativement différente [108]. Toutefois, d'autres études mettent en évidence à la fois une augmentation des difficultés et du temps d'endormissement. Stosic *et al.* ont trouvé que la latence d'endormissement est significativement plus longue de 6,3 minutes et que les sujets ont beaucoup plus de difficultés à s'endormir dans les zones bruyantes que dans les zones silencieuses [88]. Griefahn et Gros ont aussi observé que l'apparition du sommeil est retardée chez les personnes vivant dans des rues fortement exposées au bruit routier [159].

2.1.2.2. Bruit aérien

Mesures objectives

Une seule étude s'est intéressée à la latence d'endormissement mesurée objectivement in situ. Elle a été réalisée auprès des riverains de l'aéroport d'Amsterdam Schiphol et les auteurs ont trouvé une association significative entre le niveau de bruit équivalent des avions et le temps d'endormissement [160]. Une augmentation de la latence d'endormissement a été ainsi observée avec le niveau de bruit équivalent et non avec le nombre d'événements de bruit des avions pendant la période d'endormissement. Cette augmentation peut atteindre 15 minutes [160].

Mesures subjectives

Le temps et les difficultés d'endormissement auto-rapportés augmentent significativement avec le niveau d'exposition au bruit des avions [160]. Les difficultés d'endormissement augmentent significativement également avec le nombre d'événements de bruit d'avions [160]. À proximité de l'aéroport d'Amsterdam Schiphol, Passchier-Vermeer *et al.* ont montré que la latence d'endormissement augmente significativement d'environ 15 minutes après exposition au bruit des avions [160]. Au voisinage de l'aéroport de Roissy, Lainey *et al.* ont aussi trouvé que les sujets exposés au bruit des avions sont significativement plus nombreux à déclarer des difficultés pour dormir que les sujets non exposés (19,4% vs 14,4%) [124]. Kim *et al.* n'ont pas

observé de différence significative pour la latence d'endormissement entre le groupe fortement exposé (WECPNL⁵ > 80), le groupe faiblement exposé (WECPNL 60-80) et le groupe de contrôle (WECPNL < 60) [161].

2.1.2.3. Bruit ferroviaire

Mesures objectives

Elmenhorst *et al.* [77] n'ont pas trouvé d'association significative entre la latence d'endormissement mesuré avec une polysomnographie et l'exposition au bruit des trains chez 33 sujets vivant à proximité de voies ferrées. Ce résultat est toutefois à prendre avec précaution car les wagons de marchandises peuvent entraîner différentes réactions physiologiques selon qu'ils soient techniquement obsolètes ou plus développés [77].

Mesures subjectives

En revanche, une relation dose-effet est mise en évidence entre l'exposition au bruit ferroviaire et les difficultés d'endormissement rapportées [85], [162]. Selon Aasvang *et al.*, un sujet exposé au bruit ferroviaire à des niveaux supérieurs à 65 dB(A) en façade de la chambre, a significativement 14 fois plus de risque d'avoir des difficultés d'endormissement qu'un sujet exposé à des niveaux de bruit de 40 à 44 dBA [85]. À l'inverse, avec un niveau d'exposition médian de 37 dBA en *LAeq* et 49 dBA en *LAmx*, Elmenhorst *et al.* [77] n'ont pas trouvé de relation entre la latence ou les difficultés d'endormissement et l'exposition au bruit ferroviaire la nuit des sujets vivant le long des chemins de fer de Cologne en Allemagne. Outre le niveau de bruit, le nombre d'événements de bruit ferroviaire la nuit affecte également la probabilité d'avoir des difficultés d'endormissement [85].

2.2. Les éveils nocturnes

Il est clairement prouvé que le bruit peut provoquer des éveils au cours du sommeil. Leur nombre ainsi que leur durée sont fortement variables. Le niveau de bruit nécessaire pour éveiller un dormeur dépend de plusieurs facteurs, notamment des caractéristiques physiques du bruit, de sa signification, et essentiellement du stade de sommeil dans lequel se trouve le dormeur. En effet, le seuil d'éveil est beaucoup plus élevé dans le stade de sommeil profond (stade N3) que dans les stades N1 et N2 [93]. Des études récentes ont montré que le stade N2 est le stade de

⁵ Weighted Equivalent Continuous Perceived Noise Level (le niveau continu équivalent pondéré A perçu) : indicateur du niveau quotidien du bruit des avions.

sommeil le plus vulnérable aux éveils induits par le bruit [81][163][77]. En effet, les éveils dus au bruit sont plus fréquemment observés au stade N2 que pendant le sommeil profond (stade N3) ou le sommeil paradoxal [153]. Si la probabilité d'éveil dans le sommeil paradoxal a souvent été trouvée plus élevée que dans le stade N2, ce dernier reste le stade le plus vulnérable puisque la probabilité des éveils spontanés est beaucoup plus élevée dans le sommeil paradoxal que dans le stade N2 [81]. Concernant les caractéristiques physiques du bruit, un bruit intermittent ou une hausse brutale du niveau de bruit se produisant sur un bruit de fond de faible intensité est particulièrement épouvantable [93]. Un bruit avec une intensité croissante rapide a également un effet plus marqué sur l'éveil qu'un bruit qui s'établit lentement [82]. La durée du bruit augmente également la probabilité d'éveil au cours du sommeil [163].

Le seuil du niveau de bruit pouvant réveiller un dormeur est sujet à discussion dans la littérature. Griefahn *et al.* ont défini à l'aide d'une méta-analyse de différentes études que le niveau de bruit provoquant un éveil est de 60 dB(A) avec un écart-type de 7 dB(A) au niveau de l'oreille du dormeur [164]. Maschke a repris les mêmes études avec une méthode de calcul différente. Il a finalement trouvé que le niveau de bruit est de 48 dB (A) au niveau de l'oreille du dormeur [164]. Dans une étude récente, Dang-Vu *et al.* ont constaté que les éveils sont provoqués à partir de 40 dB(A) [165]. Basner *et al.* ont quant à eux montré qu'un éveil peut être observé à partir d'un niveau de pression acoustique maximum de 33 dB(A) [81]. Les seuils d'intensité sonore à partir desquels des éveils sont observés diminuent au fur et à mesure que le temps cumulé de sommeil augmente [93]. Ainsi, un dormeur peut être réveillé facilement au cours des heures matinales par des niveaux de bruit faibles, et même par des niveaux de bruit ambiant.

Une étude a montré que le nombre d'éveils nocturnes augmente avec la fréquence des bruits la nuit, mais pas de façon proportionnelle [166]. Une étude a quant à elle observée que le nombre d'éveils pendant les nuits d'exposition diminue de façon continue avec l'augmentation du nombre d'événements de bruit par nuit [80], [82]. Lorsque le nombre d'événements de bruit est considérable, la durée d'un éveil peut se prolonger en raison de la continuité des événements de bruit et donc conduire à un nombre d'éveils réduit.

2.2.1. Études en laboratoire

2.2.1.1. Bruit routier

Mesures objectives

Plusieurs expérimentations menées en laboratoire ont mis en évidence les conséquences de l'exposition au bruit routier sur les éveils nocturnes. Saletu *et al.* ont constaté que le nombre et la durée des éveils intermittents augmentent significativement chez les jeunes (avec plus de 43,5 minutes) et non significativement chez les personnes âgées (plus de 27,1 minutes) [144] après exposition au bruit de la circulation toute la nuit. Hajak *et al.* ont exposé 10 hommes au bruit de camions et réalisé des enregistrements polysomnographiques. Ils ont montré que le nombre d'éveils est non significativement plus élevé au cours des nuits bruyantes avec des durées d'éveil plus longues qu'au cours des nuits calmes [167]. Öhrström et Skånberg n'ont en revanche pas trouvé de différence significative pour le nombre et la durée des éveils entre les nuits bruyantes et les nuits calmes chez 13 femmes et cinq hommes exposés au bruit routier pendant une semaine, avec la réalisation de mesures actigraphiques [94]. Ce résultat peut être expliqué par le fait que l'actimètre n'a été porté qu'au lit et non pendant les 24 heures. En effet, une étude a montré que l'actigraphie a une validité moindre lorsque l'actimètre est porté uniquement au lit [168].

Mesures subjectives

Le nombre d'éveils nocturnes déclaré augmente de façon significative après exposition au bruit [108]. Öhrström *et al.* [169] ont montré que plus le niveau de bruit routier est élevé, plus le nombre d'éveils est grand. À 70 dB(A), il y a en moyenne trois éveils de plus que pour une exposition à 60 dB(A). Griefahn a aussi trouvé que plus le niveau de bruit du trafic routier augmente, plus la fréquence déclarée des éveils et la durée totale de ceux-ci augmentent [149]. Öhrström et Rylander ont quant à eux montré qu'avec une exposition de 60 dB(A), l'accroissement du nombre d'événements du bruit entraîne une augmentation des éveils nocturnes déclarés [142]. À 64 événements, les sujets sont réveillés en moyenne trois fois plus que pendant une nuit sans exposition au bruit [142].

2.2.1.2. Bruit aérien

Mesures objectives

Les expérimentations ont montré que l'exposition au bruit des avions augmente la probabilité d'éveil. Basner *et al.* ont montré que pendant les nuits d'exposition au bruit des avions à un niveau de 45 dB(A), les sujets ont 1,24 fois plus de risque (IC à 95% = 0,83 à 1,85) d'être réveillés par rapport aux nuits sans exposition au bruit des avions (30 dB(A)) [152]. Pour les nuits d'exposition à 65 dB(A), l'OR est de 5,10 (IC à 95% = 3,50 à 7,43) comparé aux nuits sans exposition au bruit des avions, et le nombre d'éveils est significativement plus élevé que celui des nuits avec une exposition à 45 dB(A) [152]. Dans une autre expérimentation, le nombre d'éveils augmente significativement de 3,5 éveils par nuit après exposition au bruit des avions en termes de nombre d'événements mais aussi de niveau de pression acoustique maximum [151]. Basner *et al.* ont également constaté que pour les plus bas niveaux de pression acoustique maximale des événements du bruit des avions, c'est-à-dire 45 dB (A), la plus forte association entre l'exposition au bruit et les effets sur le sommeil est observée pour les éveils [152].

2.2.1.3. Bruit ferroviaire

Mesures objectives

Concernant le bruit ferroviaire, Saremi *et al.* [153] ont montré que le nombre d'éveils par nuit est le même pour la nuit de contrôle (exposition à 35 dB(A)) et la nuit avec une exposition à 40 dB(A). À 50 dB(A), les auteurs ont constaté que le nombre d'éveils augmente mais non significativement. Tassi *et al.* ont en revanche trouvé une augmentation significative du nombre d'éveils après exposition au bruit ferroviaire la nuit chez les jeunes comme chez les seniors [170].

2.2.1.4. Combinaison des bruits des différents modes de transport

Mesures objectives

Le bruit des différents modes de transport peut également provoquer des éveils au cours du sommeil. Basner *et al.* ont montré que l'exposition au bruit des différents modes de transport (avion, train et route) augmente la probabilité d'être réveillé au cours de la nuit [82]. La fréquence des éveils est significativement plus élevée au cours des nuits d'exposition qu'au

cours des nuits sans exposition. La probabilité d'éveils augmente de façon plus ou moins monotone avec le niveau de pression acoustique maximal [82]. Marks *et al.* ont également montré que la probabilité d'éveils augmente de manière significative avec le niveau maximal de pression acoustique [163]. Ils ont aussi observé que la probabilité d'éveils augmente significativement avec la durée du bruit et avec sa pente de montée (dB/s) [163]. Chez 72 sujets exposés au bruit de différents modes de transport (avion, train et route), Basner *et al.* ont trouvé, à partir des mesures polysomnographiques, que la combinaison des bruits des trois ou de deux types de transport augmente davantage la probabilité d'éveils que l'exposition au bruit d'un seul mode de transport [82]. Marks *et al.* ont trouvé que le bruit ferroviaire provoque un nombre plus élevé d'éveils que les autres sources de bruit [163].

Mesures subjectives

Avec la combinaison d'une exposition au bruit routier, aérien et ferroviaire, Marks et Griefahn ont trouvé que le nombre d'éveils déclaré le matin est significativement plus élevé après les nuits bruyantes qu'après les nuits calmes [68].

2.2.2. Études in situ

2.2.2.1. Bruit routier

Mesures objectives

Les études in situ ont aussi montré que le nombre d'éveils au cours du sommeil est plus élevé lorsque l'exposition au bruit routier augmente. Griefahn et Gros ont observé une augmentation significative du nombre d'éveils intermittents chez des personnes vivant dans des rues fortement exposées [159]. Ils ont également trouvé que le temps d'éveil intra-sommeil est significativement plus élevée [159]. Aasvang *et al.* ont eux aussi montré que le nombre d'éveils est plus élevé, mais non significativement chez les personnes exposées au bruit routier la nuit [171]. Öhrström *et al.* ont trouvé que le nombre d'éveils est significativement plus élevé chez les enfants que chez les parents [157]. Dans une étude longitudinale, Öhrström et Skanberg [95] ont constaté une baisse non significative du nombre d'éveils par nuit après réduction du trafic routier entre 1997 et 1999 (1 375 véhicules par nuit en 1997 et 180 par nuit en 1999). Le nombre de périodes de long éveil (plus de 5 minutes) a également diminué de façon significative, de 12 éveils par nuit en 1997 à 4 éveils par nuit en 1999 [95].

Mesures subjectives

Les habitants des zones bruyantes déclarent se réveiller beaucoup plus la nuit que les habitants des zones silencieuses [156][108][84][88]. D'après Jakovljevic *et al.*, les habitants des zones bruyantes ont significativement 2,6 fois de risque de se réveiller la nuit que les habitants des zones calmes [84]. Pirrera *et al.* ont également trouvé un nombre d'éveils significativement plus élevé dans la zone bruyante mais seulement avec le questionnaire incluant le Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI) et l'Epworth Sleepiness Scale (ESS) [156]. Avec les agendas de sommeil le matin, aucune différence n'a été trouvée pour le nombre d'éveils nocturnes entre la zone bruyante et la zone silencieuse.

2.2.2.2. Bruit aérien

Mesures objectives

Au voisinage de l'aéroport de Cologne/Bonn, Basner *et al.* ont montré que l'exposition au bruit des avions est associée à une augmentation de la probabilité d'éveils [81]. À 32,7 dB(A), aucune augmentation de la probabilité d'éveils n'a été observée. En revanche, le nombre d'éveils a augmenté significativement de 9% à 70 dB(A). Un total de 418 riverains de l'aéroport d'Amsterdam-Schiphol (50% femmes) âgés de 18 à 81 ans ont été suivis à leur domicile avec des mesures du bruit à l'intérieur et à l'extérieur et des mesures actimétriques [160]. Les éveils sont statistiquement plus susceptibles de se produire au cours d'un événement de bruit d'avion qu'en l'absence de celui-ci [160]. Autour de l'aéroport de DeKalb-Peachtree (PDK) aux États-Unis, Fidell *et al.* ont regardé si l'augmentation du trafic aérien due à l'organisation des Jeux Olympiques a un effet sur le sommeil des riverains [172]. Les données ont été collectées 15 jours avant la cérémonie d'ouverture des Jeux Olympiques, au cours des Jeux et une semaine après leur clôture. Les auteurs ont ainsi trouvé que le nombre d'éveils est en moyenne de 1,8 par nuit avant l'ouverture des Jeux, 1,3 par nuit pendant les Jeux, et 1 par nuit après la fin des Jeux [172]. Lorsque le niveau d'exposition au bruit à l'intérieur de la chambre augmente de 10 dB(A), le pourcentage de personnes réveillées augmente de 1,3% [172]. Dans une autre étude à proximité d'un aéroport civil de Los Angeles, Fidell *et al.* ont trouvé qu'une augmentation de 10 dB(A) du niveau d'exposition au bruit est associée à une augmentation significative de 1,6% du pourcentage de personnes réveillées [173].

Mesures subjectives

Au voisinage de l'aéroport de Roissy, Lainey *et al.* ont trouvé que les sujets exposés au bruit des avions déclarent davantage d'éveils nocturnes que les individus non-exposés [124]. Dans une autre étude, le niveau de bruit et le nombre d'événements de bruit la nuit sont associés significativement avec le nombre d'éveils nocturnes déclaré le matin [160].

2.2.2.3. Bruit ferroviaire

Mesures objectives

En réalisant des enregistrements polysomnographiques au domicile de 33 sujets vivant le long de voies de chemin de fer, Elmenhorst *et al.* ont montré que la probabilité de changements de stade de sommeil pour passer au stade « être éveillé/stade 1 » associée au bruit ferroviaire augmente fortement, passant de 6,5% à 35 dB(A) à 20,5% à 80 dB(A) [77]. Elmenhorst *et al.* ont également observé que le bruit ferroviaire la nuit conduit à des probabilités d'éveils significativement plus élevées que le bruit des avions [77]. Ceci s'explique en partie par les différences du temps de montée des événements sonores [77]. Aasvang *et al.* ont quant à eux trouvé que le nombre d'éveils est non significativement plus élevé dans les groupes fortement exposés au bruit la nuit par rapport aux groupes faiblement exposés [171]. Saremi *et al.* [153] ont divisé les éveils en deux catégories selon leur durée : micro-éveils (3-10 secondes) et éveils (> 10 secondes). Aucun effet du bruit n'a été observé pour le nombre d'éveils moyen. En revanche, le nombre moyen de micro-éveils augmente significativement avec le niveau de bruit de train [153]. Les éveils sont plus fréquents avec les trains de marchandises qu'avec les trains commerciaux [153]. Cette différence est expliquée par les différentes caractéristiques physiques du bruit des trains avec des durées plus longues pour les trains de marchandises comparées aux trains commerciaux.

Mesures subjectives

Le niveau de bruit ferroviaire et le nombre d'événements de bruit sont également associés significativement avec le nombre d'éveils nocturnes déclaré le matin [77]. Une relation dose-effet a été trouvée entre l'exposition au bruit ferroviaire et le nombre d'éveils nocturnes dus au bruit [85]. Un sujet exposé au bruit ferroviaire à des niveaux supérieurs à 65 dB(A) en façade de la chambre a 7 fois plus de risque d'être réveillé par le bruit ferroviaire qu'un sujet exposé à des niveaux de bruit de 40 à 44 dB(A) [85]. Pennig *et al.* ont aussi trouvé que le nombre total

de trains et le nombre de trains de marchandises affectent de manière significative la fréquence des éveils auto-déclarée [174].

2.3. Le temps de sommeil total

Le temps de sommeil total fait partie des paramètres qui peuvent être affectés par l'exposition au bruit. La majorité des études ont mis en évidence une réduction du temps de sommeil total due à l'exposition au bruit. Le temps total de sommeil peut être réduit à la fois par une plus longue durée d'endormissement, par des éveils nocturnes prolongés ou encore par un réveil final prématuré [93]. Si l'exposition au bruit routier réduit le temps de sommeil total, les études concernant l'exposition au bruit des avions et celle au bruit ferré sont à ce jour insuffisantes et présentent des lacunes [175].

En laboratoire, le temps de sommeil total est évalué objectivement. Sur le terrain, il est parfois évalué objectivement et souvent auto-déclaré subjectivement par les participants dans la plupart des études.

2.3.1. Études en laboratoire

2.3.1.1. Bruit routier

Mesures objectives

Le temps de sommeil total est toujours réduit, significativement ou non, suite à l'exposition au bruit routier en laboratoire. Griefahn *et al.* l'ont montré en comparant les nuits bruyantes à des nuits silencieuses ; ils ont trouvé que le temps de sommeil total est significativement réduit pendant les nuits bruyantes [155]. Saletu *et al.* [144] ont eux aussi constaté une réduction significative du temps de sommeil total après une exposition continue de 68 à 83 dB(A) au bruit routier la nuit. Xin *et al.* [176] ont quant à eux trouvé une réduction mais non significative le temps de sommeil total chez des sujets exposés au bruit de la circulation routière à des niveaux de $L_{max} = 71,2$ dB(A), $L_{eq} = 49,6$ dB(A) et $L_{AE}^6 = 94,1$ dB(A). Suite à une exposition à un niveau équivalent de 49,6 dB(A), Kuroiwa *et al.* [146] ont eux aussi observé une diminution non significative le temps de sommeil total. Dans un cadre simulant les conditions de travail typiques des conducteurs professionnels de camions long-courriers, les auteurs ont trouvé, avec la réalisation d'enregistrements polysomnographiques, une diminution non significative du

⁶ L_{AE} = Niveau d'exposition sonore d'un événement = SEL avec pondération « A »

temps de sommeil total chez les 10 hommes exposés au bruit de la circulation le long des autoroutes [167].

2.3.1.2. Bruit aérien

Mesures objectives

Pour le bruit aérien, les études sont moins nombreuses et les résultats ne convergent pas. Griefahn *et al.* [155] n'ont pas trouvé de modification significative ni le temps de sommeil total ni du temps passé entre l'endormissement et le dernier réveil, en comparant les nuits bruyantes et les nuits calmes. Une autre étude a observé une diminution du temps de sommeil total de 1,8 minute après exposition au bruit aérien [177]. Cette réduction n'est pas significative. Basner et Samel [151] ont quant à eux trouvé de façon inattendue une augmentation non significative du temps de sommeil total de 2,5 minutes en moyenne. D'après les auteurs, ce dernier résultat s'explique très probablement par la réduction statistiquement significative de la latence du sommeil et la décroissance du temps d'éveil intra-sommeil pendant les nuits d'exposition. Ces deux résultats peuvent être interprétés comme des mécanismes d'adaptation à la privation partielle de sommeil les précédentes nuits d'exposition. Dans une autre étude, Basner et Samel [80] ont observé une diminution non significative du temps de sommeil total de 3,1 minutes en moyenne pendant les nuits bruyantes en comparaison avec les nuits calmes.

2.3.1.3. Bruit ferroviaire

Mesures objectives

Concernant le bruit ferroviaire, une réduction significative du temps total de sommeil estimé avec des mesures polysomnographiques a été trouvée après exposition au bruit ferroviaire de 32 sujets [155]. Saremi *et al.* [153] ont eux observé une diminution mais non significative du temps de sommeil total. Tassi *et al.* [163] n'ont pas trouvé d'effet du bruit ferroviaire sur le temps de sommeil total.

2.3.1.4. Combinaison des bruits des différents modes de transport

Mesures objectives

Marks et Griefahn [68] ont étudié les effets du bruit des différents modes de transport sur le sommeil de 24 sujets. Avec une nuit tranquille exposée à 32 dB(A), et 12 nuits bruyantes avec des expositions alternées aux différentes sources de bruit, à des niveaux sonores équivalents de

39, 44 et 50 dB(A), ils ont trouvé une diminution significative du temps de sommeil total. Dans une autre étude [155] regroupant tous les modes de transport, les auteurs ont également observé une réduction du temps de sommeil total de 9,4 minutes.

2.3.2. Études in situ

Les résultats des études in situ sont contrastés. Certaines ont trouvé une réduction significative du temps de sommeil total et d'autres non.

2.3.2.1. Bruit routier

Mesures objectives

Öhrström et Skanberg ont réalisé des mesures actimétriques au domicile des participants et ont trouvé que le temps de sommeil total est significativement réduit de 9 minutes en présence du bruit du trafic routier [94]. D'autres ont trouvé une réduction mais non significative. Pirrera *et al.* ont montré avec la réalisation de mesures actimétriques, que le temps de sommeil total est moins élevé, mais non significativement chez les sujets exposés au bruit routier par rapport aux sujets non exposés [156]. Dans une étude longitudinale explorant les effets de la diminution du trafic routier, Öhrström et Skanberg ont réalisé des mesures actimétriques pendant trois nuits, au cours de chaque période de l'étude (1997, 1998, 1999) [95]. Ils ont trouvé que dans la zone exposée, entre 1997 et 1999, le temps passé au lit entre l'extinction des lumières jusqu'au réveil a considérablement diminué d'environ 58 minutes, probablement parce que les sujets sont beaucoup moins fatigués après la réduction du trafic. Le temps de sommeil total a également diminué significativement d'environ 81 minutes. Cette diminution est aussi probablement due à la diminution des longs éveils. En revanche, dans la zone de contrôle, ni le temps passé au lit ni le temps de sommeil total n'ont été significativement modifiés entre 1997 et 1999. Les auteurs ont aussi constaté qu'en 1997, le temps de sommeil total est supérieur de 21 minutes dans la zone exposée par rapport à la zone de contrôle, alors qu'en 1999 elle l'est de 15 minutes mais non significativement.

Mesures subjectives

Halonen *et al.* n'ont pas trouvé d'association significative entre le niveau de bruit du trafic routier la nuit et le temps de sommeil total rapporté en deux classes ($\leq 6,5$ heures vs ≥ 7 heures) chez 7 019 habitants d'Helsinki et Vantaa en Finlande [178]. Stosic *et al.* n'ont pas non plus

observé de différence significative pour le temps de sommeil total déclaré par des habitants de rues bruyantes et des habitants de rues silencieuses [88]. Öhrström et Skanberg ont en revanche trouvé une diminution significative du temps de sommeil total déclaré ainsi que du temps passé au lit après réduction du trafic routier la nuit [95]. Cette réduction est en moyenne de 58 minutes pour le temps passé au lit et de 49 minutes pour le temps de sommeil total [95]. Elle s'explique probablement par le fait que les individus sont moins fatigués après la réduction du trafic routier.

2.3.2.2. Bruit aérien

Mesures objectives

Dans notre revue bibliographique, aucune étude in situ sur l'exposition au bruit des avions ne s'est intéressée au temps de sommeil total mesuré objectivement.

Mesures subjectives

En revanche, Kim *et al.* ont trouvé un temps de sommeil total significativement moins élevé dans le groupe fortement exposé au bruit des avions, suivi du groupe faiblement exposé et enfin du groupe de contrôle [161].

2.3.2.3. Bruit ferré

Mesures objectives

Elmenhorst *et al.* n'ont pas trouvé d'effet du bruit sur le temps de sommeil total en réalisant des enregistrements polysomnographiques au domicile de 33 sujets vivant le long des voies de chemin de fer [77].

2.4. La structure interne du sommeil

La littérature est unanime : l'exposition au bruit des transports modifie la structure interne du sommeil. Ces modifications concernent le nombre de changements de stade ainsi que les rythmes propres aux stades de sommeil. Ainsi, l'exposition au bruit des transports diminue les stades de sommeil à ondes lentes et le sommeil paradoxal au profit du stade 1 ou d'éveils de durée variable.

2.4.1. Études en laboratoire

2.4.1.1. Bruit routier

Mesures objectives

Plusieurs études ont mis en évidence une diminution du sommeil paradoxal et une augmentation du stade 1 en présence du bruit routier. Xin *et al.* l'ont montré après exposition de sept jeunes étudiants masculins au bruit routier pendant 17 nuits [176]. Ils ont trouvé une augmentation significative du temps passé en stade 1 ainsi qu'une baisse significative du sommeil paradoxal. Kuroiwa *et al.* ont également observé une diminution significative du sommeil paradoxal suite à une exposition au bruit du trafic routier à un niveau équivalent de 49,6 dB(A) [146]. À ce même niveau, une augmentation du stade 1 a aussi été trouvée mais elle est non significative. Griefahn a constaté qu'une diminution brusque du sommeil paradoxal apparaît dès le dépassement du niveau de pression acoustique de 44 dB(A) [149]. Pour Kawada et Suzuki, une réduction significative du sommeil paradoxal a été observée à partir de 45 dB(A) pour un bruit continu la nuit [179]. Le nombre de changements de stade augmente également en présence du bruit. Popp *et al.* ont montré que les sujets ont non significativement plus de changements de phases de sommeil au cours des nuits bruyantes que pendant les nuits silencieuses [167].

2.4.1.2. Bruit aérien

Mesures objectives

Les mêmes modifications sont observées pour le bruit des avions. En réalisant des enregistrements polysomnographiques pendant 13 nuits consécutives, Basner et Samel ont exposé 128 sujets (75 femmes et 53 hommes) à des événements de bruit d'avion variant de 4 à 128 événements par nuit et avec des niveaux de pression acoustique maximaux allant de 45 à 80 dB(A) [151]. Une fragmentation du sommeil a alors été observée avec une augmentation significative de 2,2 minutes pour le stade 1, ainsi qu'une diminution significative du sommeil lent profond (stade N3) de 5,3 minutes pour les nuits exposées par rapport aux nuits sans exposition [151]. Dans une autre étude, avec des niveaux L_{Amax} allant de 50 à 80 dB(A), le sommeil lent profond est significativement réduit de 9,1 minutes, alors que le stade 1 augmente significativement de 3,8 minutes pendant les nuits exposées [80]. En exposant cinq hommes et cinq femmes à 64 événements de bruit d'aéronefs avec une pression maximale de 45 ou 65 dB(A), Basner *et al.* ont trouvé que l'augmentation du nombre d'événements par nuit diminue,

non significativement, le temps passé en stade 4 ainsi que les mouvements oculaires rapides (MOR) (sommeil paradoxal) [152]. À l'inverse, il augmente significativement le temps passé au stade 2 et non significativement le temps passé dans les stades 1 et 3.

2.4.1.3. Bruit ferroviaire

Mesures objectives

Marks et Greifahn ont trouvé une augmentation significative du stade 1 ainsi qu'une diminution significative de la quantité du sommeil profond après exposition de 32 sujets à des niveaux moyens équivalents de 40, 44 et 50 dB(A) [180]. Aucun effet significatif n'a été observé sur le sommeil paradoxal. Tassi *et al.* ont constaté une augmentation non significative des changements de stade de sommeil ainsi qu'une augmentation non significative du pourcentage des stades 1 après exposition au bruit ferroviaire [170]. Saremi *et al.* ont quant à eux trouvé que la durée d'apparition du sommeil profond augmente significativement avec le niveau équivalent du bruit [153].

2.4.1.4. Combinaison des bruits des différents modes de transport

Mesures objectives

Les effets du bruit sur la structure interne restent les mêmes lorsqu'on prend en compte les bruits des différents modes de transport. Chez 12 femmes et 12 hommes ayant dormi pendant 13 nuits en laboratoire, Marks et Griefahn ont trouvé que le bruit de la circulation entraîne une diminution significative du temps passé dans le sommeil avec ondes lentes (stade N3) ainsi que du temps passé dans le sommeil paradoxal [68]. Ils ont également observé une augmentation significative du temps passé dans le stade 1. Une autre expérimentation a été réalisée pendant trois semaines consécutives avec des enregistrements polysomnographiques. Les auteurs ont trouvé que le bruit provoque une augmentation significative de la latence du sommeil profond de 4,7 minutes, une augmentation significative du temps passé dans le stade 1 de 13 minutes, une diminution significative du sommeil profond de 5,3 minutes et une diminution significative du sommeil paradoxal de 6,4 minutes [155].

En réalisant différentes combinaisons entre les bruits des différents modes de transport, Basner *et al.* ont constaté que la structure interne du sommeil est plus touchée par la combinaison de trois ou de deux modes que par une exposition à un seul mode [82]. La durée d'apparition du sommeil lent est significativement plus longue de 5,2 minutes pour la combinaison des bruits

des trois modes de transport que pour une exposition au bruit d'un seul mode. Le temps passé dans le sommeil paradoxal est significativement plus court de 6,1 minutes et 4,7 minutes dans la combinaison de trois ou de deux bruits respectivement, que pour une seule exposition. De façon générale, la latence du sommeil profond, la quantité de stade 1 et la fréquence des changements de phase de sommeil sont significativement plus élevées pendant les nuits d'exposition aux bruits. À l'inverse, les quantités de sommeil profond sont significativement plus faibles pendant les nuits d'exposition aux bruits. Marks *et al.* ont quant à eux trouvé que le bruit ferroviaire cause des altérations plus longues de la structure du sommeil que le bruit des avions et le bruit routier [163].

2.4.2. Études in situ

In situ, les études vont dans le même sens que celles en laboratoire.

2.4.2.1. Bruit routier

Mesures objectives

Aasvang *et al.* ont trouvé que l'augmentation du niveau de bruit routier diminue significativement le temps passé dans le sommeil paradoxal chez 40 sujets avec des enregistrements polysomnographiques [171]. Eberhardt et Akselsson ont quant à eux observé une diminution non significative du sommeil profond de 8 minutes ainsi qu'un retard du début du stade 4 [158]. Ils ont conclu que le sommeil profond et le stade 2, avec une activité d'ondes beaucoup plus lentes, sont les stades les plus sensibles au bruit routier [158]. Le nombre total de changements de stade de sommeil est également significativement différent entre les nuits calmes et les nuits bruyantes [158]. Griefahn et Gros ont montré que l'exposition au bruit routier provoque une prolongation significative de la latence du sommeil profond, une diminution significative du sommeil paradoxal, et enfin un nombre de cycles complets de sommeil significativement plus faible pour tous les sujets [159].

Wilkinson et Campbell ont réalisé des mesures polysomnographiques chez 12 sujets vivant dans des zones avec une circulation routière importante [115]. Une isolation des chambres a été réalisée la deuxième semaine en introduisant un double vitrage, diminuant ainsi le niveau d'exposition au bruit de 5,8 dB(A) en moyenne. Avec cette isolation, les auteurs ont trouvé que seules les minutes passées au stade 4 et le sommeil profond augmentent de manière significative lorsque le double vitrage a été introduit. Elles diminuent lorsque le double vitrage a été retiré

[115]. Cette expérience montre qu'une réduction même modérée du niveau de bruit peut favoriser une amélioration de la qualité du sommeil.

2.4.2.2. Bruit aérien

Mesures objectives

Dans notre revue bibliographique, aucune étude sur l'exposition au bruit des avions ne s'est intéressée à la structure interne du sommeil mesurée objectivement in situ.

2.4.2.3. Bruit ferré

Mesures objectives

Aasvang *et al.* ont aussi montré une diminution significative du sommeil paradoxal suite à l'exposition au bruit nocturne des trains [171].

2.5. Les mouvements du corps

Pendant le sommeil, les mouvements du corps sont considérés comme étant un bon indicateur de la qualité du sommeil [181]. Dans la littérature, les études vont toutes dans le même sens : une augmentation des mouvements du corps est observée après un événement de bruit de transport. En effet, les mouvements du corps sont plutôt associés aux indicateurs événementiels qu'aux indicateurs énergétiques.

2.5.1. Études en laboratoire

Öhrström *et al.* ont montré que l'exposition au bruit routier n'affecte pas significativement le nombre total de mouvements du corps mesurés par un accéléromètre attaché sous le lit pendant la durée totale du sommeil [108]. En revanche, une augmentation significative des mouvements du corps a été observée pendant les périodes suivant immédiatement un événement de bruit. Le nombre de mouvements a triplé chez les sujets sensibles au bruit [108]. Dans une autre étude, Öhrström n'a pas non plus trouvé de différence significative concernant le nombre total de mouvements du corps entre les nuits bruyantes et les nuits calmes [143]. En revanche, pendant les périodes d'événements de bruit routier, le nombre moyen de mouvements du corps par minute a triplé comparativement aux périodes calmes [143]. Ces résultats sont également confirmés par Öhrström et Rylander [142].

2.5.2. Études in situ

Plusieurs études réalisées au domicile des sujets se sont intéressées aux effets du bruit sur la motilité mesurée avec l'actimétrie. Si le bruit s'est avéré associé positivement avec la motilité, celle-ci est davantage liée à l'indicateur L_{max} qu'au Leq à l'intérieur de la chambre. Pour Janssen *et al.* [182], seul le nombre d'événements avec des niveaux de bruit d'avion élevés peut avoir des effets sur la motilité. Pour Passchier-Vermeer *et al.* [160], le niveau de bruit d'avion qui induit une motilité est de 32 dB(A). L'augmentation des niveaux de bruit des avions augmente significativement la probabilité de motilité [160]. Il en est de même pour le nombre d'événements d'avion [160]. Une exposition à 60 dB(A) suscite une réaction de motilité plus importante comparée à une exposition à 50 dB(A) [183]. À 68 dB(A), la probabilité de motilité pendant un événement de bruit d'avion est trois fois plus grande qu'en l'absence de bruit [160]. Outre le niveau et le nombre d'événements du bruit des avions, la pente de montée du niveau de pression acoustique a aussi un effet sur la motilité. Plus la pente de montée du niveau de pression acoustique des événements est forte, plus les réactions de motilité sont importantes [170][171]. La réaction du corps à un événement de bruit d'avion peut également dépendre de la position de l'événement sur l'échelle de temps ou/et sur l'existence de précédents événements. En effet, Brink *et al.* ont trouvé que la motilité de 60 sujets résidant au voisinage de l'aéroport de Zurich est plus forte après les premiers événements de bruit des avions et que l'intensité des réactions de la motilité diminue au fil des événements de bruit [183].

2.6. Les modifications végétatives au cours du sommeil.

L'exposition au bruit peut modifier les activités végétatives telles que le rythme cardiaque ou encore les phénomènes vasomoteurs pendant le sommeil. Les études mettent en évidence une augmentation du rythme cardiaque, de la pression artérielle et de la sécrétion d'adrénaline suite à une exposition au bruit des transports pendant le sommeil.

2.6.1. Études en laboratoire

2.6.1.1. Bruit routier

De façon similaire à ce qui a été trouvé concernant les mouvements du corps, une augmentation du rythme cardiaque mesuré avec un accéléromètre attaché sous le lit est observée pendant les périodes suivant un événement de bruit au cours du sommeil [108][185]. En effet, si la fréquence cardiaque moyenne pendant la durée totale du sommeil n'est pas affectée par

l'exposition au bruit routier, une augmentation significative du rythme cardiaque est observée pendant les périodes suivant immédiatement un événement de bruit [108][185]. Chez les individus sensibles au bruit, une augmentation significative de la fréquence cardiaque de 1,8 battement/min a été observée contre 1,1 battement/min chez les individus non sensibles au bruit [108].

2.6.1.2. Bruit aérien

Concernant l'exposition au bruit des avions, Maschke *et al.* ont trouvé une différence significative pour la sécrétion d'adrénaline entre les nuits calmes et les nuits bruyantes [127]. En effet, les auteurs ont cherché à connaître l'influence du bruit des vols de nuit sur les réactions électro-biologiques et sur la sécrétion des catécholamines (adrénaline et noradrénaline). Pendant les nuits bruyantes, les sécrétions d'adrénaline sont deux fois plus élevées que pendant les nuits calmes. Quant à la sécrétion de noradrénaline, les auteurs ont observé une légère hausse significative pendant les nuits bruyantes. En outre, la concentration en catécholamines augmente avec le niveau de bruit.

2.6.1.3. Bruit ferroviaire

Tassi *et al.* [186] ont trouvé que le niveau de bruit ferroviaire a des effets dose-dépendants sur tous les indices cardiovasculaires (fréquence, amplitude et latence de la réponse cardiaque, fréquence, amplitude et latence d'impulsion du doigt), avec des réponses cardiaques plus élevées pour les trains de marchandises. Les réponses vasculaires sont similaires quel que soit le type de train. Une différence significative de réaction a été observée entre les jeunes (26 ans de moyenne d'âge) et les adultes (52 ans de moyenne d'âge). Les jeunes présentent une fréquence et une amplitude de la réponse cardiaque plus élevées que les personnes âgées. La latence d'impulsion de doigt est plus courte chez les personnes âgées et aucune différence n'est remarquée pour la vasoconstriction. Dans une autre étude, Tassi *et al.* [170] ont trouvé que le bruit des trains la nuit a un effet sur la fréquence de la réponse cardiaque, avec des effets plus importants et significatifs pendant le stade 2 et le sommeil paradoxal, comparativement au sommeil à ondes lentes. L'exposition au bruit la nuit conduit également à une augmentation significative et importante de l'amplitude de la réponse cardiaque et une diminution significative de la latence de la réponse cardiaque.

2.6.1.4. Combinaison des bruits des différents modes de transport

En considérant plusieurs sources de bruit environnemental (camions, avions civils et militaires et sons artificiels), Carter *et al.* ont montré que la fréquence cardiaque est sensible au niveau de bruit et non au type de bruit [187]. Même à des intensités sonores relativement faibles, une augmentation significative de la fréquence cardiaque est observée après exposition au bruit de différentes sources de transport (avion, train, route) la nuit [188]. Griefahn *et al.* ont trouvé que les paramètres acoustiques (mode de circulation, niveau maximal, vitesse de montée) influencent nettement les modifications cardiaques [188]. Les réponses cardiaques sont aussi déterminées par la présence ou l'absence de réveils ainsi que par le stade de sommeil pendant lequel le bruit survient [188]. La montée de la fréquence cardiaque est plus grande lorsque les sujets sont réveillés par le bruit [187]. Dans le sommeil paradoxal, l'élévation maximale des réactions cardiaques est plus grande, alors qu'elle est plus basse dans le sommeil profond après exposition au bruit [188]. Outre la fréquence cardiaque, une augmentation significative du tonus sympathique vasculaire est observée suite à l'exposition au bruit, alors qu'une augmentation significative de la pression artérielle est principalement constatée lors d'apparitions soudaines d'un son [187].

2.6.2. Études in situ

2.6.2.1. Bruit routier

Une augmentation du niveau de bruit routier la nuit a été associée à une augmentation significative de la fréquence cardiaque [115]. Griefahn et Gros ont aussi montré une corrélation positive et significative entre le niveau de bruit équivalent calculé pour chaque minute, et le rythme cardiaque ainsi que la variabilité de la fréquence cardiaque [159].

2.6.2.2. Bruit aérien

La pression artérielle systolique augmente aussi de façon significative avec le niveau d'exposition au bruit des avions la nuit [189]. Elle dépend également de la durée de l'exposition. Aydin et Kaltenbach ont constaté chez les riverains de l'aéroport de Francfort que pour un même niveau d'exposition au bruit aérien la nuit, la pression artérielle moyenne mesurée pendant la nuit dépend de la durée de l'exposition [190]. Plus la durée de l'exposition est longue, plus la pression artérielle est élevée. L'exposition au bruit des avions a aussi un effet sur le niveau d'adrénaline, le temps de transit des impulsions (paramètre de la rigidité artérielle

qui varie inversement de la pression artérielle) et la fonction endothéliale⁷. En effet, avec un niveau moyen de pression acoustique maximal de 60 dB(A) par nuit, Schmidt *et al.* ont trouvé une augmentation significative du niveau d'adrénaline plasmatique ainsi qu'une diminution significative du temps de transit des impulsions [191]. Ils ont également démontré que l'exposition au bruit des avions la nuit altère la fonction endothéliale [191].

2.6.2.3. Combinaison des bruits des différents modes de transport

Sans distinguer les sources de bruit, l'exposition au bruit la nuit affecte la pression artérielle et le rythme cardiaque. Katsouyanni *et al.* ont démontré que le niveau de bruit la nuit autour des grands aéroports européens est significativement associé à une augmentation de la pression artérielle mesurée pendant la journée [100]. Haralabidis *et al.* ont aussi montré une augmentation significative de la pression artérielle systolique et diastolique ainsi que de la fréquence cardiaque avec les niveaux de bruit la nuit les plus élevés [192]. Les effets pour chaque source de bruit (aérien et routier) sont semblables aux effets pour le bruit total [192]. Le bruit a également un effet sur le tonus parasympathique cardiaque. En effet, une étude néerlandaise a montré que, suite à l'exposition au bruit de la circulation (routière et ferroviaire), le tonus parasympathique diminue [193]. Or, au cours d'un sommeil normal, l'activité du système nerveux végétatif diffère de l'état de veille avec une augmentation globale de l'activité parasympathique et une diminution de l'activité sympathique [194].

2.7. Prise de médicaments pour dormir

Les études évaluant les effets de l'exposition au bruit des transports sur la prise de médicaments pour dormir ont été réalisées uniquement sur le terrain.

2.7.1. Étude in situ

2.7.1.1. Bruit routier

Les résultats des études in situ concernant la prise de médicaments pour dormir en lien avec l'exposition au bruit routier sont contrastés. Une étude a montré que les habitants des rues fortement exposées ($L_{eq} > 45$ dBA) consomment plus de médicaments pour dormir que les habitants des rues moins exposées ($L_{eq} \leq 45$ dBA) [88]. Une autre étude n'a pas trouvé de

⁷ L'endothélium joue un rôle important dans la régulation du tonus vasculaire et du contrôle de l'hémostase ainsi que dans la pathogenèse de l'athérosclérose. Il s'agit d'une couche de cellule tapissant la surface interne des vaisseaux sanguins.

différence significative de la prise de médicaments pour dormir des habitants vivant dans les zones bruyantes (>65 dBA) par rapport à ceux vivant dans les zones calmes (< 55dBA) [84].

2.7.1.2. Bruit des avions

Le lien entre l'exposition au bruit des avions et la prise de médicaments pour dormir est bien établi [89], [175]. Autour de l'aéroport d'Amsterdam Schiphol, Franssen *et al.* [121] ont montré que le niveau de pression acoustique continu équivalent entre 22 h et 23 h est fortement associé à la prise de médicaments pour le sommeil ou sédatifs non-prescrits. Au voisinage du même aéroport, Passchier-Vermeer *et al.* ont trouvé que la probabilité d'utilisation de somnifères augmente significativement avec le niveau sonore équivalent du bruit des avions, particulièrement chez les personnes âgées [160]. Dans l'étude HYENA qui regroupe six grands aéroports européens (Royaume-Uni, Allemagne, Pays-Bas, Suède, Italie et Grèce), Floud *et al.* ont observé une augmentation significative de la consommation d'anxiolytiques en relation avec l'exposition au bruit des avions dans tous les pays [195]. Si les anxiolytiques sont utilisés contre l'anxiété, ils peuvent aussi être prescrits pour des troubles du sommeil, donc peuvent également être considérés comme des marqueurs des troubles du sommeil. En revanche, aucune association n'a été trouvée pour les hypnotiques [195]. Autour d'un aérodrome militaire, Kim *et al.* ont trouvé que les individus exposés, même faiblement, au bruit des avions consomment significativement plus de médicaments pour dormir que les individus non exposés [161]. En France, autour de l'aéroport de Roissy, Lainey *et al.* ont observé davantage de personnes qui prennent des médicaments pour dormir dans les zones exposées que dans les zones non exposées [124]. Cette différence est cependant non significative.

2.7.1.3. Bruit ferroviaire

Lercher *et al.* ont trouvé une association significative entre l'exposition au bruit ferroviaire et la prise de médicaments pour dormir [184].

2.8. La qualité du sommeil subjective

2.8.1. Études en laboratoire

2.8.1.1. Bruit routier

Une diminution de l'auto-estimation de la qualité du sommeil est observée après exposition au bruit routier. Hajak *et al.* ont trouvé qu'aux lendemains des nuits bruyantes, la qualité du

sommeil est mal notée par rapport aux nuits silencieuses [167]. Outre le niveau de bruit, le nombre d'événements de bruit a également une influence sur l'auto-estimation de la qualité du sommeil [142]. À 60 dB(A), une diminution significative de la qualité du sommeil a été observée à partir de 16 événements de bruit par nuit alors qu'à 50 dB(A), elle a été observée à partir de 64 événements [108]. Öhrström *et al.* [185] ont identifié les facteurs importants concernant l'évaluation de la qualité subjective du sommeil. En premier lieu, il s'agit du nombre d'événements de bruit au cours de la nuit (avec 26% de variance expliquée), et en second lieu, de la sensibilité de l'individu face au bruit [185]. Dans deux expérimentations, Öhrström *et al.* ont trouvé qu'après les nuits bruyantes, la qualité subjective du sommeil diminue de 12% chez les individus non-sensibles au bruit, et de 25% chez les individus sensibles au bruit [142][185].

2.8.1.2. Bruit aérien

En laboratoire, une étude a évalué la qualité subjective du sommeil de 16 femmes et 16 hommes avec un questionnaire au réveil le matin. Les auteurs ont trouvé que la qualité du sommeil est jugée très mauvaise après exposition au bruit des avions [155].

2.8.1.3. Bruit ferroviaire

La qualité du sommeil est également affectée par l'exposition au bruit ferroviaire. Saremi *et al.* [153] ont trouvé que la qualité du sommeil est jugée meilleure pour la nuit de contrôle ($LA_{eq} = 35$ dBA) que pour les nuits moyennement exposées ($LA_{eq} = 40$ dBA), et que pour les nuits fortement exposées ($LA_{eq} = 50$ dBA)[153]. Avec des niveaux d'exposition de 40 et 44 dB(A), Marks et Griefahn ont eux aussi trouvé une diminution de la qualité du sommeil [180]. À 50 dB(A), la qualité du sommeil diminue fortement [180].

2.8.1.4. Combinaison des bruits des différents modes de transport

L'auto-estimation de la qualité du sommeil diminue après exposition à la combinaison des bruits des trois modes de transport (routier, aérien et ferroviaire). Griefahn *et al.* [155] et Marks et Griefahn [68] ont montré que la qualité du sommeil est jugée mauvaise aux lendemains des nuits bruyantes par rapport aux nuits silencieuses. L'auto-estimation de la qualité du sommeil diminue avec le niveau d'exposition au bruit des transports. Plus le niveau d'exposition au bruit augmente, plus la qualité du sommeil est jugée mauvaise [155].

2.8.2. Études in situ

2.8.2.1. Bruit routier

Les études in situ vont dans le même sens que les études en laboratoire. Les résidents des rues (ou zones) bruyantes ou fortement exposées déclarent toujours une mauvaise qualité du sommeil par rapport aux rues (ou zones) calmes et ce quels que soient les niveaux de bruit considérés [159] [108] [84][88]. Öhrström et Skanberg ont évalué la qualité du sommeil avant et après réduction du trafic routier la nuit dans une zone exposée et dans une zone de contrôle [95]. Après réduction du trafic routier la nuit, les auteurs ont observé une amélioration de la qualité du sommeil dans la zone exposée, plus particulièrement chez les 43 ans et plus. Dans la zone de contrôle, la qualité du sommeil n'a pas changé avant et après la réduction du trafic [95].

2.8.2.2. Bruit aérien

Les conclusions des études évaluant les effets de l'exposition au bruit des avions sur l'auto-estimation de la qualité du sommeil sont partagées. La plupart des études ont trouvé une relation significative entre l'exposition au bruit des avions et la qualité du sommeil. Janssen *et al.* ont trouvé que la qualité du sommeil auto-déclarée de 418 sujets vivant au voisinage de l'aéroport d'Amsterdam Schiphol diminue significativement lorsque le niveau d'exposition augmente [182]. En revanche, ils n'ont pas observé d'association avec le nombre d'événements de bruit d'avions du fait d'un faible nombre moyen d'événements de bruit par nuit dans les zones de l'étude. En France, une étude à proximité de l'aéroport de Roissy a montré une association significative entre l'exposition au bruit des avions et la qualité du sommeil [124] : les sujets vivant dans les zones exposées au bruit des avions déclarent une plus mauvaise qualité de sommeil que les sujets non exposés au bruit. Kim *et al.* ont également montré que l'augmentation du niveau de bruit des avions autour d'un aérodrome militaire détériore la qualité du sommeil [161]. D'autres études n'ont pas trouvé d'associations significatives entre l'exposition au bruit des avions et la qualité du sommeil [160].

2.8.2.3. Bruit ferroviaire

Elmenhorst *et al.* n'ont pas trouvé de relation significative entre la qualité du sommeil subjective et l'exposition au bruit ferroviaire la nuit chez des résidents le long des chemins de fer de Cologne en Allemagne [77]. Ce résultat peut être expliqué par les faibles niveaux d'exposition (médiane de 37dB(A) pour le LA_{eq} et 49 dB(A) pour LA_{max}).

2.9. Sentiment de fatigue le matin

2.9.1. Études en laboratoire

L'exposition au bruit la nuit induit à un sentiment de fatigue au réveil le matin.

2.9.1.1. Bruit routier

Skanberg et Öhrström ont trouvé que les sujets sont plus fatigués le matin après une exposition au bruit du trafic routier d'un niveau LA_{eq} de 33 dBA, qu'aux lendemains des nuits sans exposition (25 dBA) [150]. Plus le niveau de bruit augmente, plus le sentiment de fatigue est important. Les sujets sont significativement plus fatigués le matin après une exposition au bruit de 72 dBA, qu'aux lendemains des nuits avec un niveau d'exposition de 56 dBA [108]. D'autres études vont également dans ce sens [169].

2.9.1.2. Bruit aérien

Aucune étude en laboratoire ne s'est intéressée au bruit aérien.

2.9.1.3. Bruit ferroviaire

Marks et Griefahn ont montré que les sujets sont significativement plus fatigués les matins des nuits bruyantes qu'aux lendemains des nuits calmes [180].

2.9.1.4. Combinaison des bruits des différents modes de transport

Avec la combinaison des bruits des trois modes de transport (route, rail et avion), Griefahn *et al.* [155] ont trouvé que les sujets sont plus fatigués le lendemain des nuits bruyantes, sans distinction du mode de transport et du niveau de bruit, par rapport aux nuits calmes. Marks et Griefahn ont eux aussi trouvé que les lendemains des nuits avec exposition au bruit du trafic routier, ferroviaire et aérien, les sujets sont plus fatigués au réveil qu'aux lendemains des nuits sans exposition [68].

2.9.2. Études in situ

Comme dans les études en laboratoire, dans les études in situ, les sujets exposés au bruit la nuit se sentent fatigués au réveil le matin.

2.9.2.1. Bruit routier

Jakovljevic *et al.* ont trouvé que les habitants vivant dans les zones bruyantes (>65 dBA) de Belgrade déclarent être plus fatigués le matin que les habitants vivant dans les zones calmes (< 55dBA) [84]. Un habitant des zones bruyantes a 2,9 fois plus de risque d'être fatigué le matin qu'un habitant des zones calmes [84]. Les résultats de l'étude d'Öhrström *et al.* [108] vont aussi dans ce sens. Dans une autre étude, Öhrström et Skanberg ont trouvé que avant réduction du trafic routier, les habitants de la zone exposée se sentent plus fatigués le matin que ceux de la zone de contrôle [95]. Après réduction du trafic routier, les participants se sentent moins fatigués le matin qu'avant la réduction du trafic. Dans une étude de cohorte de la population néerlandaise, de Kluizenaar *et al.* ont trouvé que le sentiment de fatigue au réveil augmente significativement avec le niveau de bruit routier la nuit [196].

2.9.2.2. Bruit aérien

Autour de l'aéroport d'Amsterdam Schiphol, Franssen *et al.* ont trouvé que l'exposition au bruit des avions est significativement associée au sentiment de fatigue le matin avec un OR de 1,20 (IC à 95% = 1,03 to 1,41) [121].

3. Habituation au bruit

Dans la littérature, les études s'intéressant à l'accoutumance des paramètres du sommeil face au bruit ne concernent que le bruit routier. Si les études en laboratoire ou in situ ont montré une habituation des paramètres subjectifs du sommeil au bruit, aucune accoutumance n'a été en revanche observée pour les paramètres objectifs.

3.1. Études en laboratoire

3.1.1. Les paramètres objectifs

Dans une expérimentation d'une durée de deux semaines menée en laboratoire, Öhrström *et al.* [108] n'ont pas trouvé d'accoutumance des paramètres objectifs (les mouvements du corps et le rythme cardiaque) au bruit : les réactions sont aussi prononcées à la fin de la période d'exposition au bruit routier qu'au début de la période. Xin *et al.* [176] n'ont pas non plus trouvé d'accoutumance au bruit routier pour les paramètres polysomnographiques, avec des variations individuelles considérables. Kuroiwa *et al.* [146] ont étudié l'habituation du sommeil au bruit de la circulation routière auprès de neuf individus ayant dormi en laboratoire pendant 17 nuits

et ayant été exposés à un niveau équivalent de 49,5 dB(A). Les résultats de cette expérience ont montré qu'aucune accoutumance n'est observée pour les paramètres issus de l'enregistrement polysomnographique.

3.1.2. Les paramètres subjectifs

Après 17 nuits d'expérimentation en laboratoire, Kuroiwa *et al.* ont trouvé une habitude à l'exposition au bruit de l'ensemble des paramètres subjectifs du sommeil issus du questionnaire [146]. Xin *et al.* [176] ont également montré une accoutumance au bruit des paramètres subjectifs (initiation au sommeil, maintien du sommeil, somnolence, sensation de sommeil respecté inquiétude) malgré une détérioration de ces paramètres au début de l'exposition au bruit routier [176].

3.2. Études in situ

Une étude s'est intéressée aux effets du bruit de la circulation routière sur le sommeil en réalisant des enregistrements EEG, EOG et EMG auprès de sept sujets à leur domicile [158]. Les résultats ont montré une influence de l'exposition au bruit de la circulation sur le rythme du sommeil, caractérisé par une modification de la structure interne du sommeil, mais aucune habitude complète, même après au moins un an d'exposition [158].

4. Comparaison des effets du bruit routier, ferroviaire et aérien

De nombreuses études ont comparé les effets du bruit des différents modes de transport sur la qualité du sommeil. L'objectif est de savoir s'il existe une différence entre les effets du bruit de chaque mode de transport sur le sommeil et de classer les transports en fonction de leurs effets sur le sommeil. Ces études montrent que les bruits des différents modes de transport n'affectent pas le sommeil de la même façon. Le bruit ferroviaire est celui qui affecte le plus fortement les mesures physiologiques réalisées par polysomnographie, le bruit aérien ayant des effets plus importants sur la qualité subjective du sommeil. Les caractéristiques physiques du bruit de ces différents modes de transport, comme le temps d'élévation du niveau de pression acoustique et les composants d'un événement de bruit avec une fréquence élevée (> 3 kHz), peuvent expliquer cette différence d'effets sur le sommeil [77][82]. La composition spectrale et temporelle spécifique des événements de bruit peut également expliquer ces différences [82].

4.1. Comparaison des effets du bruit des transports sur les paramètres objectifs du sommeil

4.1.1. Études en laboratoire

La majorité des études place le bruit de la circulation ferroviaire comme la source de bruit qui affecte le plus fortement les paramètres objectifs du sommeil. Marks *et al.* ont trouvé que les mesures polysomnographiques d'individus exposés aux trois sources de bruit sont davantage modifiées par l'exposition au bruit ferroviaire que par l'exposition au bruit routier et au bruit aérien [163]. Dans une autre expérimentation, les paramètres physiologiques mesurés par la polysomnographie tels que la latence et le temps total passé dans le sommeil profond sont affectés plus fortement par l'exposition au bruit ferroviaire que par celle au bruit aérien ou au bruit routier [155].

Hofman *et al.* ont montré que le sommeil profond, le sommeil paradoxal et le temps de sommeil total sont touchés de la même façon par les trois sources du bruit (avion, train et camion) [197]. Mais pour un même niveau de bruit maximal (65 dBA), le bruit ferroviaire provoque davantage d'éveils que le bruit des avions et celui des camions [197]. Basner *et al.* ont quant à eux montré que l'exposition au bruit de la circulation routière entraîne les changements les plus importants dans la structure et dans la continuité du sommeil [82].

4.1.2. Études in situ

Elmenhorst *et al.* ont montré que l'exposition au bruit ferroviaire la nuit conduit à des probabilités d'éveils significativement plus élevées que l'exposition au bruit des avions [77]. Par ailleurs, l'exposition au bruit des trains de marchandises a davantage d'effets sur la probabilité d'éveils que l'exposition au bruit des trains de voyageurs [77]. Vernet *et al.* ont démontré que pour un même niveau de bruit équivalent, l'exposition au bruit du trafic routier induit un plus grand nombre total d'interruptions du sommeil (changement de stades, éveils nocturnes) que le bruit ferroviaire, probablement en raison d'un nombre plus élevé d'événements de bruit routier [198].

Aasvang *et al.* n'ont pas trouvé de différence majeure sur les paramètres polysomnographiques pendant toute la nuit pour les effets de l'exposition au bruit du trafic routier et ceux de l'exposition au bruit ferroviaire, sauf lors du sommeil paradoxal [171]. En effet, le niveau maximal du bruit ferroviaire a un effet négatif sur le sommeil paradoxal, alors que les effets du

bruit du trafic routier sont négligeables. Le sommeil paradoxal est significativement plus court dans le groupe d'exposition au bruit ferroviaire [171]. Graham *et al.* n'ont pas montré de différence significative des réponses du système nerveux automatique pendant le sommeil pour l'exposition au bruit du trafic routier et l'exposition au bruit des chemins de fer [193].

4.2. Comparaison des effets du bruit des transports sur les paramètres subjectifs du sommeil

4.2.1. Études en laboratoire

Basner *et al.* ont montré que les évaluations subjectives du sommeil sont plus mauvaises aux lendemains des nuits exposées au bruit des avions et au bruit du trafic ferroviaire [82]. Griefahn *et al.* ont quant à eux trouvé que l'exposition au bruit aérien, ferroviaire et routier ont des effets similaires sur le sommeil évalué de manière subjective [155].

4.2.2. Études in situ

Dans une méta-analyse réalisée par Miedema et Vos [199] sur l'association entre l'exposition au bruit des transports et la qualité du sommeil auto-déclarée, les auteurs ont trouvé que pour un même niveau moyen d'exposition au bruit la nuit, l'exposition au bruit des avions est associée à davantage de troubles de sommeil auto-déclarés que l'exposition au bruit du trafic routier, et que l'exposition au bruit du trafic routier est à son tour associée à davantage de troubles du sommeil que l'exposition au bruit des chemins de fer [199]. Hong *et al.* ont eux montré que l'exposition au bruit des chemins de fer affecte davantage le sommeil subjectif que l'exposition au bruit du trafic routier [200].

5. Bruit intermittent vs bruit continu

D'après la littérature, les différents types de bruit n'ont pas les mêmes effets sur le sommeil. Si le bruit intermittent et le bruit continu altèrent tous les deux la qualité objective et la qualité subjective du sommeil, les effets du bruit intermittent semblent plus importants.

Dans deux expérimentations réalisées en laboratoire, Öhrström et Rylander ont trouvé en que le bruit intermittent a un effet délétère bien plus important sur la qualité du sommeil que le bruit continu [169]. Ils ont montré une relation dose-réponse entre l'exposition au bruit intermittent et la qualité subjective du sommeil : plus le niveau de bruit est élevé, plus la qualité du sommeil

est mauvaise. Ils ont également mis en évidence une relation dose-réponse pour les mouvements du corps immédiatement après les pics de bruit pendant les nuits exposées à un bruit intermittent [169]. Quant au bruit continu, il n'influence pas la distribution des mouvements du corps au cours du temps [169]. Eberhardt *et al.* [201] ont comparé les effets du bruit continu et ceux du bruit intermittent sur le sommeil de neuf jeunes garçons âgés de 20 à 26 ans en laboratoire. Le sommeil a été enregistré par polysomnographie, et les mouvements du corps, la qualité subjective du sommeil et l'humeur ont été mesurés chaque nuit. Les auteurs ont constaté que le bruit intermittent à un niveau de 45 dB(A) (LA_{max}), correspondant à un LA_{eq} de 29 dB(A), est suffisant pour produire un changement de stade du sommeil ainsi que des déficits du sommeil profond, alors que le niveau de bruit continu équivalent (LA_{eq}) nécessaire pour affecter la qualité du sommeil et de l'humeur est de 45 dB(A) [201].

Thiessen a également constaté en laboratoire que le bruit intermittent des camions trouble davantage la qualité objective du sommeil que le bruit continu [202]. Toutefois, le bruit continu détériore de façon plus importante le sommeil profond que le bruit intermittent. Cette dernière affirmation a été contredite par deux autres études. En effet, Passchier-Vermeer *et al.* ont montré in situ que l'interruption du sommeil profond est plus sensible aux intrusions du bruit intermittent alors que l'interruption du sommeil paradoxal est plus susceptible de se produire en présence d'un bruit continu [160]. Eberhardt *et al.* confirment cela, puisqu'ils ont trouvé que le bruit continu perturbe seulement le sommeil paradoxal et que le bruit intermittent influence principalement la quantité du sommeil profond [201].

6. Indicateurs énergétiques vs indicateurs événementiels

La plupart des études en laboratoire et in situ évaluant les effets de l'exposition au bruit des transports sur le sommeil ont utilisés des indicateurs acoustiques énergétiques, notamment le *Lnight* qui correspond au niveau de bruit continu équivalent la nuit (entre 22h et 6h). D'autres études, notamment en laboratoire et in situ, ont utilisé le niveau de bruit continu équivalent (LA_{eq}) pendant la période de sommeil ou des indicateurs événementiels comme le LA_{max} ou le nombre d'événements de bruit.

Des associations ont été mises en évidence entre les indicateurs énergétiques tels que le LA_{eq} et le *Lnight*, et les perturbations du sommeil auto-déclarées, la motilité moyenne pendant la période de sommeil [203] et le nombre d'éveils mesurés [204]. Concernant les effets instantanés et à court terme sur le sommeil, comme le début de motilité, les éveils, les réponses

cardiovasculaires et les changements de stade de sommeil, ce sont les indicateurs événementiels tels que le L_{Amax} ou le niveau d'exposition acoustique (SEL) qui semblent y être le plus souvent associés [89]. Griefahn *et al.* ont montré que les indicateurs énergétiques comme le L_{Aeq} semblent être des prédicteurs appropriés pour la qualité du sommeil évaluée subjectivement mais pas pour la qualité du sommeil évaluée objectivement [155].

L'utilisation des indicateurs énergétiques est préconisée par la Directive Européenne de 2002 [46] relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement alors qu'actuellement et selon les recommandations de l'OMS [89], pour l'étude des effets du bruit sur le sommeil, il est plutôt recommandé d'utiliser les indicateurs événementiels car ils pourraient mieux caractériser les bruits des avions [205]. Il a en effet été montré que certains paramètres du sommeil dépendent du nombre [204], du caractère et de la distribution [183] des événements de bruit pendant la nuit.

7. Différences entre études en laboratoire et études in situ

Les études concernant les effets du bruit des transports sur le sommeil ont été réalisées soit en laboratoire soit in situ. Les perturbations observées sur le terrain sont en règle générale d'une amplitude bien moindre que celles mesurées lors d'études expérimentales en laboratoire [206]. Cette différence s'explique tout d'abord par le fait que, in situ, les sujets sont dans un environnement familier et dorment dans leur propre lit. Elle s'explique ensuite par la diversité des techniques utilisées pour mesurer les perturbations du sommeil ainsi que les différences entre les niveaux de bruit étudiés en laboratoire et sur le terrain (à l'extérieur ou à l'intérieur). La plupart des études sur le terrain n'ont pas de contrôle ou de connaissances des niveaux d'exposition au bruit, à l'inverse des études en laboratoire [87]. Le sommeil est souvent évalué sur le terrain par des questionnaires, parfois complétés par des mesures actimétriques. Très peu d'études in situ concernant les effets du bruit des transports sur le sommeil ont été effectuées en utilisant des mesures polysomnographiques. En revanche, cette technique est la référence dans les études de laboratoire.

Dans une méta-analyse regroupant des données de 25 années de recherche en laboratoire et sur le terrain des effets du bruit sur le sommeil, Pearsons *et al.* [203] ont constaté certaines différences importantes entre les études en laboratoire et sur le terrain. En laboratoire, une réactivité plus élevée a été observée pour une exposition au bruit croissante par rapport aux études menées sur le terrain. Les éveils nocturnes sont beaucoup plus nombreux dans les études

en laboratoire que sur le terrain. Basner *et al.* [177] ont également trouvé que les réactions basées sur des mesures polysomnographiques sont beaucoup moins fréquentes in situ qu'en laboratoire.

Lorsque des outils de mesure similaires sont utilisés, les études en laboratoire et in situ montrent des effets du bruit sur le sommeil similaires [94][150]. Skanberg et Öhrström suggèrent que les expériences en laboratoire n'exagèrent pas les effets du bruit de la circulation routière sur le sommeil, à condition que le sommeil soit étudié avec les mêmes méthodes et qu'un environnement familial soit recréé dans le laboratoire [150]. Öhrström *et al.* [108] ont comparé le sommeil de personnes sensibles au bruit à la maison et en laboratoire. Aucune différence n'a été trouvée entre les deux environnements. Les mêmes résultats sont obtenus pour les personnes non sensibles au bruit. Hume et Whitehead ont en revanche trouvé des différences [207]. Ils ont observé que la probabilité d'éveil est moins élevée à domicile qu'en laboratoire [207]. Les réactions d'éveils sont également moins fréquemment rapportées dans les études sur le terrain [208]. En revanche, la difficulté d'endormissement est la même dans les deux environnements [208].

8. Conclusion

Cette revue de la littérature permet de conclure que l'exposition au bruit des transports, et plus particulièrement celle au bruit des avions, perturbe le sommeil. Les perturbations du sommeil dues au bruit constituent l'une des causes de plaintes les plus courantes et ces effets sont les plus documentés avec la gêne [209], [210]. De nombreuses études en laboratoire ou in situ mettent en évidence une relation entre l'exposition au bruit des avions et les troubles du sommeil [81], [152], [177]. Selon l'OMS, ces troubles constituent la plus sérieuse conséquence du bruit des transports en Europe occidentale [99]. Ils seraient à l'origine de 903 000 années de vie en bonne santé perdues en Europe [46], soit le premier effet en nombre d'années de vie en bonne santé perdues devant la gêne et les autres troubles [4].

L'exposition au bruit des avions perturbe à la fois la qualité objective et la qualité subjective du sommeil. Elle provoque des difficultés d'endormissement, des éveils intermittents et prématurés, le raccourcissement de certains stades de sommeil et une dégradation de la qualité du sommeil par des changements de stade, des mouvements du corps, des changements de posture et des réponses du système nerveux autonome. Elle peut également augmenter le temps d'éveil intra-sommeil, au détriment du sommeil profond et/ou du sommeil paradoxal, et ainsi

diminuer le temps de sommeil total. Sur le plan subjectif, l'exposition au bruit des avions peut provoquer une diminution de l'auto-estimation de la qualité du sommeil, de l'humeur et de la performance, ainsi qu'une augmentation de la prise de médicaments pour dormir.

Les niveaux de bruit à partir desquels les troubles du sommeil apparaissent ainsi que l'importance de ces derniers dépendent des caractéristiques acoustiques et personnelles, ainsi que des conditions environnementales. Les valeurs-limites d'exposition dans la chambre à coucher fixées par l'OMS sont de, en termes de niveau maximum ou L_{Amax} , 35 dB(A) pour la perturbation des phases de sommeil et 42 dB(A) pour les éveils.

Si une habitude a été montrée pour le sommeil subjectif, aucune accoutumance au bruit n'est en revanche observée pour les paramètres objectifs du sommeil. Aussi, de nombreuses lacunes existent encore sur les effets du bruit des avions sur la qualité du sommeil, notamment sur le temps d'endormissement et le temps de sommeil total. Les études jugées comme étant de bonne qualité dans la littérature, ont été réalisées en laboratoire, chez des jeunes en bonne santé. Or, des études sur le terrain incluant l'ensemble des populations exposées au bruit des avions sont nécessaires pour mieux caractériser les effets de l'exposition au bruit des avions sur la qualité du sommeil.

IV. Objectifs spécifiques de la thèse

Les effets de l'exposition au bruit des avions ont été démontrés à travers plusieurs études en laboratoire et in situ au voisinage des aéroports dans le monde et plus particulièrement en Europe. En France, ces effets ont été moins souvent évalués et les études ne s'intéressent presque exclusivement qu'à la qualité subjective du sommeil. Or, comme nous l'avons dit précédemment, une accoutumance au bruit peut être observée pour les paramètres subjectifs mais pas pour les paramètres objectifs.

Dans ce contexte, notre travail de thèse vise à mieux connaître et à mieux quantifier les effets du bruit des avions sur la qualité objective et sur la qualité subjective du sommeil des riverains des aéroports en France. Les objectifs spécifiques de la thèse sont de :

- rechercher l'existence d'une association entre l'exposition au bruit des avions et la qualité subjective du sommeil caractérisée par différents paramètres rapportés par les individus dans des questionnaires adaptés : temps d'endormissement, éveils nocturnes, durée du sommeil, satisfaction de la qualité du sommeil, sentiment de repos au réveil le matin et prise de médicament pour dormir.
- caractériser de manière détaillée et spécifique les effets du bruit des avions sur les paramètres objectifs du sommeil mesurés par le biais d'un actimètre et d'un Actiheart (enregistreur du rythme cardiaque) : temps d'endormissement, durée et nombre d'éveils intra-sommeil, temps passé au lit, temps total de sommeil, efficacité du sommeil, indice de fragmentation et fréquence cardiaque ; tout en affinant la mesure de l'exposition au bruit par la prise en compte d'indicateurs non seulement énergétiques mais aussi événementiels.

V. Références

- [1] ‘Les français et les nuisances sonores’, Enquête TNS-SOFRES, May 2010.
- [2] Commissariat général au développement durable, ‘Opinions et pratiques environnementales des Français en 2014’, p. 9, 2015.
- [3] ‘Enquête INSV/MGEN “Sommeil et environnement”’, *Institut National du Sommeil et de la Vigilance*, 2013. [Online]. Available: <http://www.institut-sommeil-vigilance.org/la-journee-du-sommeil>. [Accessed: 30-Jun-2016].
- [4] WHO, *Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe*. Copenhagen: World Health Organization, Regional Office for Europe, 2011.
- [5] G. Dr Pérémarty, ‘Sommeil et médecine générale’. [Online]. Available: <http://sommeil-mg.net/spip/spip.php?rubrique1>. [Accessed: 12-Oct-2017].
- [6] D. Leger, V. Stal, C. Guilleminault, T. Raffray, M. Dib, and M. Paillard, ‘Les conséquences diurnes de l’insomnie: impact sur la qualité de vie’, *Rev. Neurol. (Paris)*, vol. 157, no. 10, pp. 1270–1278, 2001.
- [7] L. Ricroch, ‘En 25 ans, le temps passé à dormir la nuit a diminué de 18 minutes’, Insee, 2012.
- [8] ‘Les Français et leur sommeil’, Inpes, Mar. 2008.
- [9] ‘TOUT SAVOIR SUR LE SOMMEIL’, *Institut National du Sommeil et de la Vigilance*. [Online]. Available: <http://www.institut-sommeil-vigilance.org/tout-savoir-sur-le-sommeil>. [Accessed: 16-Sep-2016].
- [10] F. Beck, J.-B. Richard, and D. Leger, ‘Prévalence et facteurs sociodémographiques associés à l’insomnie et au temps de sommeil en France (15-85 ans)’, *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, no. 44–45, pp. 497–501, 20-Nov-2012.
- [11] ‘Collège des enseignants en Neurologie - Troubles du sommeil de l’enfant et de l’adulte’. [Online]. Available: <http://www.cen-neurologie.fr/2eme-cycle/Items%20inscrits%20dans%20les%20modules%20transversaux/Troubles%20du%20sommeil%20de%20l'enfant%20et%20de%20l'adulte/index.phtml>. [Accessed: 05-Jul-2016].
- [12] ‘Enquête INSV/MGEN “La somnolence au quotidien”’, *Institut National du Sommeil et de la Vigilance*, 2011. [Online]. Available: <http://www.institut-sommeil-vigilance.org/wp-content/uploads/2012/06/Enquete-2011-Somnolence.ppt>. [Accessed: 01-Jul-2016].
- [13] P. PHILIP and P. SAGASPE, ‘Sommeil et accidents’, *Bull. Académie Natl. Médecine*, vol. 195, no. 7, pp. 1635–1643, 2011.

- [14] C. Fuhrman, X.-L. Nguyễn, B. Fleury, M. Boussac-Zarebska, C. Druet, and M.-C. Delmas, ‘Le syndrome d’apnées du sommeil en France : un syndrome fréquent et sous-diagnostiqué’, *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, no. 44–45, pp. 510–514, 20-Nov-2012.
- [15] B. Corman and D. Leger, ‘Troubles du sommeil chez le sujet âgé’, *Rev. Prat.*, vol. 54, no. 12, pp. 1281–1285, 2004.
- [16] M. M. Ohayon, ‘Prévalence et comorbidité des troubles du sommeil dans la population générale’, *Rev. Prat.*, vol. 57, no. 14, pp. 1521–1528, 2007.
- [17] C. Marasinghe, ‘Sleep disorders in elderly’, *J. Ceylon Coll. Physicians*, vol. 43, no. 1–2, 2014.
- [18] F. Beck, L. March, R. Guignard, C. Cavalin, F. Maillochon, and D. Léger, ‘Les facteurs associés aux troubles du sommeil : l’apport de l’enquête EVS’, *Santé Homme*, no. N°407, pp. 8–11, Jun. 2010.
- [19] D. Leger, C. Guilleminault, J. P. Dreyfus, C. Delahaye, and M. Paillard, ‘Prevalence of insomnia in a survey of 12 778 adults in France’, *J. Sleep Res.*, vol. 9, no. 1, pp. 35–42, Mar. 2000.
- [20] M. D. Stein and P. D. Friedmann, ‘Disturbed Sleep and Its Relationship to Alcohol Use’, *Subst. Abuse Off. Publ. Assoc. Med. Educ. Res. Subst. Abuse*, vol. 26, no. 1, pp. 1–13, Mar. 2005.
- [21] C. Sabanayagam and A. Shankar, ‘The association between active smoking, smokeless tobacco, second-hand smoke exposure and insufficient sleep’, *Sleep Med.*, vol. 12, no. 1, pp. 7–11, Jan. 2011.
- [22] L. Shilo *et al.*, ‘The effects of coffee consumption on sleep and melatonin secretion’, *Sleep Med.*, vol. 3, no. 3, pp. 271–273, May 2002.
- [23] T. Schierenbeck, D. Riemann, M. Berger, and M. Hornyak, ‘Effect of illicit recreational drugs upon sleep: Cocaine, ecstasy and marijuana’, *Sleep Med. Rev.*, vol. 12, no. 5, pp. 381–389, Oct. 2008.
- [24] C. H. Bastien, A. Vallieres, and C. M. Morin, ‘Precipitating Factors of Insomnia’, *Behav. Sleep. Med.*, vol. 2, no. 1, pp. 50–62, Feb. 2004.
- [25] S. E. Healey, A. Kales, L. J. Monroe, E. O. Bixler, K. Chamberlin, and C. R. Soldatos, ‘Onset of Insomnia: Role of Life-Stress Events¹.’, *Psychosom. Med.*, vol. 43, no. 5, pp. 439–451, 1981.
- [26] M. M. Ohayon, ‘Epidemiology of insomnia: what we know and what we still need to learn’, *Sleep Med. Rev.*, vol. 6, no. 2, pp. 97–111, May 2002.

- [27] F. P. Cappuccio, L. D'Elia, P. Strazzullo, and M. A. Miller, 'Sleep Duration and All-Cause Mortality: A Systematic Review and Meta-Analysis of Prospective Studies', *Sleep*, vol. 33, no. 5, pp. 585–592, May 2010.
- [28] L. M. Kurina, M. K. McClintock, J.-H. Chen, L. J. Waite, R. A. Thisted, and D. S. Lauderdale, 'Sleep duration and all-cause mortality: a critical review of measurement and associations', *Ann. Epidemiol.*, vol. 23, no. 6, pp. 361–370, Jun. 2013.
- [29] F. P. Cappuccio *et al.*, 'Meta-analysis of short sleep duration and obesity in children and adults', *SLEEP-N. Y. THEN Westchest.*, vol. 31, no. 5, p. 619, 2008.
- [30] Ford DE and Kamerow DB, 'Epidemiologic study of sleep disturbances and psychiatric disorders: An opportunity for prevention?', *JAMA*, vol. 262, no. 11, pp. 1479–1484, Sep. 1989.
- [31] R. M. Benca, W. H. Obemeyer, R. A. Thisted, and J. C. Gillin, 'Sleep and Psychiatric Disorders', *Arch Gen Psychiatry*, vol. 49, pp. 651–668, 1992.
- [32] N. Breslau, T. Roth, L. Rosenthal, and P. Andreski, 'Sleep disturbance and psychiatric disorders: A longitudinal epidemiological study of young Adults', *Biol. Psychiatry*, vol. 39, no. 6, pp. 411–418, Mar. 1996.
- [33] M. M. Ohayon, C. M. Shapiro, and S. H. Kennedy, 'Differentiating DSM-IV Anxiety and Depressive Disorders in the General Population: Comorbidity and Treatment Consequences', *Can. J. Psychiatry*, vol. 45, no. 2, pp. 166–172, Mar. 2000.
- [34] F. Beck, C. Léon, S. Pin-Le Corre, and D. Léger, 'Troubles du sommeil : caractéristiques sociodémographiques et comorbidités anxiodépressives. Étude (Baromètre santé INPES) chez 14 734 adultes en France', *Rev. Neurol. (Paris)*, vol. 165, no. 11, pp. 933–942, Nov. 2009.
- [35] E. O. Bixler, A. Kales, C. R. Soldatos, J. D. Kales, and S. Healey, 'Prevalence of sleep disorders in the Los Angeles metropolitan area', *Am. J. Psychiatry*, vol. 136, no. 10, pp. 1257–1262, Oct. 1979.
- [36] D. J. Foley, A. Monjan, E. M. Simonsick, R. B. Wallace, and D. G. Blazer, 'Incidence and remission of insomnia among elderly adults: An epidemiologic study of 6,800 persons over three years', *Sleep J. Sleep Res. Sleep Med.*, vol. 22, no. Suppl 2, pp. S366–S372, 1999.
- [37] H. I. Andersson, G. Ejlerstson, I. Leden, and B. Scherstén, 'Impact of chronic pain on health care seeking, self care, and medication. Results from a population-based Swedish study.', *J. Epidemiol. Community Health*, vol. 53, no. 8, pp. 503–509, Jan. 1999.

- [38] J. Savard and C. M. Morin, 'Insomnia in the context of cancer: a review of a neglected problem', *J. Clin. Oncol.*, vol. 19, no. 3, pp. 895–908, 2001.
- [39] J. Savard, S. Simard, J. Blanchet, H. Ivers, and C. M. Morin, 'Prevalence, Clinical Characteristics, and Risk Factors for Insomnia in the Context of Breast Cancer', *Sleep*, vol. 24, no. 5, pp. 583–590, Aug. 2001.
- [40] A. Muzet, J.-P. Libert, and V. Candas, 'Ambient temperature and human sleep', *Experientia*, vol. 40, no. 5, pp. 425–429, May 1984.
- [41] E. H. Haskell, J. W. Palca, J. M. Walker, R. J. Berger, and H. C. Heller, 'The effects of high and low ambient temperatures on human sleep stages', *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, vol. 51, no. 5, pp. 494–501, May 1981.
- [42] W. Schmidt-Kessen and K. Kendel, 'The influence of room temperature on night-sleep in man', *Res. Exp. Med. (Berl.)*, vol. 160, no. 3, pp. 220–233.
- [43] Y. Cho, S.-H. Ryu, B. R. Lee, K. H. Kim, E. Lee, and J. Choi, 'Effects of artificial light at night on human health: A literature review of observational and experimental studies applied to exposure assessment', *Chronobiol. Int.*, vol. 32, no. 9, pp. 1294–1310, Oct. 2015.
- [44] A. Stickland, E. Clayton, R. Sankey, and C. M. Hill, 'A qualitative study of sleep quality in children and their resident parents when in hospital', *Arch. Dis. Child.*, vol. 101, no. 6, pp. 546–551, Jun. 2016.
- [45] T. Kubota *et al.*, 'Effects of nocturnal bright light on saliva melatonin, core body temperature and sleep propensity rhythms in human subjects', *Neurosci. Res.*, vol. 42, no. 2, pp. 115–122, Feb. 2002.
- [46] European Commission, 'EU Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise (END)', *The European parliament and the Council of the European Union*, 2002. [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0049&from=en>. [Accessed: 06-Apr-2017].
- [47] B. Arnaudo *et al.*, 'Les risques professionnels en 2010 : de fortes différences d'exposition selon les secteurs', *DARES ANALYSES*, no. 10, Feb-2013.
- [48] P. Canetto, 'Une nouvelle réglementation sur le bruit au travail', *INRS - Documents pour le Médecin du Travail*, no. 107, pp. 297–307, 2006.
- [49] European Environment Agency, *Noise in Europe 2014*. Luxembourg: Publications Office, 2014.
- [50] A. Muzet *et al.*, 'Évaluation des impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental', ANSES, Rapport d'expertise collective, Feb. 2013.

- [51] ‘Analyse bibliographique des travaux français et européens : Le coût social des pollutions sonores’, CNB - ADEME, May 2016.
- [52] WHO, ‘1.1 billion people at risk of hearing loss’, *WHO*, Feb-2015. [Online]. Available: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2015/ear-care/en/>. [Accessed: 21-Jul-2016].
- [53] C. Léon, F. David, and E. du Roscoät, ‘Écoute de musique amplifiée, analyse des comportements chez les 15-35 ans : résultats du Baromètre santé 2014’, *Bull Epidemiol Hebd*, no. 2–3, pp. 34–40, 2016.
- [54] ‘Les français et les nuisances sonores’, IFOP, Sep. 2014.
- [55] ‘Impacts sanitaires du bruit - Etat des lieux - Indicateurs bruit-santé’, Agence française de sécurité sanitaire environnementale (Afsse), Nov. 2004.
- [56] B. Vincent and V. Gissinger, ‘Les effets du bruit sur la santé’, *Acoucity*, May 2011.
- [57] C. Meyer-Bisch, ‘Hypoacousie due au bruit: la réglementation évolue’, *MS Médecine Sci.*, vol. 21, no. 12, pp. 1089–1095, 2005.
- [58] C.-H. Chouard, ‘Les nuisances sonores dans la ville’, *Comptes Rendus Académie Sci. - Ser. III - Sci. Vie*, vol. 324, no. 7, pp. 657–661, Jul. 2001.
- [59] M. Basner *et al.*, ‘ICBEN review of research on the biological effects of noise 2011-2014’, *Noise Health*, vol. 17, no. 75, pp. 57–82, Mar. 2015.
- [60] D. S. Dalton, K. J. Cruickshanks, T. L. Wiley, B. E. K. Klein, R. Klein, and T. S. Tweed, ‘Association of Leisure-Time Noise Exposure and Hearing Loss’, *Audiology*, vol. 40, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2001.
- [61] T. J. Chen, H. C. Chiang, and S. S. Chen, ‘Effects of aircraft noise on hearing and auditory pathway function of airport employees.’, *J. Occup. Med. Off. Publ. Ind. Med. Assoc.*, vol. 34, no. 6, pp. 613–619, Jun. 1992.
- [62] T.-J. Chen and S.-S. Chen, ‘Effects of aircraft noise on hearing and auditory pathway function of school-age children’, *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, vol. 65, no. 2, pp. 107–111, Sep. 1993.
- [63] T. J. Chen, S. S. Chen, P. Y. Hsieh, and H. C. Chiang, ‘Auditory effects of aircraft noise on people living near an airport’, *Arch. Environ. Health*, vol. 52, no. 1, pp. 45–50, Feb. 1997.
- [64] A. S. M. Barbosa and M. R. A. Cardoso, ‘Hearing loss among workers exposed to road traffic noise in the city of São Paulo in Brazil’, *Auris. Nasus. Larynx*, vol. 32, no. 1, pp. 17–21, Mar. 2005.
- [65] B. Berglund and C. Maschke, ‘Bruit et Santé’, Organisation Mondiale de la Santé, 2000.

- [66] B. Griefahn, K. Scheuch, G. Jansen, and M. Spreng, 'Protection goals for residents in the vicinity of civil airports', *Noise Health*, vol. 6, no. 24, pp. 51–62, Jul. 2004.
- [67] D. Ouis, 'ANNOYANCE FROM ROAD TRAFFIC NOISE: A REVIEW', *J. Environ. Psychol.*, vol. 21, no. 1, pp. 101–120, Mar. 2001.
- [68] A. Marks and B. Griefahn, 'Associations between noise sensitivity and sleep, subjectively evaluated sleep quality, annoyance, and performance after exposure to nocturnal traffic noise', *Noise Health*, vol. 9, no. 34, pp. 1–7, Jan. 2007.
- [69] R. Klæboe, A. H. Amundsen, A. Fyhri, and S. Solberg, 'Road traffic noise – the relationship between noise exposure and noise annoyance in Norway', *Appl. Acoust.*, vol. 65, no. 9, pp. 893–912, Sep. 2004.
- [70] A. Fyhri and R. Klæboe, 'Road traffic noise, sensitivity, annoyance and self-reported health—A structural equation model exercise', *Environ. Int.*, vol. 35, no. 1, pp. 91–97, Jan. 2009.
- [71] M. A. Martín, A. Tarrero, J. González, and M. Machimbarrena, 'Exposure–effect relationships between road traffic noise annoyance and noise cost valuations in Valladolid, Spain', *Appl. Acoust.*, vol. 67, no. 10, pp. 945–958, Oct. 2006.
- [72] H. Heritier *et al.*, 'The association between road traffic noise exposure, annoyance and health-related quality of life (HRQOL)', *Int J Env. Res Public Health*, vol. 11, no. 12, pp. 12652–67, Dec. 2014.
- [73] J. Bjork, J. Ardo, E. Stroh, H. Lovkvist, P. O. Ostergren, and M. Albin, 'Road traffic noise in southern Sweden and its relation to annoyance, disturbance of daily activities and health', *Scand J Work Env. Health*, vol. 32, no. 5, pp. 392–401, Oct. 2006.
- [74] M. Kim *et al.*, 'Road traffic noise: annoyance, sleep disturbance, and public health implications', *Am J Prev Med*, vol. 43, no. 4, pp. 353–60, Oct. 2012.
- [75] H. Meijer, P. Knipschild, and H. Salle, 'Road traffic noise annoyance in Amsterdam', *Int Arch Occup Env. Health*, vol. 56, no. 4, pp. 285–97, 1985.
- [76] G. Bluhm, E. Nordling, and N. Berglind, 'Road traffic noise and annoyance--an increasing environmental health problem', *Noise Health*, vol. 6, no. 24, pp. 43–9, Jul. 2004.
- [77] E. M. Elmenhorst *et al.*, 'Examining nocturnal railway noise and aircraft noise in the field: sleep, psychomotor performance, and annoyance', *Sci Total Env.*, vol. 424, pp. 48–56, May 2012.
- [78] C. Ménard, D. Girard, C. Leon, F. Beck, and others, *Baromètre santé environnement 2007*. Ed. Inpes, 2008.

- [79] M. Basner *et al.*, ‘The influence of nocturnal aircraft noise on humans-a new comprehensive approach.’, *FORTSCHRITTE Akust.*, vol. 28, pp. 316–317, 2002.
- [80] M. Basner and A. Samel, ‘Nocturnal aircraft noise effects’, *Noise Health*, vol. 6, no. 22, pp. 83–93, Jan. 2004.
- [81] M. Basner, A. Samel, and U. Isermann, ‘Aircraft noise effects on sleep: application of the results of a large polysomnographic field study’, *J Acoust Soc Am*, vol. 119, no. 5 Pt 1, pp. 2772–84, May 2006.
- [82] M. Basner, U. Muller, and E. M. Elmenhorst, ‘Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation’, *Sleep*, vol. 34, no. 1, pp. 11–23, Jan. 2011.
- [83] M. Brink, ‘Parameters of well-being and subjective health and their relationship with residential traffic noise exposure--a representative evaluation in Switzerland’, *Env. Int.*, vol. 37, no. 4, pp. 723–33, May 2011.
- [84] B. Jakovljevic, G. Belojevic, K. Paunovic, and V. Stojanov, ‘Road traffic noise and sleep disturbances in an urban population: cross-sectional study’, *Croat Med J*, vol. 47, no. 1, pp. 125–33, Feb. 2006.
- [85] G. M. Aasvang, T. Moum, and B. Engdahl, ‘Self-reported sleep disturbances due to railway noise: exposure-response relationships for nighttime equivalent and maximum noise levels’, *J Acoust Soc Am*, vol. 124, no. 1, pp. 257–68, Jul. 2008.
- [86] Y. de Kluizenaar, S. A. Janssen, F. J. van Lenthe, H. M. Miedema, and J. P. Mackenbach, ‘Long-term road traffic noise exposure is associated with an increase in morning tiredness’, *J Acoust Soc Am*, vol. 126, no. 2, pp. 626–33, Aug. 2009.
- [87] K. I. Hume, M. Brink, and M. Basner, ‘Effects of environmental noise on sleep’, *Noise Health*, vol. 14, no. 61, pp. 297–302, Nov. 2012.
- [88] L. Stosic, G. Belojevic, and S. Milutinovic, ‘Effects of traffic noise on sleep in an urban population’, *Arh Hig Rada Toksikol*, vol. 60, no. 3, pp. 335–42, Sep. 2009.
- [89] WHO, *Night noise guidelines for Europe*. Copenhagen, Denmark: World Health Organization Europe, 2009.
- [90] S. Stansfeld, M. Haines, and B. Brown, ‘Noise and Health in the Urban Environment’, *Rev. Environ. Health*, vol. 15, no. 1–2, Jan. 2000.
- [91] E. Öhrström, ‘Research on noise since 1988: present state’, in *INRETS*, Nice, 1993, vol. 1.
- [92] F. Georges, M.-E. Heroux, and K. Fong, ‘Public health and economic burden of environmental noise’, presented at the Internoise 2013, Innsbruck, Austria, 2013.

- [93] A. Muzet, 'Environmental noise, sleep and health', *Sleep Med Rev*, vol. 11, no. 2, pp. 135–42, Apr. 2007.
- [94] E. Öhrström and A. Skånberg, 'Sleep disturbances from road traffic and ventilation noise—laboratory and field experiments', *J. Sound Vib.*, vol. 271, no. 1–2, pp. 279–296, 2004.
- [95] E. Öhrström and A. Skånberg, 'Longitudinal surveys on effects of road traffic noise: substudy on sleep assessed by wrist actigraphs and sleep logs', *J. Sound Vib.*, vol. 272, no. 3–5, pp. 1097–1109, 2004.
- [96] S. Pirrera, E. De Valck, and R. Cluydts, 'Nocturnal road traffic noise: A review on its assessment and consequences on sleep and health', *Env. Int.*, vol. 36, no. 5, pp. 492–8, Jul. 2010.
- [97] T. Kawada, 'Effects of traffic noise on sleep: a review', *Nihon Eiseigaku Zasshi*, vol. 50, no. 5, pp. 932–8, Dec. 1995.
- [98] S. Morrell, R. Taylor, and D. Lyle, 'A review of health effects of aircraft noise', *Aust N Z J Public Health*, vol. 21, no. 2, pp. 221–36, Apr. 1997.
- [99] M. Rosenlund, N. Berglind, G. Pershagen, L. Järup, and G. Bluhm, 'Increased prevalence of hypertension in a population exposed to aircraft noise', *Occup. Environ. Med.*, vol. 58, no. 12, pp. 769–773, 2001.
- [100] K. Katsouyanni *et al.*, 'Hypertension and exposure to noise near airports: the HYENA study', *Environ. Health Perspect.*, vol. 116, no. 3, p. 329, 2008.
- [101] A.-S. Evrard, M. Lefèvre, P. Champelovier, J. Lambert, and B. Laumon, 'Does aircraft noise exposure increase the risk of hypertension in the population living near airports in France?', *Occup. Environ. Med.*, p. oemed-2016-103648, Aug. 2016.
- [102] E. E. M. M. van Kempen, H. Kruize, H. C. Boshuizen, C. B. Ameling, B. A. M. Staatsen, and A. E. M. de Hollander, 'The association between noise exposure and blood pressure and ischemic heart disease: a meta-analysis.', *Environ. Health Perspect.*, vol. 110, no. 3, pp. 307–317, Mar. 2002.
- [103] W. Babisch and I. Kamp, 'Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: a cross-national study', *Noise Health*, vol. 11, no. 44, p. 161, 2009.
- [104] E. van Kempen and W. Babisch, 'The quantitative relationship between road traffic noise and hypertension: a meta-analysis', *J. Hypertens.*, vol. 30, no. 6, pp. 1075–1086, Jun. 2012.

- [105] G. Belojevic, B. Jakovljevic, V. Stojanov, K. Paunovic, and J. Ilic, 'Urban road-traffic noise and blood pressure and heart rate in preschool children', *Environ. Int.*, vol. 34, no. 2, pp. 226–231, Feb. 2008.
- [106] W. Babisch, H. Ising, P. C. Elwood, D. S. Sharp, and D. Bainton, 'Traffic Noise and Cardiovascular Risk: The Caerphilly and Speedwell Studies, Second Phase. Risk Estimation, Prevalence, and Incidence of Ischemic Heart Disease', *Arch. Environ. Health Int. J.*, vol. 48, no. 6, pp. 406–413, Nov. 1993.
- [107] K. P. Waye, A. Clow, S. Edwards, F. Hucklebridge, and R. Rylander, 'Effects of nighttime low frequency noise on the cortisol response to awakening and subjective sleep quality', *Life Sci*, vol. 72, no. 8, pp. 863–75, Jan. 2003.
- [108] E. Öhrström, M. Bjorkman, and R. Rylander, 'Effects of noise during sleep with reference to noise sensitivity and habituation', *Environ. Int.*, vol. 16, pp. 477–482, 1990.
- [109] A. W. Correia, J. L. Peters, J. I. Levy, S. Melly, and F. Dominici, 'Residential exposure to aircraft noise and hospital admissions for cardiovascular diseases: multi-airport retrospective study', *BMJ*, vol. 347, p. f5561, Oct. 2013.
- [110] A. Huss, A. Spoerri, M. Egger, and M. Röösli, 'Aircraft Noise, Air Pollution, and Mortality From Myocardial Infarction', *Epidemiology*, vol. 21, no. 6, pp. 829–836, Nov. 2010.
- [111] W. Passchier-Vermeer, *Noise and health of children*. TNO Prevention and Health, Public Health, 2000.
- [112] S. A. Stansfeld *et al.*, 'Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: a cross-national study', *The Lancet*, vol. 365, no. 9475, pp. 1942–1949, 2005.
- [113] S. Stansfeld, S. Hygge, C. Clark, and T. Alfred, 'Night time aircraft noise exposure and children's cognitive performance', *Noise Health*, vol. 12, no. 49, pp. 255–62, Oct. 2010.
- [114] T. Matsui, S. Stansfeld, M. Haines, and J. Head, 'Children's cognition and aircraft noise exposure at home-the West London Schools Study', *Noise Health*, vol. 7, no. 25, p. 49, Jan. 2004.
- [115] R. T. Wilkinson and K. B. Campbell, 'Effects of traffic noise on quality of sleep: assessment by EEG, subjective report, or performance the next day', *J Acoust Soc Am*, vol. 75, no. 2, pp. 468–75, Feb. 1984.
- [116] E. M. Elmenhorst *et al.*, 'Effects of nocturnal aircraft noise on cognitive performance in the following morning: dose-response relationships in laboratory and field', *Int Arch Occup Env. Health*, vol. 83, no. 7, pp. 743–51, Oct. 2010.

- [117] S. Stansfeld, J. Gallacher, W. Babisch, and M. Shipley, 'Road traffic noise and psychiatric disorder: prospective findings from the Caerphilly study', *BMJ*, vol. 313, no. 7052, pp. 266–267, Aug. 1996.
- [118] A. Tarnopolsky, G. Watkins, and D. J. Hand, 'Aircraft noise and mental health: I. Prevalence of individual symptoms', *Psychol. Med.*, vol. 10, no. 4, pp. 683–698, Nov. 1980.
- [119] K. Hiramatsu, T. Yamamoto, K. Taira, A. Ito, and T. Nakasone, 'A survey on health effects due to aircraft noise on residents living around Kadena air base in the Ryukyus', *J. Sound Vib.*, vol. 205, no. 4, pp. 451–460, 1997.
- [120] M. C. Hardoy *et al.*, 'Exposure to aircraft noise and risk of psychiatric disorders: the Elmas survey', *Soc. Psychiatry Psychiatr. Epidemiol.*, vol. 40, no. 1, pp. 24–26.
- [121] E. A. Franssen, C. M. van Wiechen, N. J. Nagelkerke, and E. Lebrecht, 'Aircraft noise around a large international airport and its impact on general health and medication use', *Occup. Env. Med.*, vol. 61, no. 5, pp. 405–13, May 2004.
- [122] M. M. Haines, S. A. Stansfeld, R. S. Job, B. Berglund, and J. Head, 'A follow-up study of effects of chronic aircraft noise exposure on child stress responses and cognition', *Int. J. Epidemiol.*, vol. 30, no. 4, pp. 839–845, Jan. 2001.
- [123] S. A. Stansfeld, M. M. Haines, M. Burr, B. Berry, and P. Lercher, 'A review of environmental noise and mental health', *Noise Health*, vol. 2, no. 8, p. 1, Jan. 2000.
- [124] E. Lainey, S. Nerome, J. P. Enjalbert, S. Bouee, and C. Deschaseaux-Voinet, 'INSOMNIA Impact des Nuisances SONores (Maladies et INsomnie) à proximité des Aéroports', Hôpital Européen Georges Pompidou (CEMKA-EVAL), May 2004.
- [125] A. Baum and N. Grunberg, 'Measurement of stress hormones', *Meas. Stress Guide Health Soc. Sci.*, pp. 175–192, 1995.
- [126] W. Babisch, 'Stress hormones in the research on cardiovascular effects of noise', *Noise Health*, vol. 5, no. 18, p. 1, Jan. 2003.
- [127] C. Maschke, S. Breinl, R. Grimm, and H. Ising, 'The influence of nocturnal aircraft noise on sleep and on catecholamine secretion', *Schriftenr. Ver. Wasser Boden Lufthyg.*, vol. 88, pp. 395–407, 1993.
- [128] G. W. Evans, S. Hygge, and M. Bullinger, 'Chronic Noise and Psychological Stress', *Psychol. Sci.*, vol. 6, no. 6, pp. 333–338, 1995.
- [129] J. Selander *et al.*, 'Exposure to Aircraft Noise and Saliva Cortisol in Six European Countries', *Environ. Health Perspect.*, Jul. 2009.

- [130] G. W. Evans, M. Bullinger, and S. Hygge, 'Chronic noise exposure and physiological response: A prospective study of children living under environmental stress', *Psychol. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 75–77, 1998.
- [131] H. Ising and M. Ising, 'Chronic cortisol increases in the first half of the night caused by road traffic noise', *Noise Health*, vol. 4, no. 16, p. 13, Jan. 2002.
- [132] M. Lefèvre, M.-C. Carlier, P. Champelovier, J. Lambert, B. Laumon, and A.-S. Evrard, 'Effects of aircraft noise exposure on saliva cortisol near airports in France', *Occup. Environ. Med.*, 2017.
- [133] J. I. Halonen *et al.*, 'Road traffic noise is associated with increased cardiovascular morbidity and mortality and all-cause mortality in London', *Eur. Heart J.*, vol. 36, no. 39, pp. 2653–2661, Oct. 2015.
- [134] M. Sorensen *et al.*, 'Road traffic noise and stroke: a prospective cohort study', *Eur. Heart J.*, vol. 32, no. 6, pp. 737–744, Mar. 2011.
- [135] A. Pyko *et al.*, 'Exposure to traffic noise and markers of obesity', *Occup. Environ. Med.*, vol. 72, no. 8, pp. 594–601, Jan. 2015.
- [136] C. Eriksson, A. Hilding, A. Pyko, G. Bluhm, G. Pershagen, and C. G. Ostenson, 'Long-term aircraft noise exposure and body mass index, waist circumference, and type 2 diabetes: a prospective study', *Env. Health Perspect.*, vol. 122, no. 7, pp. 687–94, Jul. 2014.
- [137] B. Oftedal *et al.*, 'Road traffic noise and markers of obesity - a population-based study', *Env. Res.*, vol. 138, pp. 144–53, Apr. 2015.
- [138] M. Sørensen *et al.*, 'Long-Term Exposure to Road Traffic Noise and Incident Diabetes: A Cohort Study', *Environ. Health Perspect.*, vol. 121, no. 2, pp. 217–222, Feb. 2013.
- [139] P. Marneffe, 'Répercussions des vols de nuit sur la qualité de vie et la santé des riverains d'aéroport', *Association UFCNA*, 1997.
- [140] K. Hume, M. Gregg, C. Thomas, and D. Terranova, 'Complaints caused by aircraft operations: an assessment of annoyance by noise level and time of day', *J. Air Transp. Manag.*, vol. 9, no. 3, pp. 153–160, May 2003.
- [141] A. Muzet, 'Les effets du bruit sur le sommeil', *Acoust. Tech.*, vol. 28, pp. 13–19.
- [142] E. Öhrström and R. Rylander, 'Sleep disturbance by road traffic noise—A laboratory study on number of noise events', *J. Sound Vib.*, vol. 143, no. 1, pp. 93–101, Nov. 1990.
- [143] E. Öhrström, 'Effects of low levels of road traffic noise during the night: a laboratory study on number of events, maximum noise levels and noise sensitivity', *J. Sound Vib.*, vol. 179, no. 4, pp. 603–615, 1995.

- [144] B. Saletu, R. Frey, and J. Grunberger, '[Street noise and sleep: whole night somnopolygraphic, psychometric and psychophysiologic studies in comparison with normal data]', *Wien Med Wochenschr*, vol. 139, no. 11, pp. 257–63, Jun. 1989.
- [145] B. Saletu and J. Grunberger, 'Traffic noise-induced sleep disturbances and their correction by an anxiolytic sedative, OX-373', *Neuropsychobiology*, vol. 7, no. 6, pp. 302–14, 1981.
- [146] M. Kuroiwa, P. Xin, S. Suzuki, Y. Sasazawa, T. Kawada, and Y. Tamura, 'Habituation of Sleep to Road Traffic Noise Observed Not by Polygraphy but by Perception', *J. Sound Vib.*, vol. 250, no. 1, pp. 101–106, 2002.
- [147] T. Kawada, P. Xin, M. Kuroiwa, Y. Sasazawa, S. Suzuki, and Y. Tamura, 'Habituation of Sleep to Road Traffic Noise as Determined by Polysomnography and an Accelerometer', *J. Sound Vib.*, vol. 242, no. 1, pp. 169–178, 2001.
- [148] G. J. Thiessen and A. C. Lapointe, 'Effect of continuous traffic noise on percentage of deep sleep, waking, and sleep latency', *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 73, no. 1, pp. 225–229, Jan. 1983.
- [149] B. Griefahn, 'A critical load for nocturnal high-density road traffic noise', *Am J Ind Med*, vol. 9, no. 3, pp. 261–9, 1986.
- [150] A. Skånberg and E. Öhrström, 'Sleep disturbances from road traffic noise: A comparison between laboratory and field settings', *J. Sound Vib.*, vol. 290, no. 1–2, pp. 3–16, 2006.
- [151] M. Basner and A. Samel, 'Effects of Nocturnal Aircraft Noise on Sleep Structure', *Somnologie*, vol. 9, pp. 84–95, 2005.
- [152] M. Basner, C. Glatz, B. Griefahn, T. Penzel, and A. Samel, 'Aircraft noise: effects on macro- and microstructure of sleep', *Sleep Med*, vol. 9, no. 4, pp. 382–7, May 2008.
- [153] M. Saremi, J. Greneche, A. Bonnefond, O. Rohmer, A. Eschenlauer, and P. Tassi, 'Effects of nocturnal railway noise on sleep fragmentation in young and middle-aged subjects as a function of type of train and sound level', *Int J Psychophysiol*, vol. 70, no. 3, pp. 184–91, Dec. 2008.
- [154] D. N. J, M. A, E. J, and L. Jp, 'Comparison of cardiovascular responses to noise during waking and sleeping in humans.', *Sleep*, vol. 13, no. 2, pp. 108–120, 1990.
- [155] B. Griefahn, A. Marks, and S. Robens, 'Noise emitted from road, rail and air traffic and their effects on sleep', *J. Sound Vib.*, vol. 295, no. 1–2, pp. 129–140, 2006.
- [156] S. Pirrera, E. De Valck, and R. Cluydts, 'Field study on the impact of nocturnal road traffic noise on sleep: the importance of in- and outdoor noise assessment, the bedroom

- location and nighttime noise disturbances’, *Sci Total Env.*, vol. 500–501, pp. 84–90, Dec. 2014.
- [157] E. Öhrström, E. Hadzibajramovic, M. Holmes, and H. Svensson, ‘Effects of road traffic noise on sleep: Studies on children and adults’, *J. Environ. Psychol.*, vol. 26, no. 2, pp. 116–126, 2006.
- [158] J. L. Eberhardt and K. R. Akselsson, ‘The disturbance by road traffic noise of the sleep of young male adults as recorded in the home’, *J. Sound Vib.*, vol. 114, no. 3, pp. 417–434, 1987.
- [159] B. Griefahn and E. Gros, ‘Noise and sleep at home, a field study on primary and after-effects’, *J. Sound Vib.*, vol. 105, no. 3, pp. 373–383, 1986.
- [160] W. Passchier-Vermeer, H. Vos, J. Steenbekkers, F. van der Ploeg, and K. Groothuis-Oudshoorn, ‘Sleep disturbance and aircraft noise exposure : Exposure-effect relationships’, Division Public Health, The Netherlands, TNO report 2002.027, Jun. 2002.
- [161] S. J. Kim *et al.*, ‘Exposure-Response Relationship Between Aircraft Noise and Sleep Quality: A Community-based Cross-sectional Study’, *Osong Public Health Res Perspect*, vol. 5, no. 2, pp. 108–14, Apr. 2014.
- [162] G. Bluhm and E. Nordling, ‘Health effects of noise from railway traffic-The HEAT study’, in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2005, vol. 2005, pp. 3516–3522.
- [163] A. Marks, B. Griefahn, and M. Basner, ‘Event-related awakenings caused by nocturnal transportation noise’, *Noise Control Eng. J.*, vol. 56, no. 1, pp. 52–62, Jan. 2008.
- [164] C. Maschke, K. Hecht, and U. Wolf, ‘Nocturnal awakenings due to aircraft noise. Do wake-up reactions begin at sound level 60 dB(A)?’, *Noise Health*, vol. 6, no. 24, pp. 21–33, Jul. 2004.
- [165] T. T. Dang-Vu, S. M. McKinney, O. M. Buxton, J. M. Solet, and J. M. Ellenbogen, ‘Spontaneous brain rhythms predict sleep stability in the face of noise’, *Curr. Biol.*, vol. 20, no. 15, pp. R626–R627, Aug. 2010.
- [166] F. B. Keefe, L. C. Johnson, and E. J. Hunter, ‘Eeg and Autonomic Response Pattern During Waking and Sleep Stages’, *Psychophysiology*, vol. 8, no. 2, pp. 198–212, Mar. 1971.
- [167] G. Hajak *et al.*, *Impact of overnight traffic noise on sleep quality, sleepiness, and vigilant attention in long-haul truck drivers: Results of a pilot study*, vol. 17. 2015.
- [168] A. Sadeh, P. J. Hauri, D. F. Kripke, and P. Lavie, ‘The Role of Actigraphy in the Evaluation of Sleep Disorders’, *Sleep*, vol. 18, no. 4, pp. 288–302, Jun. 1995.

- [169] E. Ohrstrom and R. Rylander, 'Sleep disturbance effects of traffic noise - a laboratory study on after effects', *J. Sound Vib.*, vol. 84, no. 1, pp. 87–103, 1982.
- [170] P. Tassi *et al.*, 'Living alongside railway tracks: Long-term effects of nocturnal noise on sleep and cardiovascular reactivity as a function of age', *Env. Int.*, vol. 36, no. 7, pp. 683–9, Oct. 2010.
- [171] G. M. Aasvang, B. Overland, R. Ursin, and T. Moum, 'A field study of effects of road traffic and railway noise on polysomnographic sleep parameters', *J Acoust Soc Am*, vol. 129, no. 6, pp. 3716–26, Jun. 2011.
- [172] S. Fidell, K. Pearsons, B. G. Tabachnick, and R. Howe, 'Effects on sleep disturbance of changes in aircraft noise near three airports', *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 107, no. 5, pp. 2535–2547, May 2000.
- [173] S. Fidell, K. Pearsons, B. Tabachnick, R. Howe, L. Silvati, and D. S. Barber, 'Field study of noise-induced sleep disturbance', *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 98, no. 2, pp. 1025–1033, Aug. 1995.
- [174] S. Pennig *et al.*, 'Annoyance and self-reported sleep disturbance due to night-time railway noise examined in the field', *J Acoust Soc Am*, vol. 132, no. 5, pp. 3109–17, Nov. 2012.
- [175] S. Perron, L. F. Tetreault, N. King, C. Plante, and A. Smargiassi, 'Review of the effect of aircraft noise on sleep disturbance in adults', *Noise Health*, vol. 14, no. 57, pp. 58–67, Mar. 2012.
- [176] P. Xin, T. Kawada, S. Yosiaki, and S. Suzuki, 'Habituation of Sleep to Road Traffic Noise Assessed by Polygraphy and Rating Scale', *J Occup Health*, vol. 42, pp. 20–26, 2000.
- [177] M. Basner, H. Buess, U. Mueller, G. Plath, and A. Samel, 'Aircraft noise effects on sleep: final results of DLR laboratory and field studies of 2240 polysomnographically recorded subject nights', presented at the In 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Internoise 2004), Prague/Czech Republic, 2004, pp. 22–25.
- [178] J. I. Halonen *et al.*, 'Associations between nighttime traffic noise and sleep: the Finnish public sector study', *Env. Health Perspect*, vol. 120, no. 10, pp. 1391–6, Oct. 2012.
- [179] T. Kawada and S. Suzuki, 'Change in Rapid Eye Movement (REM) Sleep in Response to Exposure to All-Night Noise and Transient Noise', *Arch. Environ. Health Int. J.*, vol. 54, no. 5, pp. 336–340, Sep. 1999.
- [180] A. Marks and B. Griefahn, 'Railway Noise – Its Effects on Sleep, Mood, Subjective Sleep Quality, and Performance', *Somnologie*, vol. 9, no. 2, pp. 68–75, May 2005.

- [181] A. Muzet, P. Naitoh, R. E. Townsend, and L. C. Johnson, 'Body movements during sleep as a predictor of stage change', *Acute Eff. Night-Time Noise Expo. Blood Press. Popul. Living Airt.*, vol. 29, no. 1, pp. 7–10, Jul. 1972.
- [182] S. A. Janssen, M. R. Centen, H. Vos, and I. van Kamp, 'The effect of the number of aircraft noise events on sleep quality', *Appl. Acoust.*, vol. 84, pp. 9–16, 2014.
- [183] M. Brink, P. Lercher, A. Eisenmann, and C. Schierz, 'Influence of slope of rise and event order of aircraft noise events on high resolution actimetry parameters', *Somnologie - Schlafforschung Schlafmed.*, vol. 12, no. 2, pp. 118–128, Jun. 2008.
- [184] P. Lercher *et al.*, 'The effects of railway noise on sleep medication intake: results from the ALPNAP-study', *Noise Health*, vol. 12, no. 47, pp. 110–9, Apr. 2010.
- [185] E. Ohrstrom and M. Bjorkman, 'Effects of noise-disturbed sleep – A laboratory study on habituation and subjective noise sensitivity', *J. Sound Vib.*, vol. 122, no. 2, pp. 277–290, 1988.
- [186] P. Tassi, M. Saremi, S. Schimchowitsch, A. Eschenlauer, O. Rohmer, and A. Muzet, 'Cardiovascular responses to railway noise during sleep in young and middle-aged adults', *Eur J Appl Physiol*, vol. 108, no. 4, pp. 671–80, Mar. 2010.
- [187] N. Carter, R. Henderson, S. Lal, M. Hart, S. Booth, and S. Hunyor, 'Cardiovascular and autonomic response to environmental noise during sleep in night shift workers', *Sleep*, vol. 25, no. 4, pp. 457–464, Jun. 2002.
- [188] B. Griefahn, P. Brode, A. Marks, and M. Basner, 'Autonomic arousals related to traffic noise during sleep', *SLEEP-N. Y. THEN Westchest.*, vol. 31, no. 4, p. 569, 2008.
- [189] F. Schmidt *et al.*, 'Nighttime aircraft noise impairs endothelial function and increases blood pressure in patients with or at high risk for coronary artery disease', *Clin Res Cardiol*, vol. 104, no. 1, pp. 23–30, Jan. 2015.
- [190] Y. Aydin and M. Kaltenbach, 'Noise perception, heart rate and blood pressure in relation to aircraft noise in the vicinity of the Frankfurt airport', *Clin Res Cardiol*, vol. 96, no. 6, pp. 347–58, Jun. 2007.
- [191] F. P. Schmidt *et al.*, 'Effect of nighttime aircraft noise exposure on endothelial function and stress hormone release in healthy adults', *Eur Heart J*, vol. 34, no. 45, pp. 3508–14a, Dec. 2013.
- [192] A. S. Haralabidis *et al.*, 'Acute effects of night-time noise exposure on blood pressure in populations living near airports', *Eur Heart J*, vol. 29, no. 5, pp. 658–64, Mar. 2008.

- [193] J. M. Graham, S. A. Janssen, H. Vos, and H. M. Miedema, 'Habitual traffic noise at home reduces cardiac parasympathetic tone during sleep', *Int J Psychophysiol*, vol. 72, no. 2, pp. 179–86, May 2009.
- [194] L. J. Gula, A. D. Krahn, A. C. Skanes, R. Yee, and G. J. Klein, 'Clinical relevance of arrhythmias during sleep: guidance for clinicians', *Heart*, vol. 90, no. 3, pp. 347–352, Jan. 2004.
- [195] S. Floud *et al.*, 'Medication use in relation to noise from aircraft and road traffic in six European countries: results of the HYENA study', *Occup Env. Med*, vol. 68, no. 7, pp. 518–24, Jul. 2011.
- [196] Y. de Kluizenaar, S. A. Janssen, F. J. van Lenthe, H. M. E. Miedema, and J. P. Mackenbach, 'Long-term road traffic noise exposure is associated with an increase in morning tiredness', *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 126, no. 2, pp. 626–633, Aug. 2009.
- [197] W. Hofman, A. Kumar, and J. Eberhardt, 'Comparative evaluation of sleep disturbance due to noise from airplanes, trains and trucks', *Noise Man*, vol. 93, pp. 559–562, 1993.
- [198] M. Vernet, 'Effect of train noise on sleep for people living in houses bordering the railway line', *J. Sound Vib.*, vol. 66, no. 3, pp. 483–492, Oct. 1979.
- [199] H. M. Miedema and H. Vos, 'Associations between self-reported sleep disturbance and environmental noise based on reanalyses of pooled data from 24 studies', *Behav Sleep Med*, vol. 5, no. 1, pp. 1–20, 2007.
- [200] J. Hong, J. Kim, C. Lim, K. Kim, and S. Lee, 'The effects of long-term exposure to railway and road traffic noise on subjective sleep disturbance', *Long-Term Eff. Noise Reduct. Meas. Noise Annoyance Sleep Disturb. Nor. Facade Insul. Study*, vol. 128, no. 5, pp. 2829–35, Nov. 2010.
- [201] J. L. Eberhardt, L.-O. Stråhle, and M. H. Berlin, 'The influence of continuous and intermittent traffic noise on sleep', *J. Sound Vib.*, vol. 116, no. 3, pp. 445–464, 1987.
- [202] G. J. Thiessen, 'Effect of intermittent and continuous traffic noise on various sleep characteristics and their adaptation', in *Proceedings fourth international congress on noise as a public health problem*, 1983, vol. 2, pp. 995–1005.
- [203] K. Pearsons, D. Barber, and B. Tabachnick, 'Analyses of the Predictability of Noise-Induced Sleep Disturbance', *Brooks AFB TX Air Force Syst. Command Hum. Syst. Div.*, 1989.
- [204] M. Basner, U. Müller, and B. Griefahn, 'Practical guidance for risk assessment of traffic noise effects on sleep', *Appl. Acoust.*, vol. 71, no. 6, pp. 518–522, Jun. 2010.

- [205] J. Lekaviciute Gadal, S. Kephalopoulos, S. Stansfeld, and C. Clark, 'Final Report of the ENNAH (European Network on Noise and Health) project', Publications Office of the European Union, EUR - Scientific and Technical Research Reports, 2013.
- [206] B. Griefahn, 'Sleep disturbances related to environmental noise', *Noise Health*, vol. 4, no. 15, p. 57, Jan. 2002.
- [207] K. Hume and C. Whitehead, 'Sleep disturbance due to introduced aircraft noise', presented at the Proceedings of the 8th International Congress on Noise as a Public Health Problem, The Netherlands, 2003, pp. 199–200.
- [208] E. Ohrstrom, *Sleep disturbances caused by road traffic noise - studies in laboratory and field*, vol. 2. 2000.
- [209] A. Fyhri and G. M. Aasvang, 'Noise, sleep and poor health: Modeling the relationship between road traffic noise and cardiovascular problems', *Sci Total Env.*, vol. 408, no. 21, pp. 4935–42, Oct. 2010.
- [210] R. Guski, 'An analysis of spontaneous noise complaints', *Environ. Res.*, vol. 13, no. 2, pp. 229–236, 1977.

PARTIE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES

I. Contexte

Les nuisances sonores autour des aéroports français font l'objet d'un débat de société. Des interrogations et des inquiétudes accroissent chaque année chez les riverains des aéroports. Le bruit des avions est perçu comme un facteur de stress environnemental majeur dans le voisinage des aéroports. Bien que le bruit émis par un seul aéronef ait été significativement réduit dans le passé, cet effet a été compensé par l'augmentation constante du trafic aérien ces dernières décennies. Une sensibilité grandissante des populations autour des aéroports s'observe vis-à-vis de la question du bruit. Une augmentation des conflits autour de la problématique aéroportuaire est observée entre les aéroports et les individus vivant dans leur voisinage. Aujourd'hui, de fortes revendications de la part des riverains sur les nuisances des survols se multiplient. Des demandes de couvre-feu, de modulation des trafics, de déviation des trajectoires d'approche, d'interdiction d'utilisation de certains aéronefs sont évoquées et justifiées par des enjeux sanitaires et plus particulièrement les troubles du sommeil.

Le 6 mai 2004, le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) a rendu son avis relatif à la protection de la santé des personnes exposées au bruit des avions : le bruit autour des aéroports constitue un problème de santé publique du fait de ses effets sanitaires, non seulement en termes de gêne mais également en termes de perturbation du sommeil. Le CSHPF a donc recommandé que soit affinée la connaissance de la situation sanitaire française résultant de l'exposition au bruit des avions par la mise en œuvre d'études épidémiologiques.

Faisant suite à cet avis, la Direction Générale de la Santé (DGS) en collaboration avec l'Autorité de Contrôle des Nuisances Aéroportuaires (Acnusa) a suscité la mise en œuvre d'un programme de recherche épidémiologique appelé "Discussion sur les Effets du Bruit des Aéronefs Touchant la Santé" (DEBATS). Par la suite, la DGS, qui a souhaité promouvoir l'avancement de ce projet DEBATS, a sollicité l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (Inrets) devenu Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (Ifsttar) le 1^{er} janvier 2011, sur proposition de l'Acnusa, pour la mise en place de ce projet.

DEBATS est un programme national de recherche épidémiologique. Il a pour objectif général de mieux connaître et mieux quantifier les effets du bruit sur la santé des populations riveraines des aéroports en France. Il porte sur les riverains de trois des six plus importants aéroports français en termes de passagers, Paris-Charles de Gaulle, Lyon-Saint-Exupéry et Toulouse-Blagnac. En 2011, l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle recevait environ 61 millions de

passagers, Lyon Saint-Exupéry 8,5 millions et Toulouse-Blagnac 7 millions. L'aéroport de Paris-Orly, deuxième aéroport français avec 27 millions de passagers, n'a pas été retenu car un couvre-feu total est en vigueur sur cet aéroport de 23 h 30 à 6h. Les aéroports de Nice-Côte d'Azur et Marseille-Provence, respectivement troisième et cinquième aéroports français avec 10,5 millions et 7,5 millions de passagers, ne font pas partie de l'étude car ces deux aéroports connaissent une variation importante de leur fréquentation et donc du nombre de mouvements d'avions selon la saison. Par ailleurs, les avions qui décollent et atterrissent sur ces deux aéroports survolent en grande partie la mer pour le premier et l'Étang de Berre pour le second.

Pour répondre aux objectifs de la thèse, nous nous servons des données recueillies dans le cadre de deux des études incluses dans ce programme de recherche DEBATS :

- L'étude individuelle longitudinale : chercher au niveau individuel, l'existence d'un lien entre l'exposition au bruit des avions et la qualité subjective du sommeil.
- L'étude individuelle sommeil : caractériser de manière détaillée et spécifique les effets du bruit des avions sur la qualité objective du sommeil tout en affinant la mesure de l'exposition au bruit.

II. La zone d'étude de DEBATS

1. Définition des Plans de Gêne Sonore et des Courbes d'Environnement Sonore

Un Plan de Gêne Sonore (PGS) est un document prévu par la loi 92-1444 du 31 décembre 1992 permettant de délimiter un périmètre à l'intérieur duquel les riverains peuvent prétendre à une aide financière pour la réalisation de travaux d'isolation acoustique de leur habitation. Il est établi sur la base du trafic estimé, des procédures de circulation aérienne applicables et des infrastructures qui seront en service dans l'année suivant la date de publication de l'arrêté d'approbation du plan. Il délimite trois zones : la zone 1 dite de très forte nuisance qui est comprise à l'intérieur de la courbe d'indice $L_{den} 70$; la zone 2 dite de forte nuisance qui est comprise entre la courbe d'indice $L_{den} 70$ et la courbe d'indice $L_{den} 65$ ou 62 ; et la zone 3 dite de nuisance modérée qui est comprise entre la limite extérieure de la zone 2 et la courbe d'indice $L_{den} 55$. Les 12 principaux aéroports français sont dotés d'un PGS, dont les aéroports de Lyon Saint-Exupéry (Figure 4) et Toulouse-Blagnac (Figure 5).

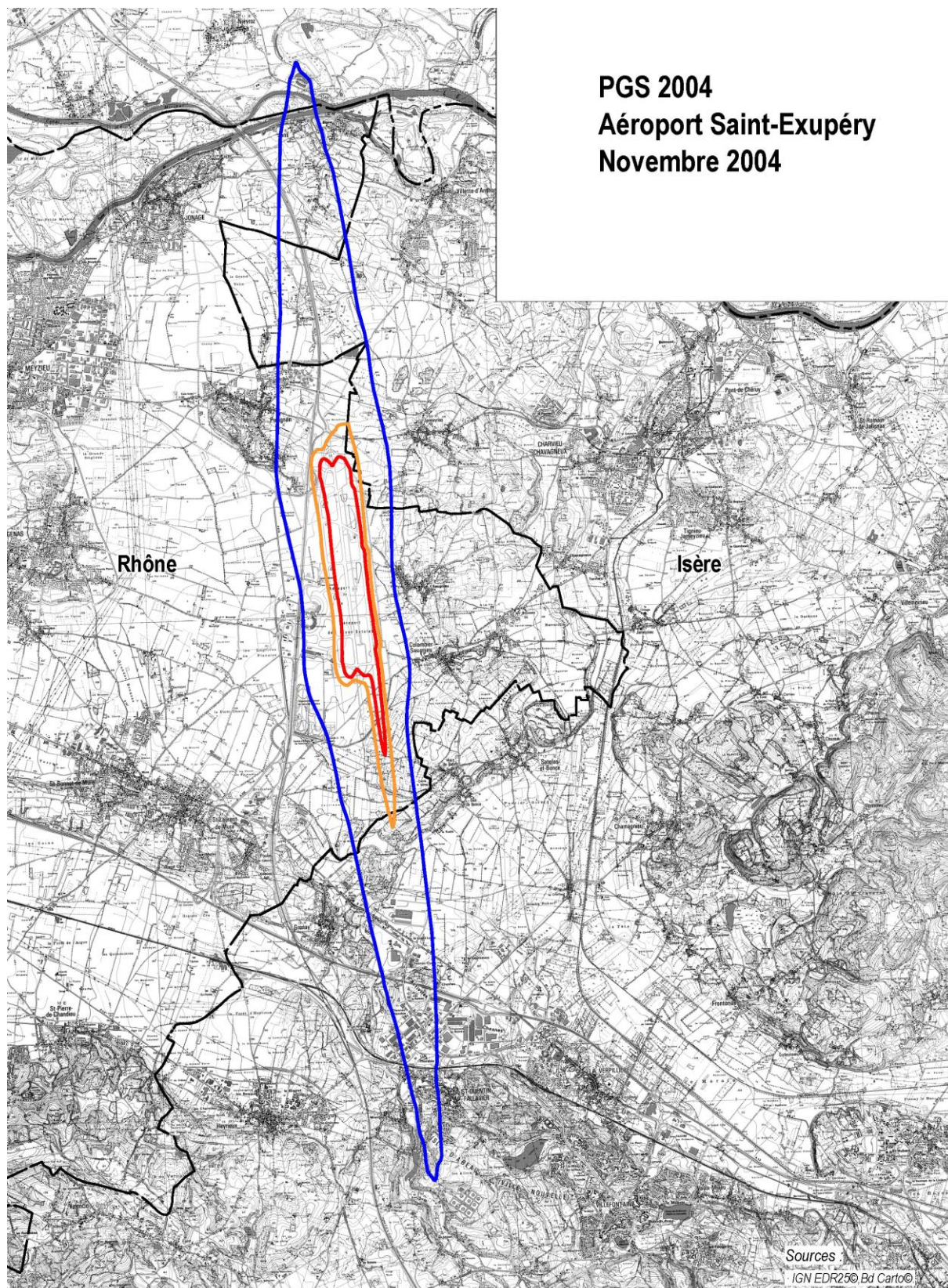


Figure 4 - PGS de l'aéroport de Lyon-Saint-Exupéry (2004)

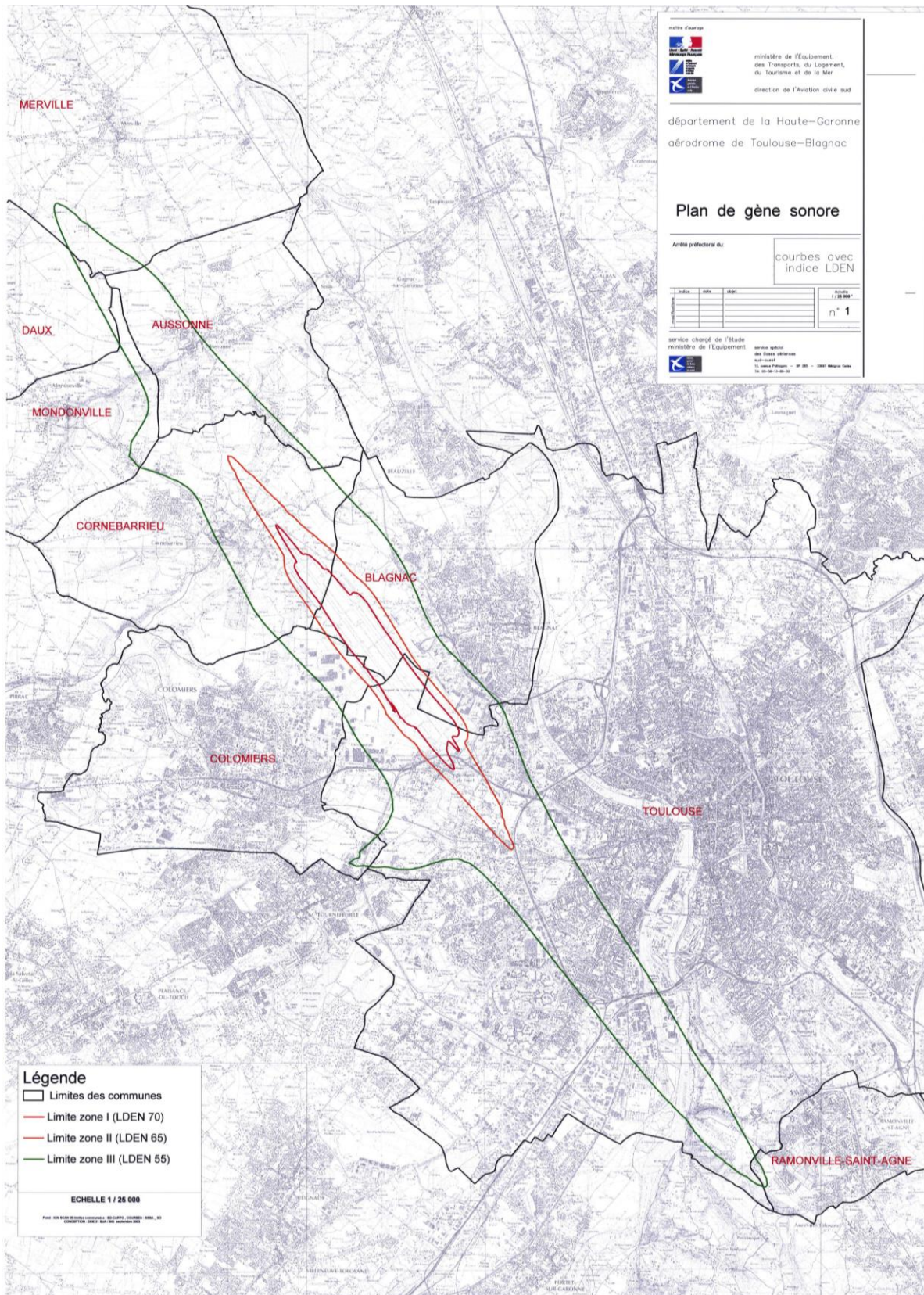


Figure 5 - PGS de l'aéroport de Toulouse-Blagnac (2003)

Les Courbes d'Environnement Sonore (CES) sont établies chaque année par Aéroports de Paris selon la même méthode que celle servant à dessiner les PGS. Leur principal intérêt est qu'elles sont établies par une modélisation tenant compte du trafic réellement constaté l'année précédente. Elles couvrent des zones plus larges que les courbes extérieures du PGS et sont mises à jour annuellement. Les CES existent uniquement pour l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle (Figure 6) mais pas pour les aéroports de Toulouse-Blagnac et de Lyon-Saint-Exupéry.

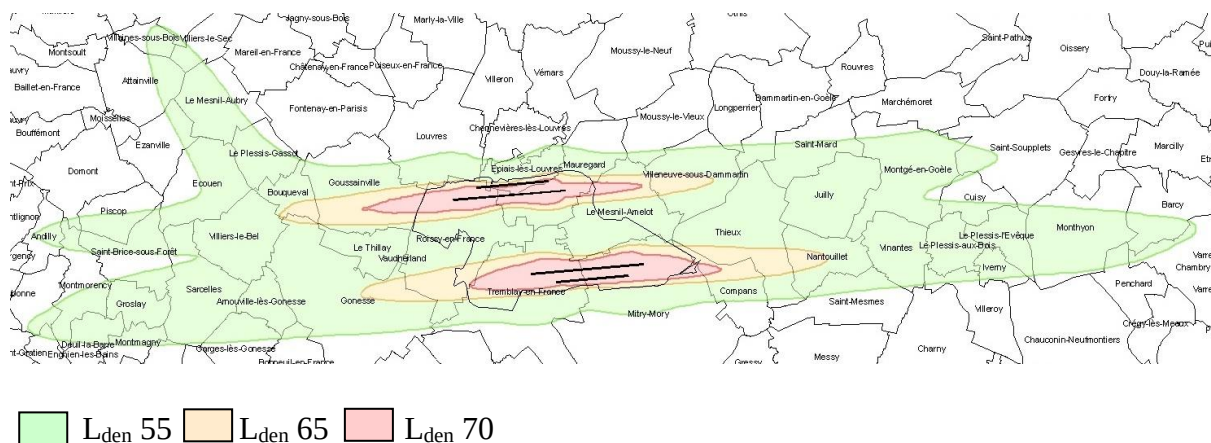


Figure 6 - CES de l'aéroport de Paris-Charles De Gaulle (2011)

Les PGS et les CES sont déterminés à l'aide du logiciel de calcul INM (Integrated Noise Model). Ce dernier est développé par la Federal Aviation Administration (l'équivalent américain de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC)) pour la modélisation du bruit d'origine aéronautique. Des études ont comparé les niveaux de bruit estimés par le logiciel INM et les niveaux de bruit mesurés par des stations permanentes [1] ou lors de campagnes de mesures [2] à proximité des aéroports en France. Pour un même point récepteur et des conditions de trafic identiques, cette comparaison ne met généralement pas en évidence de différences importantes. Celles-ci sont le plus souvent comprises entre 0,5 et 1,5 dB(A) au sens du *Lden*.

2. Définition de la zone d'étude de DEBATS

La zone d'étude de DEBATS comprend d'une part l'ensemble des communes intégrées dans les CES de 2011 de l'aéroport Paris-Charles de Gaulle, et dans les PGS de 2003 pour l'aéroport de Toulouse-Blagnac et de 2004 pour l'aéroport de Lyon-Saint-Exupéry (derniers PGS disponibles à ce jour), d'autre part les communes limitrophes de ces communes. L'inclusion de ces communes limitrophes a permis d'élargir la zone d'étude à des communes moins exposées

($L_{den} < 55 \text{ dB(A)}$) que celles intégrées dans les CES et les PGS ($L_{den} > 55 \text{ dB(A)}$). Dans le cadre de DEBATS, la DGAC a fourni une zone 4 comprise entre la limite extérieure de la zone 3 et la courbe d'indice $L_{den} 50$. La zone d'étude de DEBATS a ainsi été divisée en quatre classes en termes de L_{den} : $< 50 \text{ dB(A)}$, $50-54 \text{ dB(A)}$, $55-59 \text{ dB(A)}$ et 60 dB(A) et plus. Elle comprend au total 161 communes : 108 communes pour Paris-Charles de Gaulle, 22 communes pour Toulouse-Blagnac et 31 communes pour Lyon-Saint-Exupéry.

Les individus inclus dans le programme de recherche DEBATS ont été sélectionnés parmi les riverains de ces communes.

Dans la suite de ce manuscrit, le terme « carte de bruit » désignera les PGS pour les aéroports de Toulouse-Blagnac et Lyon-Saint-Exupéry, et les CES pour l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle.

III. Étude individuelle longitudinale

1. Population de l'étude

La population riveraine des aéroports français est la population cible de notre étude. La population source est constituée des riverains âgés de 18 ans et plus des 161 communes incluses dans la zone d'étude de DEBATS décrite au paragraphe précédent (Cf. §II.2). L'objectif était de recruter 300 riverains dans les quatre zones de bruit définies autour des trois aéroports à partir des cartes de bruit en termes de L_{den} : $< 50 \text{ dBA}$, $50-54 \text{ dBA}$, $55-59 \text{ dBA}$ et 60 dBA et plus. Afin d'assurer qu'un nombre suffisamment important de participants soient exposés à des niveaux élevés d'exposition au bruit des avions et donc de maximiser les contrastes d'exposition, un échantillon de la population stratifié sur ces quatre classes de bruit a été utilisé. L'hypothèse a été faite que l'effet du niveau d'exposition au bruit des avions, s'il existe, est prédominant par rapport à l'effet aéroport. De ce fait, lorsque les trois aéroports sont considérés dans leur ensemble, le même nombre de sujets a été retenu dans chaque zone de bruit ($N = 300$) afin d'évaluer l'existence d'un effet du niveau d'exposition au bruit des avions sur la santé des participants.

Un échantillon de 23 350 adresses situées dans l'une des 161 communes a ainsi été tiré au sort dans l'annuaire téléphonique universel⁸. Lorsqu'un contact a été établi au téléphone par

⁸ Depuis 2006, la mise en place concertée avec tous les opérateurs téléphoniques d'un Annuaire Universel avait pour vocation de collecter tous les numéros de téléphones fixes, mobiles, résidentiels et professionnels de France.

l'institut de sondage, la sélection du répondant a ensuite été effectuée par tirage au sort au sein des membres éligibles du foyer. La méthodologie adoptée pour le recrutement des participants a fait l'objet d'un rapport [3].

Les participants devaient être âgés de 18 ans et plus, résider dans l'une des 161 communes de la zone étude, habiter dans leur logement actuel pendant au moins six mois dans l'année, comprendre et parler le français, sans distinction de nationalité. Finalement, 1 244 personnes ont participé à l'étude.

Près de 40% des personnes contactées et ayant refusé de participer ont cependant répondu à un questionnaire de refus concernant leurs caractéristiques démographiques et socio-économiques. Les profils démographiques et socio-économiques des participants ont ainsi pu être comparés à ceux des personnes qui ont répondu au questionnaire de refus (non-participants), ainsi qu'à ceux de la population source qui ont été caractérisés à partir des données du recensement de l'Insee.

2. Période de l'étude

Les participants de l'étude longitudinale ont été inclus dans l'étude et interrogés une première fois en 2013, puis suivis en 2015 et en 2017. Les données utilisées pour répondre aux objectifs de cette thèse sont uniquement celles recueillies lors de l'inclusion en 2013.

3. Questionnaire

À l'inclusion puis lors des deux suivis, un questionnaire a été administré en face à face au domicile de chaque participant par un enquêteur formé par l'équipe DEBATS. Les données recueillies concernent leurs caractéristiques démographiques et socio-économiques, leur mode de vie (tabagisme, consommation d'alcool, activité physique, activités en lien avec une éventuelle exposition au bruit), leur état de santé (effets sur le sommeil et le système cardiovasculaire, troubles psychologiques, gêne ressentie due au bruit des avions, et consommation de médicaments), et leur perception de l'environnement. Des mesures de leur

Mais pour des raisons de respect de la vie privée, les propriétaires de téléphones mobiles sont consultés, et doivent donner leur accord (ou solliciter leur opérateur) pour que soit listé leur numéro de portable dans ce répertoire universel. En juillet 2010, le taux d'abonnés à la téléphonie mobile présents sur les listes d'annuaires unifiés se maintenait à 2,8% alors que ce chiffre était supérieur à 80% pour la téléphonie fixe (Autorité de régulation des communications électroniques et des postes 2010). D'après une société de sondage qui a été consultée sur le sujet, des études ont montré que 80% des utilisateurs de téléphone mobile inscrits dans l'Annuaire Universel sont des détenteurs exclusifs de téléphones portables.

tension artérielle, de leur fréquence cardiaque et de leur concentration de cortisol salivaire (marqueur des états de stress) ont également été réalisées.

Dans le questionnaire, la qualité subjective du sommeil des participants a été évaluée grâce à six questions qui concernent :

- Le temps d'endormissement : « Habituellement, combien de temps vous faut-il pour vous endormir ? » (moins de 5 min, entre 5 et 15 min, entre 15 et 30 min, entre 30 min et 1h, plus d'1h),
- Les éveils nocturnes : « Vous arrive-t-il de vous réveiller pendant la nuit ? » (toutes les nuits, régulièrement, occasionnellement, rarement, jamais),
- La durée du sommeil avec deux questions : « À quelle heure vous couchez-vous habituellement la semaine pour dormir (lumières éteintes) ? » et « À quelle heure vous levez-vous habituellement la semaine ? »,
- La satisfaction de la qualité du sommeil : « Êtes-vous satisfait(e) de la qualité de votre sommeil ? » (très satisfait, plutôt satisfait, plutôt insatisfait, très insatisfait),
- Le sentiment de repos au réveil le matin : « Après une nuit de sommeil habituelle, vous vous sentez ? » (bien reposé, plutôt reposé, plutôt fatigué, très fatigué),
- Et la prise de médicament pour dormir : « Prenez-vous des médicaments pour dormir ? » (toutes les nuits, régulièrement, occasionnellement, rarement, jamais).

Ces six variables ont été dichotomisées de la manière suivante afin d'être mises en relation avec l'exposition au bruit des avions.

- Temps d'endormissement : *30 min et plus* vs moins de 30 min.
- Éveils nocturnes: *toutes les nuits et régulièrement* vs occasionnellement, rarement et jamais.
- Durée de sommeil : $\leq 6h$ vs $> 6h$.
- Satisfaction de la qualité du sommeil : *plutôt et très insatisfait* vs très et plutôt satisfait,
- Sentiment de repos le matin : *plutôt et très fatigué* vs bien et plutôt reposé.
- Prise de médicament pour dormir : *tous les jours et régulièrement* vs occasionnellement, rarement et jamais.

4. Niveaux d'exposition au bruit des avions

Le croisement de l'adresse de chaque participant avec les cartes de bruit des trois aéroports grâce à un système d'information géographique (SIG) a permis de leur attribuer un niveau d'exposition au bruit des avions. Dans le cadre de DEBATS, la DGAC a fourni les niveaux de bruit par tranche de 1 dB(A).

Deux indicateurs énergétiques ont été pris en considération dans cette étude grâce aux cartes de bruit : le *Lden* et le *LAeq*. Pour rappel, le *Lden* est calculé sur la base des niveaux équivalents pour les trois périodes (jour, soirée et nuit) auxquels sont appliqués des termes correctifs majorant, prenant en compte un critère de sensibilité accrue en fonction de la période. Le *LAeq* correspond quant à lui au niveau sonore moyen sur une période déterminée. Les périodes choisies dans cette étude sont : 24h (*LAeq24h*), 6h-22h (*LAeq6h22h*), et 22h-6h (*LAeq22h6h* ou encore *Lnight*).

5. Analyse statistique des données

Pour répondre aux objectifs de la thèse, seules les données recueillies à l'inclusion en 2013 ont été analysées de manière transversale, en trois étapes :

- Première étape : description de l'ensemble des participants et comparaison aux non-participants qui ont accepté de répondre à un questionnaire de refus et à la population de la zone d'étude grâce aux données du recensement de l'Insee,
- Deuxième étape : estimation de la prévalence des troubles du sommeil définis dans le paragraphe 3 dans les différentes classes d'exposition au bruit des avions et comparaison de ces prévalences, avec un test de khi-deux et la réalisation d'analyses univariées, pour rechercher d'éventuelles différences significatives de ces troubles selon le niveau d'exposition au bruit des avions et selon d'autres variables qui pourraient être des facteurs de confusion potentiels,
- Troisième étape : modélisation pour déterminer si les différences significatives mises en évidence à l'étape précédente sont à mettre en relation avec l'existence d'un effet « niveau d'exposition au bruit des avions » ou si elles résultent, du moins en partie, d'un effet de confusion de la part de certaines caractéristiques individuelles. Des modèles de régression logistique ont été mis en œuvre entre les différentes variables dépendantes et les indicateurs acoustiques, en prenant en compte d'une part les facteurs de confusion

reconnus dans la littérature pour avoir une influence sur le sommeil, d'autre part les variables ayant des p-valeurs inférieures à 0,30 dans les analyses univariées avec toutes les variables dépendantes. D'après la littérature, les variables pouvant avoir une influence sur la qualité du sommeil sont : le sexe, l'âge, le statut matrimonial, le niveau d'éducation, l'indice de masse corporelle (IMC), la consommation de tabac, la consommation d'alcool, l'anxiété, la dépression, l'activité physique, l'état de santé général et la sensibilité au bruit. Les autres variables présentes dans le questionnaire et qui ont été introduites dans les modèles multivariés car ayant une p-valeur inférieure à 0,30 dans les analyses univariées sont : l'hypertension, les problèmes cardiaques, la fatigue physique, la fatigue nerveuse et l'horaire de travail (toujours le jour, toujours la nuit, variable).

IV. Étude sommeil

1. Population de l'étude

À l'issue de l'entretien avec l'enquêteur pour l'étude longitudinale, il a été demandé aux participants s'ils acceptaient de participer à l'étude dite « étude sommeil ». Ceux qui ont donné leur accord ont été inclus dans l'étude sommeil. Ont été exclus les individus ayant déclaré ronfler pendant leur sommeil ou partager leur chambre à coucher avec un ronfleur. Pour des raisons de sécurité du matériel de mesure extérieur, les participants vivant dans un logement situé en rez-de-chaussée et donnant sur la voie publique ont également été exclus. Au total 112 individus volontaires ont participé à l'étude sommeil : 92 riverains de l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle et 20 riverains de l'aéroport Toulouse-Blagnac. L'étude sommeil a été limitée à ces deux aéroports car une partie suffisante de leur population est exposée à des niveaux de bruit d'avion supérieurs à 55 dB(A) en termes de *Lden*, ce qui n'est pas le cas pour l'aéroport de Lyon-Saint-Exupéry.

2. Instrumentation

Quatre types de mesures ont été réalisés au domicile de chaque participant par un technicien de Bruitparif :

- Des mesures acoustiques à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre à coucher sur une durée de huit jours,

- Une mesure acoustique d'exposition individuelle sur une durée de 24 heures continues un jour ouvrable,
- Des mesures actimétriques pendant les huit nuits d'instrumentation acoustique, et
- Des enregistrements du rythme cardiaque pendant une nuit.

2.1. Mesures acoustiques à l'intérieur et à l'extérieur de l'habitat

L'exposition au bruit des avions au domicile des participants a été mesurée 24h sur 24h, pendant huit jours afin d'augmenter la probabilité de disposer de mesures de bruit pour les différentes configurations météorologiques et régimes d'activité des plateformes aéroportuaires. Deux sonomètres de classe métrologique 1 ont été installés systématiquement (Figure 7) : le premier en façade extérieure de la chambre à coucher pour détecter les événements acoustiques associés au bruit des avions, le second à l'intérieur de la chambre pour mesurer le niveau de bruit à l'intérieur (Figures 8).

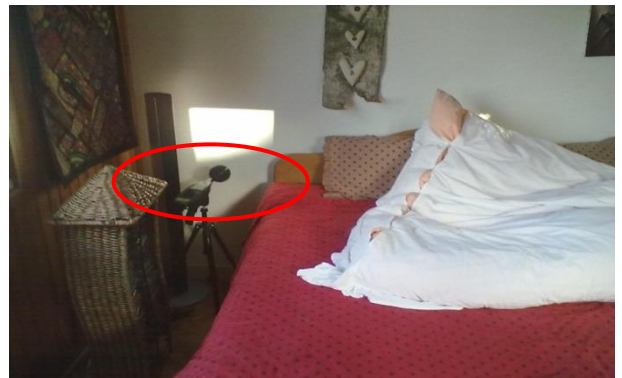


Source : <https://www.bruitparif.fr/>

Figure 7 – Sonomètre



Source : <https://www.bruitparif.fr/>



Figures 8 - Sonomètre situé en façade à l'extérieur de la chambre à coucher et sonomètre situé à l'intérieur de la chambre

À l'intérieur de la chambre, le microphone du sonomètre a été installé à proximité de la table du chevet du participant et à hauteur de l'oreiller afin de quantifier de façon très précise le bruit perçu par celui-ci lorsqu'il dort. En effet, Bruitparif (Centre d'évaluation technique de l'environnement sonore en Île-de-France) a démontré dans une étude pilote que le bruit mesuré au niveau de la table de chevet et donc à proximité d'une paroi de la chambre est supérieur de l'ordre de 2 dB(A) en moyenne au bruit mesuré dans les conditions de la norme pour la mesure à l'intérieur des bâtiments (Cf. NF S 31-010).

Le microphone du deuxième sonomètre a été fixé en façade de l'habitation, sous la fenêtre de la chambre à coucher. Le dispositif a été installé de façon à ne pas gêner la fermeture des volets et l'ouverture des fenêtres. Il a ainsi laissé la possibilité aux participants qui le souhaitent de dormir fenêtres ouvertes.

Les sonomètres ont été installés, paramétrés, calibrés et mis en marche par un technicien de Bruitparif, partenaire de DEBATS. Les horloges des deux sonomètres ont été synchronisées de manière à ce que le décalage temporel n'excède pas une seconde. Toutefois, la synchronisation temporelle est systématiquement vérifiée en post-traitement par analyse de l'intercorrélation entre les signaux délivrés par les deux sonomètres. Si nécessaire, le décalage temporel est corrigé.

Les données ont été récupérées et traitées par Bruitparif. Les données brutes collectées sont le *LAeq,1s* et le *Leq,1s* par bandes de fréquences tiers d'octaves. Les mesures réalisées à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre à coucher ont permis d'identifier les sources de bruit d'origine externe (aéronef, trafic routier, ferroviaire, bruit de la ville) des sources de bruit d'origine interne (les ronflements, les animaux domestiques, etc.). Fenêtres ouvertes, seuls les bruits d'origine aérienne sont facilement isolés grâce à la corrélation avec les traces radar fournies par la DGAC.

Bruitparif a développé un algorithme permettant de déduire, à partir de ces mesures, le bruit d'origine aérienne à l'intérieur de la chambre à coucher. L'algorithme repose sur cinq étapes :

1. Détermination sur le signal mesuré à l'extérieur, en façade du bâtiment, des événements acoustiques associés à des survols d'avions, sur une base de correspondance entre trajectoires radar fournies par la DGAC et émergences acoustiques observées.

2. Détermination, à partir du signal mesuré à l'intérieur de la chambre, des périodes influencées par le bruit des avions par corrélation temporelle avec les événements acoustiques identifiés comme des bruits d'avions sur le signal mesuré à l'extérieur.

Le graphique suivant illustre le principe de la détermination sur le signal sonore intérieur des périodes influencées par le bruit des aéronefs.

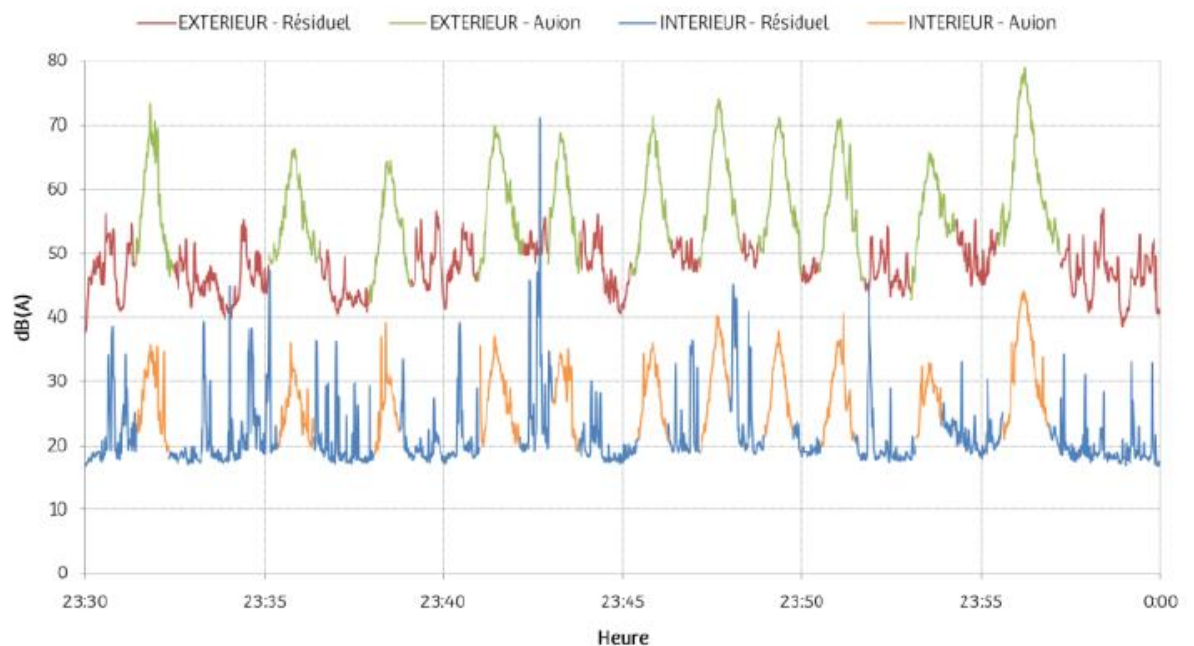
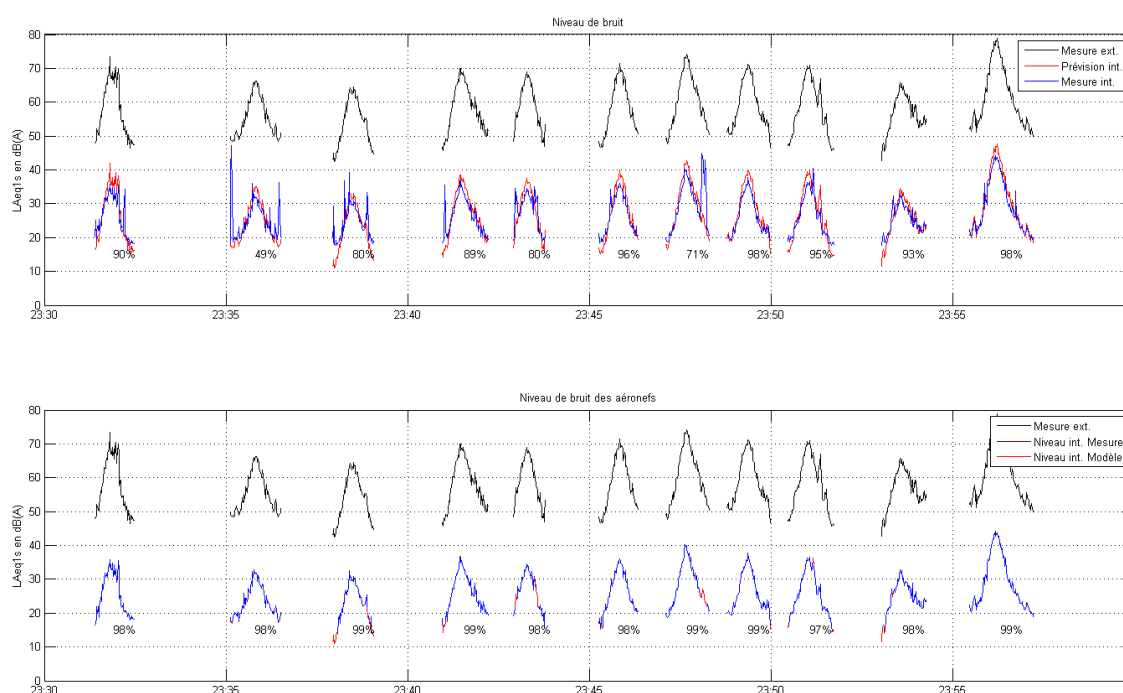


Figure 9 - Évolution temporelle du niveau sonore $LA_{eq,1s}$

3. Estimation d'une fonction de transfert extérieur / intérieur. Cette fonction a permis de déterminer le signal sonore, dans la chambre à coucher, dû exclusivement au bruit extérieur.
4. Réalisation d'une analyse statistique des évolutions temporelles simultanées des niveaux sonores à l'extérieur et à l'intérieur de l'habitat, et d'un filtrage des événements acoustiques d'origine intérieure (ronflements, réveils, animaux domestiques...) qui sont intervenus pendant le passage d'un avion. Ce filtrage repose sur la comparaison de l'estimation du signal sonore dû exclusivement au bruit extérieur dans la chambre à coucher (utilisation de la fonction de transfert) au signal mesuré à l'intérieur. Une différence significative entre les deux signaux correspond à la présence d'un bruit intérieur. Ce filtrage est nécessaire de manière à pouvoir produire des estimations fiables des indicateurs liés au bruit généré à l'intérieur de la chambre à coucher par les survols d'avions.

- Validation des résultats : un technicien de Bruitparif visualise systématiquement le résultat du traitement proposé sous forme d'un graphique d'évolution temporelle des niveaux sonores à l'extérieur et à l'intérieur de l'habitation, tel qu'illustré en [Figures 10](#). Plusieurs graphiques sont édités afin de couvrir l'intégralité de la période d'analyse. Cette opération permet de valider les résultats délivrés par l'algorithme de calcul et de les corriger le cas échéant.

Le graphique suivant montre le principe du filtrage du bruit autre qu'aéronef lors du passage d'un aéronef, sur le niveau sonore mesuré à l'intérieur de la chambre. Le coefficient de corrélation, exprimé en pourcentage, entre les évolutions temporelles des niveaux sonores à l'extérieur et à l'intérieur sont présentés pour chaque événement "aéronef". La suppression des pics de bruit d'origine intérieure permet d'obtenir un coefficient de corrélation supérieur à 98%.



Figures 10 - Évolution temporelle du niveau sonore LAeq,1s au cours des survols d'aéronefs identifiés – Illustration de la corrélation des niveaux extérieurs et intérieurs et du filtrage des bruits provenant de l'intérieur

De nombreux indicateurs acoustiques ont été produits à partir des mesures acoustiques réalisées au domicile des participants. Ils ont été estimés pour le bruit des avions seul mais aussi pour l'ensemble des sources de bruit, sur des périodes spécifiques. On distingue les indicateurs énergétiques (relatifs à la moyenne énergétique du bruit sur une période donnée), et les

indicateurs événementiels (caractéristiques et nombre d'événements ayant dépassé un niveau sonore donné).

La [Table 4](#) présente la liste des indicateurs acoustiques calculés pour chaque participant. Les indications « ext » et « int » distinguent respectivement les résultats à l'extérieur, en façade du logement et ceux à l'intérieur de la chambre. Les indicateurs acoustiques ont été produits sur la période du sommeil, c'est-à-dire entre l'endormissement et le réveil final, ainsi que sur différentes périodes de la journée à savoir 06h-18h, 18h-22h, 22h-06h, 22h-24h, 00h-05h et 05h-07h ([Table 5](#)).

Table 4 - Nomenclature des indicateurs acoustiques

N°	Variables acoustiques	Définition
X1	LAeq (ext)	Niveau de pression acoustique continu équivalent noté LAeq,T (toutes sources confondues)
X2	LAeq aero(ext)	LAeq,T partiel en façade de l'habitation (exclusivement bruit de aéronefs)
X3	LA90 (ext)	Niveau de bruit dépassé pendant 90% du temps
X4	% Contrib aero (ext)	Contribution du bruit des aéronefs au niveau de bruit global
X5	LAeq (int)	idem X1 mais à l'intérieur du logement
X6	LAeq aero (int)	idem X2 mais à l'intérieur du logement
X7	LA90 (int)	idem X3 mais à l'intérieur du logement
X8	% Contrib aero (int)	idem X4 mais à l'intérieur du logement
X9	N (ext)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs
X10	NA62 (ext)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 62 dB(A)
X11	NA65 (ext)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 65 dB(A)
X12	NA70 (ext)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 70 dB(A)
X13	N (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs
X14	NA30 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 30 dB(A)
X15	NA31 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 31 dB(A)
X16	NA32 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 32 dB(A)
X17	NA33 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 33 dB(A)
X18	NA34 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 34 dB(A)
X19	NA35 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 35 dB(A)
X20	NA36 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 36 dB(A)
X21	NA37 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 37 dB(A)
X22	NA38 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 38 dB(A)
X23	NA39 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 39 dB(A)
X24	NA40 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 40 dB(A)

X25	NA41 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 41 dB(A)
X26	NA42 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 42 dB(A)
X27	NA43 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 43 dB(A)
X28	NA44 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 44 dB(A)
X29	NA45 (int)	Nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 45 dB(A)
X30	T aero (ext)	Durée cumulée des événements sonores associés aux aéronefs
X31	SEL (ext)	Niveau sonore de l'ensemble des événements sonores associés aux aéronefs ramené sur 1 seconde
X32	L _{Amax,1s} (ext)	Niveau maximale atteint sur une seconde au passage d'un aéronef
X33	BdF 10 min précédentes (ext)	Bruit de fond 10 minutes avant un événement aéronef
X34	Emergence événementielle (ext)	Différence entre le niveau L _{Amax} et le niveau de bruit de fond précédant un événement aéronef
X35	T aero (int)	Idem X30 mais à l'intérieur du logement
X36	SEL (int)	Idem X31 mais à l'intérieur du logement
X37	L _{Amax,1s} (int)	Idem X32 mais à l'intérieur du logement
X38	BdF 10 min précédentes (int)	Idem X33 mais à l'intérieur du logement
X39	Emergence événementielle (int)	Idem X34 mais à l'intérieur du logement
X40	Indice Harmonica	Calculé pour le bruit ambiant total à l'extérieur du logement

Table 5 - Indicateurs acoustiques produits pour chaque jour de mesure et pour différentes périodes

22h-22h									
<i>Journée complète</i>	<i>par pas de 15 min</i>	<i>par pas de 60 min</i>	<i>06h-18h</i>	<i>18h-22h</i>	<i>22h-06h</i>	<i>22h-24h</i>	<i>00h-05h</i>	<i>05h-07h</i>	<i>Période de sommeil</i>
<i>LAeq,1s (ext)</i>					<i>LAeq (ext)</i>				
<i>LAeq aero,1s (ext)</i>					<i>LAeq aero(ext)</i>				
<i>LA90 (ext)</i>					<i>LA90 (ext)</i>				
<i>durée événement (ext)¹</i>					<i>% Contrib aero (ext)</i>				
<i>LAmx,1s (ext)¹</i>					<i>T aero (ext)</i>				
<i>SEL (ext)¹</i>					<i>LAeq (int)</i>				
<i>BdF dans les 10 min précédentes (ext)¹</i>					<i>LAeq aero (int)</i>				
<i>Emergence événementielle (ext)¹</i>					<i>LA90 (int)</i>				
<i>durée d'un événement (int)¹</i>					<i>% Contrib aero (int)</i>				
<i>LAmx,1s (int)¹</i>					<i>T aero (int)</i>				
<i>SEL (int)¹</i>					<i>N (ext)</i>				
<i>BdF dans les 10 min précédentes (int)¹</i>					<i>NA62 (ext), NA65 (ext) et NA70 (ext)</i>				
<i>Emergence événementielle (int)¹</i>					<i>N (int)</i>				
<i>Indice Harmonica</i>					<i>NA30 (int) à NA45 (int)</i>				

¹ Indicateurs produits pour chaque événement de bruit sur la journée. Ils existent également sur la période de sommeil

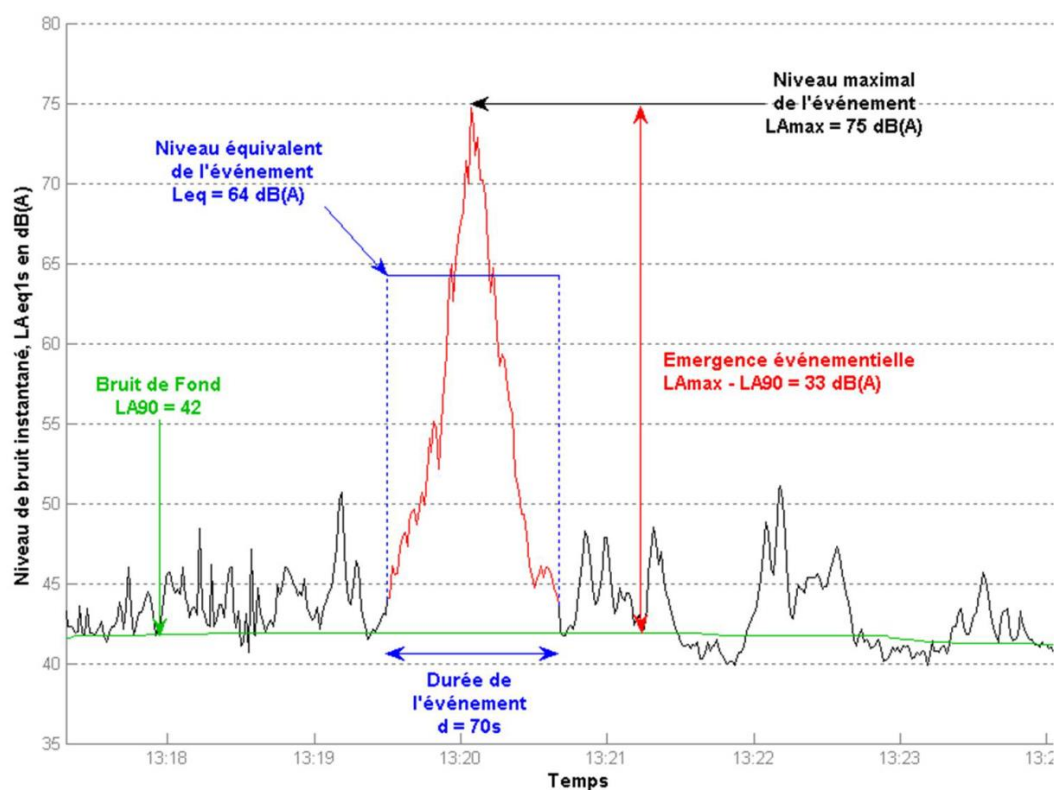
Parmi les indicateurs énergétiques, ont notamment été calculés le niveau de pression acoustique continu équivalent (LA_{eq}) à l'intérieur ($LA_{eq,int}$) et à l'extérieur ($LA_{eq,ext}$) de la chambre à coucher. Il s'agit du niveau énergétique moyen pour une période donnée : il correspond donc à une « dose de bruit » reçue pendant une période de temps déterminée. La contribution du bruit des avions au niveau de bruit global à l'intérieur ($\%Contrib,aero,int$) et l'extérieur de la chambre à coucher ($\%Contrib,aero,ext$) a également été évaluée.

Parmi les indicateurs événementiels, ont été déterminés, le nombre total d'événements de bruit d'avions à l'intérieur (NA_{int}) et à l'extérieur (NA_{ext}) de la chambre à coucher, notamment le nombre d'événements sonores attribués aux survols d'avions dépassant 30 dB(A) à l'intérieur de la chambre ($NA_{30,int}$) et 62 dB(A) à l'extérieur de la chambre à coucher ($NA_{62,ext}$).

Pour chaque événement de bruit des avions, à l'intérieur comme à l'extérieur de la chambre, des indicateurs événementiels sont calculés :

- Le niveau maximal observé sur une seconde associé au passage d'un aéronef (**$L_{Amax,1s}$**),
- Le niveau sonore global d'un événement aéronef ramené sur une seconde (**SEL**),
- Le bruit de fond 10 minutes avant un événement aéronef (**BdF dans les 10 min précédentes**),
- La différence entre le niveau L_{Amax} et le niveau de bruit de fond précédant un événement aéronef (**$émergence événementielle$**), et
- La période de temps au cours de laquelle le bruit ambiant est dominé par l'apparition de l'événement aéronef (**$durée de l'événement$**).

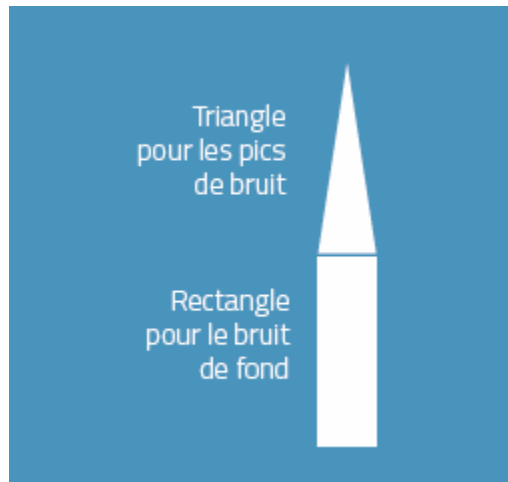
La **Figure 11** présentée ci-après illustre les indicateurs acoustiques déterminés lors du passage d'un aéronef.



Source : <https://www.bruitparif.fr/>

Figure 11 - Exemple d'un événement de bruit de type aéronef

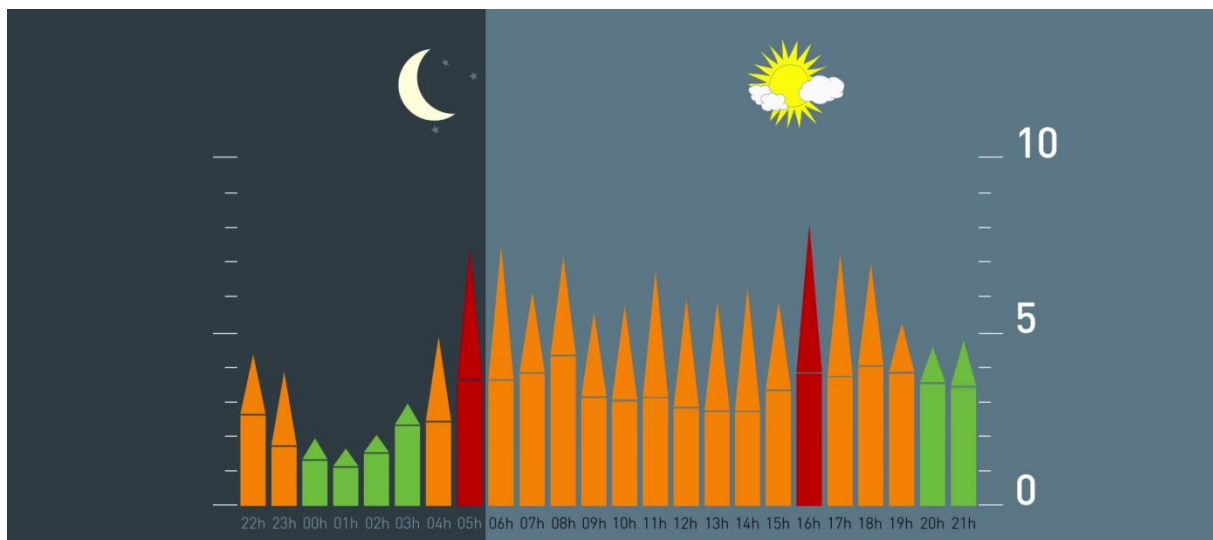
Un autre indicateur appelé Indice Harmonica [4] a également été calculé pour le bruit ambiant total à l'extérieur du logement. Il s'agit d'un indicateur de bruit construit par Bruitparif dans le cadre du programme européen Life Environnement. Cet indicateur permet de donner une information synthétique sur le niveau de pollution sonore à travers une note allant de 0 à 10 (plus cette note est élevée, plus l'environnement sonore est dégradé) et une représentation graphique basée sur les deux composantes de l'indice Harmonica : la première composante est associée au bruit de fond et la seconde aux événements sonores qui émergent de ce bruit de fond (Figure 12) [4]. Cette représentation graphique permet de facilement illustrer si le bruit est plutôt un bruit continu ou un bruit à forte composante événementielle.



Source : Bruitparif

Figure 12 - Indice Harmonica

La [Figure 13](#) est un exemple de variation horaire de l'indice Harmonica sur 24 heures. La couleur de l'indice (vert/orange/rouge) permet de situer l'environnement sonore par rapport aux objectifs de qualité de l'OMS et aux valeurs reconnues comme critiques pour le bruit. En vert, l'environnement sonore respecte les objectifs de qualité de l'OMS. En orange, l'environnement sonore dépasse les objectifs de qualité mais respecte les seuils reconnus comme critiques. Et en rouge, l'environnement sonore dépasse les seuils reconnus comme critiques. La taille de chaque composante de l'indice Harmonica permet d'illustrer si le bruit est plutôt un bruit continu ou un bruit à forte composante événementielle.



Source : Bruitparif

Figure 13 - Exemple de variation horaire de l'indice Harmonica sur 24 heures

2.2. Mesure d'exposition individuelle

Afin de déterminer l'exposition moyenne au bruit de chaque participant lorsqu'il n'est pas dans sa chambre à coucher, une mesure acoustique d'exposition individuelle a été réalisée grâce à un dosimètre de bruit sur une durée de 24 heures continue, pendant une journée ouvrable, représentative de l'activité habituelle du participant.

Les participants ont porté des dosimètres WED de la marque 01dB et de classe métrologique 2 (Figure 14). Ils l'ont porté à la ceinture pendant la journée et posé sur la table de chevet pendant la nuit. Le dosimètre a permis d'obtenir le niveau d'exposition au bruit des participants au pas de 1 seconde. Les données recueillies ont permis de retracer le profil temporel moyen de l'exposition sonore de chaque participant tout au long de sa journée.



Source : Bruitparif

Figure 14 - Dosimètre

En parallèle du port du dosimètre, les participants ont rempli une fiche de budget « espace-temps » qui a permis de retracer les types de lieux fréquentés et les activités menées au cours de la journée (Figure 15).







DATE

N° d'identification

N° dosimètre

10/10/2011

Position	Autour du cou ☐ A la ceinture ☐
----------	---

Mise en marche

- Presser brièvement la touche marche/arrêt
- La LED verte correspondante s'allume. Le signal lumineux est **permanent**.

Départ de la mesure

- Presser 5 secondes la touche marche/arrêt
- La LED verte marche/arrêt **clignote** toutes les secondes dès le début de la mesure.

Arrêt de la mesure et/ou de l'instrument

- Presser la touche marche/arrêt pendant environ 10 secondes. La mesure est stockée.
- Lors de l'arrêt du dosimètre, les LED calibrage, marche/arrêt et alarme clignotent en rouge pendant 5 secondes.

Heure de début	Heure de fin	Type d'activité	Lieu	Localisation	Observations
12h00	13h15	Repas	Restaurant d'entreprise ENTREPRISE X	Place de la République GONESSE	Salle très fréquentée, bruit perçu comme important

Etude DEBATS – Fiche Budget Espace Temps

Figure 15 - Fiche Budget Espace-Temps

Le niveau de pression acoustique continu équivalent (LA_{eq}) a été enregistré pour chaque seconde de la journée. Les niveaux moyens ont alors été calculés pour chaque heure et pour les périodes suivantes : 06h-18h, 18h-22h et 22h-06h. La [Figure 16](#) est un exemple des niveaux d'exposition moyens au bruit d'un participant pendant 24 heures mesurés au moyen du dosimètre.

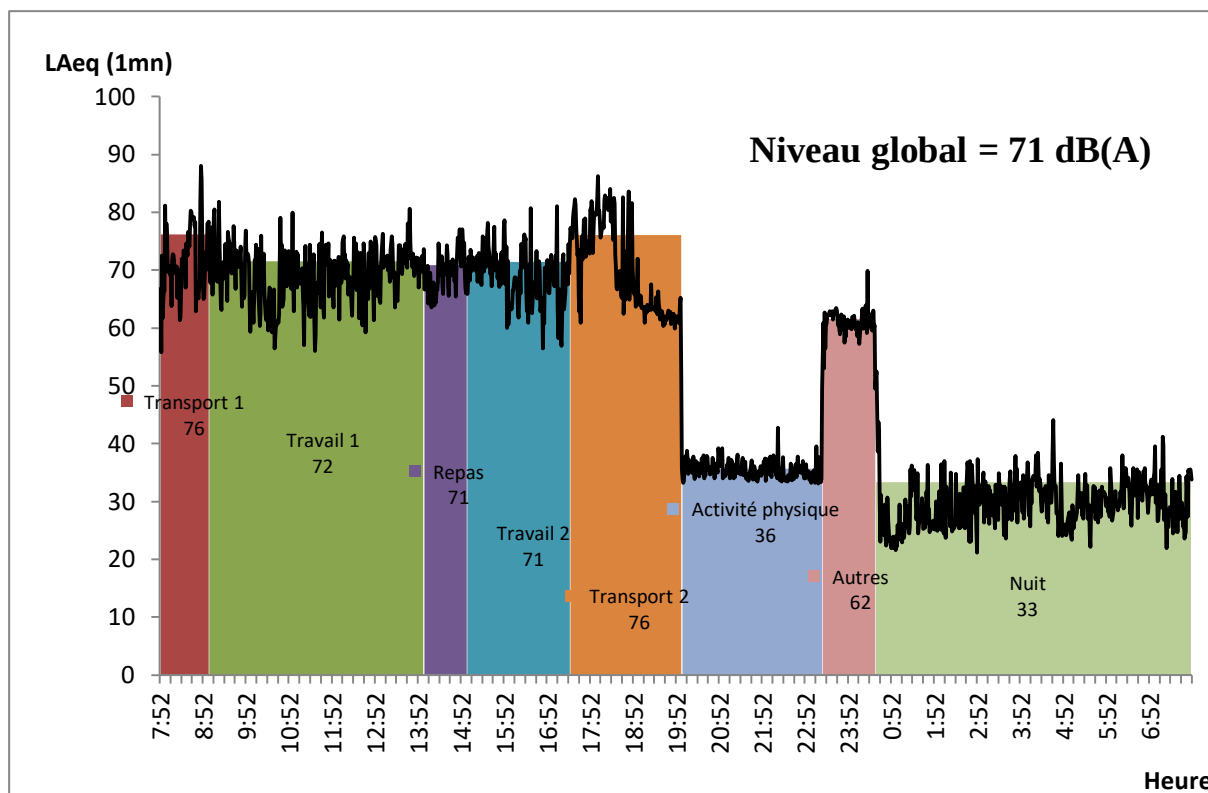


Figure 16 - Évolution temporelle du niveau $LA_{eq}(1mn)$ en fonction du temps : exemple de mesure individuelle de bruit effectuée à l'aide d'un dosimètre

2.3. Évaluation objective de la qualité du sommeil

En complément de la qualité subjective du sommeil évaluée à partir du questionnaire de l'étude longitudinale, des mesures actimétriques et de la fréquence cardiaque ont été réalisées au domicile des participants dans le cadre de l'étude sommeil afin d'évaluer la qualité objective de leur sommeil.

2.3.1. Mesures actimétriques

Chaque participant a porté un actimètre pendant la période d'instrumentation acoustique et a rempli un agenda du sommeil au lendemain de chacune des nuits de cette période (Figure 17).

Agenda du sommeil – *A remplir le matin au réveil*

N° D'IDENTIFICATION DEBATS | | | | |

N° ACTIMÈTRE

SEXE

ÂGE

	<i>Jour 1</i>	<i>Jour 2</i>	<i>Jour 3</i>	<i>Jour 4</i>	<i>Jour 5</i>	<i>Jour 6</i>	<i>Jour 7</i>
Jour de la semaine Date							
<u>Hier</u> , avez-vous fait des siestes ? Si oui, indiquez l'heure et la durée totale de la sieste (en minutes).							
Veuillez évaluer sur une échelle de 0 (= pas du tout) à 5 (= très importante) votre niveau de fatigue ou de somnolence d' <u>hier</u> .							
Des événements particuliers (activité physique, voyage, réunion, stress...) sont-ils survenus <u>hier</u> pendant la journée ? Si oui, veuillez les indiquer.							
<u>Hier</u> , avez-vous pris des médicaments pour dormir ? Si oui, veuillez indiquer le nom, la quantité et l'heure.							
<u>Hier</u> , à quelle heure vous êtes-vous couché(e) ?							
<u>Hier</u> , à quelle heure avez-vous éteint la lumière pour dormir ?							
<u>Hier</u> , en combien de minutes vous êtes-vous endormi(e) ?							
Si vous vous êtes réveillé(e) pendant cette nuit :							
1. A quelle heure vous êtes-vous réveillé(e) la première fois ?							
2. Combien de fois vous êtes-vous réveillé(e) ?							
3. Dans l'ensemble de la nuit, combien de temps êtes-vous resté(e) réveillé(e) ?							
Ce matin à quelle heure vous êtes-vous réveillé(e) ?							
Au total, combien de temps pensez-vous avoir dormi ?							
Ce matin, à quelle heure vous êtes-vous levé(e) ?							
Veuillez évaluer sur une échelle allant de 0 (= pas du tout reposant) à 5 (= très satisfaisant) la qualité de votre sommeil.							

Figure 17 - Agenda du sommeil

Un actimètre est une petite montre portée au poignet non dominant, sans fil et sans connecteur (Figure 18).



Source : Sleeptech

Figure 18 - Actimètre

Il enregistre le rythme activité-repos qui permet d'évaluer le rythme veille-sommeil. Il se compose d'un capteur qui permet de détecter les accélérations liées aux mouvements. Un quartz piézo-électrique mesure les accélérations du poignet qui génèrent une tension variable lors de chaque mouvement du sujet. Ces accélérations, supérieures à un seuil donné, sont comptées sur un intervalle de temps d'une minute et stockées avec leur moment de survenue. Une interface avec un ordinateur permet de paramétrer l'enregistreur, de relire et d'analyser les données. La classification en périodes d'activité ou de sommeil dépend du niveau de sensibilité de l'algorithme. Dans notre étude, une sensibilité dite « high » de l'actimètre avec une période d'une minute a été utilisée : un total de 20 mouvements est suffisant pour désigner la période par l'état « éveillé » [5], [6].

L'actimétrie, couplée avec l'analyse de l'agenda du sommeil, a permis de déterminer avec objectivité les paramètres horaires du sommeil : début, fin, durée, et d'évaluer l'activité motrice au cours du sommeil. À partir des mesures actimétriques, un technicien de Sleeptech a déterminé les paramètres objectifs du sommeil suivants :

- La latence d'endormissement (Sleep Onset Latency (SOL)) qui correspond au temps entre l'extinction des lampes et l'endormissement,
- Le temps d'éveil intra-sommeil (Wake After Sleep Onset (WASO)) qui correspond à la durée totale des éveils au cours de la nuit,
- Le temps passé au lit (Time in Bed (TB)) entre l'extinction des lampes et le lever final,
- La période totale du sommeil (Total Sleep Period (TSP)) qui correspond à la durée totale entre l'endormissement et le réveil final (la durée totale des éveils intra-sommeil n'est pas déduite),
- Le temps total de sommeil (Total Sleep Time (TST)) qui est le temps entre l'endormissement et le réveil final, moins la durée totale des éveils intra-sommeil,
- L'efficacité du sommeil (Sleep Efficiency (SE)) qui est le rapport entre le temps total de sommeil et la période totale du sommeil (TST / TSP). Autrement dit, il s'agit du pourcentage du temps réellement passé à dormir pendant la période totale du sommeil,

2.3.2. Enregistrement du rythme cardiaque

Les participants ont également porté un Actiheart pendant une nuit afin d'enregistrer leur rythme cardiaque. L'Actiheart est un appareil qui se fixe à l'aide de deux électrodes placées de part et d'autre du cœur et qui permet d'enregistrer la fréquence cardiaque et ses variations

(Figure 19). Les mesures de l'Actiheart ont ainsi permis de déterminer les battements de cœur par minute (bpm) de chaque participant pendant leur période de sommeil.



Figure 19 - Enregistreur du rythme cardiaque

3. Analyse statistique des données

Tous les paramètres objectifs de la qualité du sommeil ont été dichotomisés avant d'être mis en relation avec l'exposition au bruit des avions. Selon la troisième édition de la Classification Internationale des Pathologies du Sommeil (International Classification of Sleep Disorders (ICSD-3)) [7], une latence d'endormissement supérieure à 30 minutes pour un adulte est considérée comme une insomnie d'endormissement. La variable Sleep Onset Latency a donc été considérée en deux classes : $SOL \geq 30$ min versus $SOL < 30$ min. Wake After Sleep Onset a été dichotomisé en $WASO \geq 30$ min versus $WASO < 30$ min car d'après l'ICSD-3, une durée totale d'éveil supérieure à 30 minutes caractérise une insomnie de maintien du sommeil. Time in bed a été catégorisé en $TB > 9$ hr versus $TB \leq 9$ hr afin d'étudier le temps passé au lit par les sujets. TSP et TST ont été catégorisés en deux classes : "sommeil court" (< 6 hr) versus "sommeil normal ou long" (≥ 6 hr). En effet, chez les adultes, dormir moins de 6 heures par nuit pendant les jours de travail est généralement considéré comme un temps de sommeil court avec des comorbidités potentielles [8], [9]. SE a été dichotomisé en $< 90\%$ versus $\geq 90\%$ car un score de $SE < 90\%$ caractérise une insomnie.

Des corrélations ont été calculées entre les indicateurs de bruit et les paramètres objectifs de la qualité du sommeil. Les facteurs de risque connus dans la littérature pour avoir une influence sur le sommeil ont été recueillis, soit par questionnaire, soit grâce à des mesures objectives réalisées par les enquêteurs et ont été inclus dans les analyses multivariées finales. Ce sont le genre, l'âge, le statut matrimonial, le diplôme et l'indice de masse corporelle (IMC). Au vu du faible effectif de l'étude sommeil, une restriction du nombre de facteurs d'ajustement par rapport aux facteurs utilisés dans les modèles de l'étude longitudinale a été nécessaire afin que les modèles puissent converger.

Des modèles de régression logistique prenant en compte l'effet de répétition des données ont ensuite été mis en œuvre en considérant les paramètres actimétriques comme variables dépendantes, les indicateurs acoustiques et les facteurs de confusion potentiels cités précédemment comme covariables, pour évaluer les effets de l'exposition au bruit des avions sur les paramètres objectifs de la qualité du sommeil mesurés par l'actimètre. Les modèles ont été ajustés séparément pour chaque indicateur acoustique. Des analyses de sensibilité ont été réalisées en séparant les jours de la semaine et les deux jours du week-end.

Des modèles de régression linéaire mixte ont été ensuite mis en œuvre pour évaluer les effets de l'exposition au bruit des avions sur la fréquence cardiaque mesurée par l'Actiheart pendant le sommeil. Chaque indicateur acoustique et les facteurs de confusion potentiels cités précédemment ont été ajustés pour chaque modèle.

V. Références

- [1] Aéroports de Paris, ‘Exposition au bruit des avions: Aéroport Paris-Charles de Gaulle - Compte rendu annuel 2006’, 2007.
- [2] R. Foret, J.-C. Bruyere, and N. Yombo, ‘Etude empirique de la validité du Plan de Gêne Sonore de l’aéroport Lyon-Saint Exupéry’, Chambre de commerce et d’industrie de Lyon, Rapport d’étude du 12 septembre 2005, 2005.
- [3] L. LETINTURIER, S. MELEZE, M. LEFEVRE, and A. S. EVRARD, ‘DEBATS - Discussion sur les Effets du Bruit des Aéronefs Touchant la Santé- Bilan méthodologique. Décembre 2013’, IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l’Aménagement et des Réseaux, Research Report, Jan. 2014.
- [4] F. Mietlicki, C. Mietlicki, C. Ribeiro, P. Gaudibert, B. Vincent, and V. Gissinger, ‘New tools to inform the public about environmental noise in cities and to assist decision-making’, in Euro Noise, Maastricht, 2015.
- [5] E. J. W. V. Someren, ‘Improving actigraphic sleep estimates in insomnia and dementia: how many nights?’, *J. Sleep Res.*, vol. 16, no. 3, pp. 269–275, Sep. 2007.
- [6] M. Elbaz, K. Yauy, A. Metlaine, M. Martoni, and D. Leger, ‘Validation of a new actigraph motion watch versus polysomnography on 70 healthy and suspected sleepdisordered subjects’, *J. Sleep Res.*, vol. 21, no. 1, p. 218, 2012.
- [7] International classification of sleep disorders – Third Edition (ICSD-3), 3rd ed. American Academy of Sleep Medicine, 2014.
- [8] F. P. Cappuccio, L. D’Elia, P. Strazzullo, and M. A. Miller, ‘Sleep Duration and All-Cause Mortality: A Systematic Review and Meta-Analysis of Prospective Studies’, *Sleep*, vol. 33, no. 5, pp. 585–592, May 2010.
- [9] L. M. Kurina, M. K. McClintock, J.-H. Chen, L. J. Waite, R. A. Thisted, and D. S. Lauderdale, ‘Sleep duration and all-cause mortality: a critical review of measurement and associations’, *Ann. Epidemiol.*, vol. 23, no. 6, pp. 361–370, Jun. 2013.

PARTIE 3 : RÉSULTATS

I. Description de l'étude longitudinale et de l'étude sommeil

1. Étude longitudinale

1.1. Description de la population de l'étude

Au total, 1 244 personnes âgées de 18 ans et plus et vivant dans l'une des 161 communes incluses dans la zone d'étude de DEBATS (Cf. II.2) ont participé à l'étude longitudinale. Près de la moitié des participants vit au voisinage de l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle, 33% à proximité de Toulouse-Blagnac et 17% autour de Lyon-Saint-Exupéry. La [Table 6](#) ci-dessous présente pour chacun des trois aéroports la répartition des participants dans les quatre classes d'exposition au bruit des avions. Conformément aux objectifs de recrutement, le nombre de participants est bien le même dans chaque zone d'exposition au bruit des avions. Le taux de participation à l'étude longitudinale s'élève à 30% (1 244 participants / 4 202 personnes éligibles). Il est similaire dans les quatre zones d'exposition au bruit des avions mais diffère selon l'aéroport : 26% à Paris-Charles de Gaulle, 34% à Toulouse-Blagnac et 39% à Lyon-Saint-Exupéry.

Table 6 - Répartition des participants dans les quatre classes d'exposition au bruit des avions

	Zone de bruit (<i>Lden</i>)				Total
	<50 dB(A)	50-54 dB(A)	55-59 dB(A)	>60 dB(A)	
Paris-Charles de Gaulle	108	102	208	202	620
Toulouse-Blagnac	104	103	101	103	411
Lyon-Saint-Exupéry	105	102	5	1	213
Total	317	307	314	306	1244

Les profils démographiques, socio-économiques et d'exposition au bruit des avions sont relativement similaires chez les participants à l'étude longitudinale, chez les personnes qui ont répondu au questionnaire de refus (non-participants) et dans la population d'étude ([Table 7](#)). La proportion de femmes chez les participants est un peu plus élevée (56%) que la population d'étude (52%). Les individus les plus jeunes (18-34 ans) et les plus âgés (75 ans et plus) sont moins nombreux parmi les participants (18% et 6%) que dans la population d'étude (26% et 10%). Chez les participants, les cadres (18%) et les professions intermédiaires (18%) sont plus

nombreux et les retraités moins nombreux (27%) que chez les non participants (13%, 4% et 38% respectivement). Chez les participants, la proportion des employés est plus élevée (22%) et celle des ouvriers (6%) et des inactifs (6%) moins élevée que dans la population d'étude (17%, 13% et 17% respectivement).

Table 7 - Comparaison des profils démographiques et socio-économiques des participants, des non participants et de la population d'étude

	Participants		Non participants¹		Population d'étude²
	n	%	n	%	%
Zone de bruit (Lden)					
<50 dB(A)	317	25%	688	28%	-
50-54 dB(A)	307	25%	498	20%	-
55-59 dB(A)	314	25%	625	25%	-
60 dB(A) et plus	306	25%	666	27%	-
Sexe					
Homme	549	44%	1028	41%	48%
Femme	695	56%	1449	59%	52%
Age					
18-34 ans	226	18%	497	20%	26%
35-44 ans	236	19%	435	18%	17%
45-54 ans	266	21%	416	17%	19%
55-64 ans	260	21%	448	18%	15%
65-74 ans	185	15%	332	13%	13%
75 ans et plus	71	6%	331	13%	10%
Statut Marital					
Célibataire	253	20%	555	22%	-
Marié(e)/Concubin	782	63%	1326	54%	-
Veuf/veuve	76	6%	281	11%	-
Divorcé(e)/séparé(e)	133	11%	194	8%	-
Autre	0	0%	10	0%	-
Situation inconnue/refus	0	0%	111	5%	-

	Participants		Non participants¹		Population d'étude²
	n	%	n	%	%
CSP					
Agriculteur	3	0%	6	0%	1%
Artisan, commerçant, chef d'entreprise	29	2%	75	3%	4%
Cadre, profession intellectuelle supérieure	227	18%	322	13%	9%
Profession intermédiaire	220	18%	103	4%	14%
Employé	268	22%	749	30%	17%
Ouvrier	79	6%	145	6%	13%
Retraité	337	27%	929	38%	25%
Inactif	81	7%	134	5%	17%
Situation inconnue/refus	0	0%	14	1%	-

¹ Personnes tirées au sort et contactées mais ayant refusé de participer. Ces sujets ont cependant accepté de répondre à un court questionnaire de refus concernant leurs caractéristiques démographiques et socioéconomiques.

² La répartition de la population d'étude est basée sur des données du recensement Insee 1999, redressées en 2007, concernant les individus âgés de 18 ans et plus résidant dans l'une des 161 communes de la zone d'étude.

1.2. Description de l'exposition au bruit des avions

La [Figure 20](#) montre la distribution des niveaux de bruit selon l'indicateur Ln_{night}. Les niveaux de bruit la nuit sont plus élevés à proximité de l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle, suivi de Toulouse-Blagnac et enfin de Lyon-Saint-Exupéry, avec une différence de 4 dB(A) en moyenne à chaque fois.

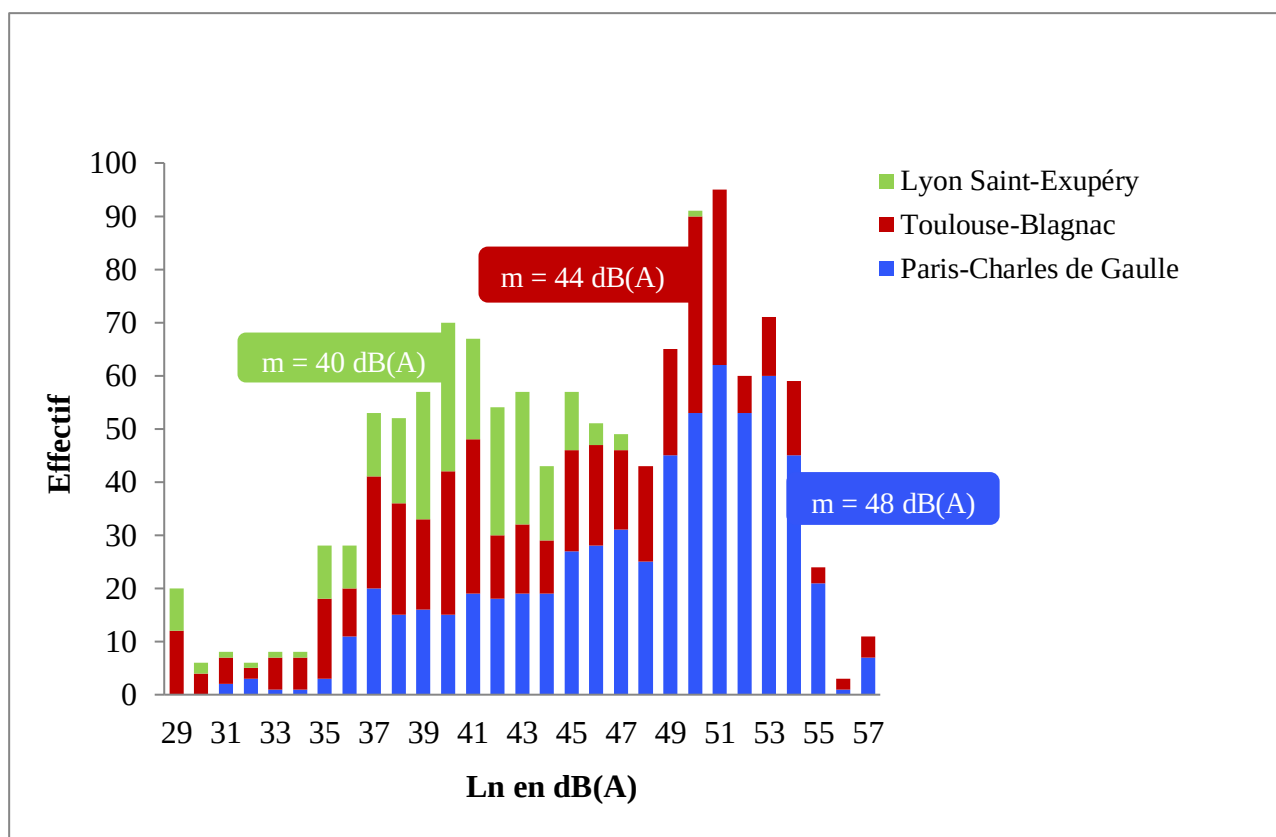


Figure 20 - Répartition des niveaux de bruit selon l'indicateur Lnight

La [Table 8](#) décrit les caractéristiques des quatre indicateurs acoustiques estimés pour chaque participant de l'étude longitudinale, pour chacun des trois aéroports. Le niveau moyen du bruit des avions pendant une journée complète (LAeq24h) est de 51 dB(A). En prenant en compte la différence de perception selon la période de la journée, le niveau moyen du bruit des avions pendant une journée complète (Lden) de 54 dB(A). Le niveau moyen du bruit des avions pendant la journée (LAeq, 6h-22h) est de 52 dB(A). Le niveau moyen du bruit des avions la nuit (Lnight) est lui estimé à 45 dB(A). À Paris-Charles de Gaulle, les niveaux moyens de bruit des avions, quel que soit l'indicateur, sont légèrement supérieurs aux niveaux moyens totaux. À Lyon-Saint-Exupéry, les niveaux sont inférieurs et à Toulouse-Blagnac, les niveaux sont quasiment similaires aux niveaux moyens totaux.

Table 8 - Description des quatre indicateurs de bruit estimés dans l'étude longitudinale

	<i>LAeq24h</i>			<i>Lden</i>			<i>LAeq, 6h-22h</i>			<i>Lnight</i>		
	Moyenne (Ecart- type)	5e - 95e centile		Moyenne (Ecart- type)	5e - 95e centile		Moyenne (Ecart- type)	5e - 95e centile		Moyenne (Ecart- type)	5e - 95e centile	
PCG	52 (5)	44 - 58		56 (5)	46 - 62		53 (5)	43 - 60		48 (6)	37 - 54	
TB	51 (6)	44 - 60		54 (6)	44 - 63		52 (6)	40 - 61		44 (7)	31 - 54	
LSE	46 (2)	44 - 50		49 (3)	44 - 54		46 (4)	39 - 51		40 (4)	31 - 45	
Total	51 (5)	44 - 58		54 (6)	44 - 62		52 (6)	42 - 60		45 (6)	35 - 54	

PCG = Paris-Charles de Gaulle ; TB = Toulouse-Blagnac ; LES = Lyon-Saint-Exupéry

2. Étude sommeil

2.1. Description de la population de l'étude

Parmi les participants de l'étude longitudinale, 112 individus ont accepté de participer à l'étude sommeil : 91 riverains de l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle et 21 riverains de l'aéroport de Toulouse-Blagnac.

Les participants à l'étude sommeil ont un profil relativement similaire à celui des participants de l'étude longitudinale (Table 9). La proportion de femmes est presque la même dans les deux études. Cependant, les participants à l'étude sommeil sont plus nombreux dans les classes d'exposition au bruit des avions les plus élevées (55-59 et >60 dB(A)). Ils sont également un peu plus jeunes (30% de 55 ans et plus et 42% dans l'étude longitudinale). La proportion de retraités est plus faible dans l'étude sommeil (21%) que dans l'étude longitudinale (27%) alors que celle des employés et des ouvriers est plus élevée dans l'étude sommeil (28% et 10% respectivement) que dans l'étude longitudinale (22% et 6% respectivement).

Table 9 - Comparaison des profils démographiques et socio-économiques des participants de l'étude sommeil et ceux de l'étude longitudinale

	Étude sommeil		Étude longitudinale	
	n	%	n	%
Zone de bruit (Lden)				
<50 dB(A)	18	16%	317	25%
50-54 dB(A)	24	21%	307	25%
55-59 dB(A)	39	35%	314	25%
60 dB(A) et plus	31	28%	306	25%
Sexe				
Homme	47	42%	549	44%
Femme	65	58%	695	56%
Age				
18–34 ans	32	29%	226	18%
35–44 ans	19	17%	236	19%
45–54 ans	27	24%	266	21%
55–64 ans	17	15%	260	21%
65–74 ans	9	8%	185	15%
75 ans et plus	8	7%	71	6%
Statut Marital				
Célibataire	39	35%	253	20%
Marié(e)/Concubin	53	47%	782	63%
Veuf/veuve	4	4%	76	6%
Divorcé(e)/séparé(e)	16	14%	133	11%
Autre	0	0%	0	0%
Situation inconnue/refus	0	0%	0	0%
CSP				
Agriculteurs	0	0%	3	0%
Artisan, commerçant, chef d'entreprise	3	3%	29	2%
Cadre, profession intellectuelle supérieure	17	15%	227	18%
Profession intermédiaire	19	17%	220	18%
Employé	31	28%	268	22%
Ouvrier	11	10%	79	6%
Retraité	24	21%	337	27%
Inactif	7	6%	81	7%
Situation inconnue/refus	0	%	0	0%

2.2. Description de l'exposition au bruit des avions

Cf. Table 18 Page 189.

Les niveaux moyens de bruit des avions la nuit estimés grâce aux cartes de bruit à l'adresse des 112 participants de l'étude sommeil sont relativement similaires à ceux calculés à partir des mesures acoustiques réalisées en façade extérieure de la chambre à coucher de ces participants (Table 10).

Table 10 - Comparaison des niveaux de bruit estimés et mesurés en termes de L_{night}

	Paris-Charles de Gaulle		Toulouse-Blagnac	
	Moyenne (Ecart-type)	5e - 95e percentile	Moyenne (Ecart-type)	5e - 95e percentile
<i>L_{night} estimé</i>				
<i>(étude longitudinale)</i>	48 (5)	37 - 54	43 (8)	29 - 54
<i>L_{night} mesuré</i>				
<i>(étude sommeil)</i>	48 (7)	37 - 56	41 (8)	28 - 56

II. Effets de l'exposition au bruit des avions sur les paramètres subjectifs de la qualité du sommeil des riverains des aéroports français

Ali-Mohamed Nassur, Marie Lefèvre, Bernard Laumon, Damien Léger, Anne-Sophie Evrard (2017): Aircraft Noise Exposure and Subjective Sleep Quality: The Results of the DEBATS Study in France, Behavioral Sleep Medicine, DOI: 10.1080/15402002.2017.1409224

Aircraft noise exposure and subjective sleep quality: the results of the DEBATS study in France

Ali-Mohamed Nassur^a, Marie Lefèvre^a, Bernard Laumon^b, Damien Léger^c, and Anne-Sophie Evrard^a

^aUniv Lyon, Université Claude Bernard Lyon1, IFSTTAR, UMRESTTE, UMR T_9405, Bron, France

^bHealth and Safety Department, Bron, France;

^cUniversité Paris Descartes, Sorbonne Paris Cité, APHP, Hôtel-Dieu de Paris, Centre du Sommeil et de la Vigilance et EA 7330 VIFASOM, Paris, France

Abstract

Background: Exposure to aircraft noise has been shown to have adverse effects on health, particularly on sleep. Exposure to nighttime aircraft noise clearly affects sleep architecture, as well as subjective sleep quality.

Objectives: This study aimed to investigate the relationship between aircraft noise exposure and subjective sleep quality in the population living near airports in France.

Methods: A total of 1,244 individuals older than 18 and living near three French airports (Paris-Charles de Gaulle, Lyon-Saint-Exupéry and Toulouse-Blagnac) were randomly selected to participate in the study. Information on sleep as well as health, socioeconomic and lifestyle factors was collected by means of a face-to-face questionnaire performed at their place of residence by an interviewer. For each participant, aircraft noise exposure was estimated at home using noise maps. Logistic regression models were used with adjustment for potential confounders.

Results: Aircraft noise exposure was significantly associated with a short total sleep time (TST) (≤ 6 h) and with the feeling of tiredness while awakening in the morning. An increase of 10

dB(A) in aircraft noise level at night was associated with an OR of 1.63 (95%CI: 1.15-2.32) for a short TST and an OR of 1.23 (95%CI: 1.00-1.54) for the feeling of tiredness while awakening in the morning.

Conclusions: These findings contribute to the overall evidence suggesting that aircraft noise exposure at nighttime may decrease the subjective amount and quality of sleep.

Key words: Epidemiology; aircraft noise exposure; sleep quality

1. INTRODUCTION

Sleep is essential for physical and mental well-being. Sleep has a restorative function on physical and mental fatigue, helps to maintain metabolism and is one of the most important factors responsible for the maintenance of a healthy organism, thus representing a homeostatic need required for life. Sleep satisfaction is increasingly disturbed by external aggressions, voluntarily or not, among which noise is a major cause.

Transportation noise is a major source of environmental noise pollution, and it represents a major public health issue. According to the World Health Organization (WHO), transportation noise is estimated to cause at least one million healthy life years lost every year in Western Europe, and sleep disorders are the most serious consequence with more than 900 thousand years of life lost every year, mostly related to road traffic noise [1]. In addition, poor sleep, especially short sleep (< 6 hours), has been found to be associated with many major comorbidities, e.g., obesity, hypertension, type 2 diabetes, cardiovascular disease, depression, and increased risk of mortality [2]–[10].

Aircraft noise in particular is perceived as a major environmental stressor in the vicinity of airports, and the impact of the long-term exposure to aircraft noise on health is of growing concern [11] because of a steady rise in flights and a population increasingly dissatisfied with this noise [12].

Several studies have already been conducted on the effects of aircraft noise on sleep; however, most of these studies are cross-sectional, with few prospective studies [13], [14]. In both laboratory and field studies, exposure to aircraft noise has been shown to disrupt sleep [14]–[16]. Exposure to nighttime aircraft noise leads to an increased frequency of awakening, increased motility, decreased slow wave sleep, changes in sleep structure, use of sleep drugs or sedatives, and a poor self-reported quality of sleep [14]. An increased time for falling asleep, a decreased total sleep duration and an increased feeling of being tired while awakening in the morning have also been reported [14], [16].

In France, however, the effects of aircraft noise exposure on sleep quality in the population living near airports have never been prospectively evaluated. The objective of the DEBATS research program (Discussion on the health effects of aircraft noise) is to characterize and quantify the effects of long-term aircraft noise exposure on health, especially on sleep disturbance, among the French population living in the vicinity of airports. The study includes

a longitudinal field study that aims to follow-up approximately 1,200 French airport residents over four years. The participants were interviewed in 2013 and in 2015 and were again interviewed in 2017.

Based on data collected in 2013 when the participants were included in the study, the present paper more specifically addresses the issue of an association between aircraft noise exposure and subjective sleep quality.

2. METHODS

2.1. Study population

The DEBATS study population included people older than 18 years of age at the time of the first interview, living near one of the following three French international airports: Paris-Charles de Gaulle, Lyon Saint-Exupéry, and Toulouse-Blagnac. In total, 1,244 participants (549 men and 695 women) were initially included in the main study [17]. For their inclusion in the study in 2013, these participants filled out a questionnaire during a face-to-face interview at their place of residence. Information was collected by an interviewer on demographic variables, socioeconomic status, lifestyle factors, including smoking, alcohol consumption, and physical activity, personal medical history in terms of sleep disturbances, cardiovascular diseases, anxiety, depressive disorders, medication use, and finally annoyance due to noise exposure. Blood pressure and anthropometric measurements (weight, height and waist circumference) were also recorded, and saliva samples were also taken to determine cortisol levels. This procedure is described in detail elsewhere [17], [18].

2.2. Aircraft noise exposure assessment

The French Civil Aviation Authority for Toulouse-Blagnac and Lyon Saint-Exupéry airports and Paris Airports produce outdoor noise exposure maps with the “Integrated Noise Model” (INM) [19]. The INM is an internationally well-established computer model that evaluates aircraft noise impacts in the vicinity of airports and outputs noise contours for an area ([Figure 21](#)). Based on aircraft performance data, noise emissions and propagation were modeled by the INM using input data such as estimated air traffic, applicable air traffic control procedures (including flight track dispersion), infrastructure in use at the airport, topography and weather conditions. The values of different noise indicators were then estimated at different grid points. Aircraft noise exposure was assessed in 1-dBA intervals for each participant with a linkage

between the noise contours and their home address using a geographic information system (GIS) technique. The following four noise indicators using three different periods of the day were derived and used in the statistical analyses: the average sound level for 24 hr ($L_{Aeq,24hr}$), the average during the day and the evening ($L_{Aeq,6hr-22hr}$), the average during the night (L_{night}), and finally the weighted average of sound levels (L_{den}) from day (06:00 to 18:00), evening (18:00 to 22:00) and night (22:00 to 06:00), where evening and night sound pressure levels receive a 5 dB(A) and a 10 dB(A) penalty respectively to reflect the extra sensitivity to noise during the evening and the night. L_{den} is the “general purpose” indicator defined in EU-directive 2002/49 relating to the assessment and management of environmental noise. The L_{den} indicator was used to select the participants ([Table 11](#)).

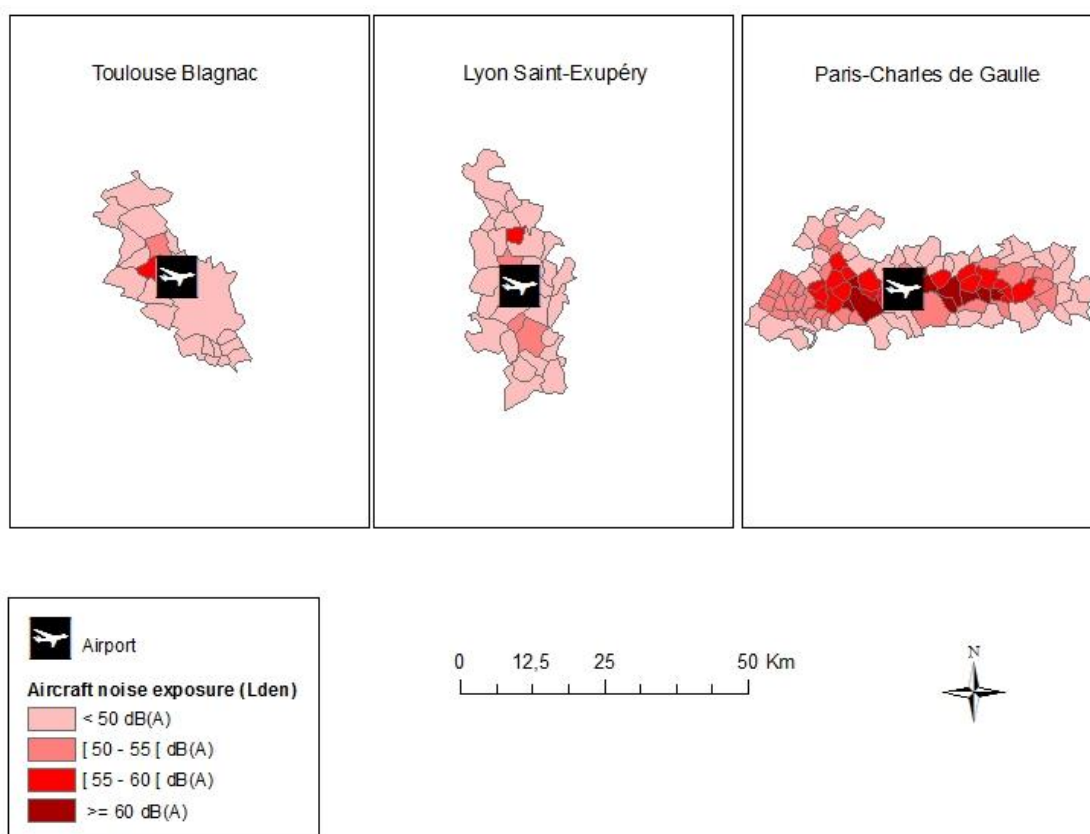


Figure 21 - Noise maps for the three French airports under study

2.3. Sleep assessment

Sleep was assessed subjectively based on the following two items:

- “At what time do you usually go to bed to sleep on a weeknight (off light)?”
- “At what time do you usually get up on a weeknight?”

Total sleep time (TST) was calculated as the difference between the time of going to sleep and the time of getting up. TST was then categorized into two classes, “short TST” (≤ 6 hours) versus “normal and long TST” (> 6 hours). Indeed, in adults, sleeping less than 6 hours during working days is usually considered as the “cut off” for “short TST” with potential comorbidities [3], [20].

In the questionnaire, the participants also characterized how they felt while awakening after a usual night sleep as follows: well rested, rather rested, rather tired or very tired. This variable was then categorized into the following two classes: well/rather rested versus rather/very tired.

2.4. Confounding factors

The following several factors that are known to affect subjective sleep quality were obtained from the questionnaire and were included in the multivariate regression model [21]–[24] (M1 model): age (continuous), gender (dichotomous), education (three categories: <French high school certificate/=French high school certificate/>French high school certificate), marital status (four categories: single/married/widowed/divorced), smoking habits (four categories: non/ex/occasional/daily smoker), alcohol consumption (four categories: no/light/moderate/heavy drinker), physical activity (no/yes), self-reported health (two categories: fair or poor /good or excellent), body mass index (BMI, body weight divided by height squared, three categories: obesity/ overweight/underweight or normal weight), self-reported anxiety (two categories: extremely or a lot/moderately, slightly or not at all), self-reported depression (two categories: extremely or a lot/moderately, slightly or not at all), and sensitivity to noise (three categories: less sensitive than/as sensitive as/more sensitive than people around you). Household monthly income (three categories: < 2300; 2300-4000; ≥ 4000 euro) was also introduced in the M1 model, instead of education level.

Other potential confounders with a p-value of 0.30 or less in univariate analyses were entered in the multivariate model (M1 model) as follows: work schedule (four categories: always during the night/always during the day/shift work/not applicable), physical tiredness (two categories: extremely or a lot/moderately, slightly or not at all), nervous tiredness (two categories: extremely or a lot/moderately, slightly or not at all), cardiovascular disease (no/yes), and hypertension (no/yes).

As annoyance may be an intermediate step in the causal chain between aircraft noise exposure and subjective sleep quality, annoyance from aircraft noise exposure (two categories: extremely

or a lot / moderately, slightly or not at all annoyed) was then added in the fully adjusted regression model (M2 model).

The analyses were also restricted to the 991 participants who resided at their address for at least 5 years.

2.5. Statistical analyses

The age-standardized prevalence for a short TST and for the feeling of tiredness while awakening was calculated for each gender and both genders together using as the standard population the age structure of the French population in 2012 derived from the French national census.

Logistic regression models with short TST or the feeling of tiredness while awakening as the outcome variable and aircraft noise exposure and confounders as covariates were used to assess the associations between aircraft noise and subjective sleep quality. Linear regression models with sleep duration as the outcome variable were also used to estimate the association between aircraft noise exposure and sleep duration. These models were adjusted on the same confounders as those included in the logistic regression models. The results and their discussion are presented in a supplementary Table.

The linearity of the relationship between the dependent variable and aircraft noise exposure was tested using generalized additive models, including a smooth cubic function with linear and quadratic terms for aircraft noise exposure [25]. As the quadratic term was not significant in these models, associations with the continuous exposure variable per 10 dB(A) increase were finally estimated and presented in the present paper.

Statistical analyses were conducted using SAS version 9.4 (SAS Software [program] 9.4 version. USA: Cary North Carolina, USA 2014).

3. RESULTS

The age-standardized prevalence (to the French population) of a short TST (≤ 6 hr) was 11% in men and 7% in women. The sex- and age-standardized prevalence of a short TST was 9%. The percentage of participants with a short TST was significantly higher for aircraft noise levels higher than 60 dB(A) (L_{den}) compared to those lower than 55 dB(A) (L_{den} ; $p=0,05$) ([Table 11](#)).

The age-standardized prevalence (to the French population) of the feeling of tiredness while awakening in the morning after a night's sleep was 22% in men and 35% in women. The sex- and age-standardized prevalence of the feeling of tiredness while awakening was 30%. The percentage of participants feeling rather/very tired while awakening was not significantly higher for those with aircraft noise levels higher than 60 dB(A) (L_{den}) compared to those with aircraft noise exposure lower than 55 dB(A) (L_{den} ; $p=0.50$) (Table 11).

Table 11 - Distribution of the participants with a short total sleep time (TST) or feeling rather or very tired on awakening in the four levels of aircraft noise

	Aircraft noise exposure				Total	p-value
	[L _{den} (dB(A))]					
	< 50	50 - 54	55 - 59	≥ 60		
Short TST (≤ 6hr): n (%)	20 (18)	24 (21)	30 (27)	38 (34)	112	0.05
Participants feeling rather or very tired on awakening: n (%)	90 (24)	84 (23)	94 (26)	100 (27)	368	0.50

Table 12 - Odds ratios for the relationship between a short total sleep time (TST) or the feeling of tiredness on awakening and the major a priori confounders.

	Short TST		Feeling of tiredness on awakening	
	M1 model ¹	M2Model ²	M1 Model ¹	M2 Model ²
	OR (95%CI)	OR (95%CI)	OR (95%CI)	OR (95%CI)
Gender				
Women	1.00	1.00	1.00	1.00
Men	1.83 (1.16-2.89)	1.84 (1.16-2.90)	0.64 (0.47-0.87)	0.64 (0.47-0.86)
Age	0.99 (0.97-1.01)	0.99 (0.97-1.01)	0.98 (0.97-1.00)	0.98 (0.97-1.00)
Education				
< French high school certificate	1.00	1.00	1.00	1.00
French high school certificate	1.10 (0.67-1.83)	1.10 (0.66-1.83)	1.07 (0.76-1.51)	1.07 (0.76-1.51)
> French high school certificate	0.90 (0.51-1.60)	0.90 (0.51-1.60)	0.62 (0.43-0.90)	0.63 (0.43-0.91)
Marital status				
Single	1.00	1.00	1.00	1.00
Married	0.58 (0.34-0.98)	0.58 (0.35-0.98)	0.98 (0.67-1.42)	0.97 (0.66-1.4)
Widowed	0.16 (0.02-1.31)	0.16 (0.02-1.30)	0.73 (0.33-1.58)	0.73 (0.34-1.61)
Divorced	0.68 (0.31-1.47)	0.68 (0.31-1.47)	0.78 (0.45-1.35)	0.77 (0.44-1.34)
Smoking habits				
Non-smoker	1.00	1.00	1.00	1.00
Ex-smoker	1.14 (0.65-1.99)	1.14 (0.65-2.00)	0.95 (0.67-1.35)	0.94 (0.66-1.32)
Occasional smoker	0.76 (0.09-6.24)	0.77 (0.09-6.28)	1.99 (0.72-5.54)	1.92 (0.69-5.38)
Daily smoker	2.22 (1.34-3.67)	2.22 (1.34-3.68)	0.91 (0.63-1.32)	0.89 (0.61-1.29)
Alcohol consumption				
No	1.00	1.00	1.00	1.00
Light	0.99 (0.61-1.61)	0.99 (0.61-1.61)	1.13 (0.81-1.57)	1.13 (0.81-1.58)
Moderate	0.74 (0.35-1.56)	0.74 (0.35-1.56)	1.16 (0.73-1.85)	1.14 (0.72-1.83)
Heavy	0.63 (0.18-2.28)	0.63 (0.18-2.27)	1.31 (0.64-2.73)	1.38 (0.67-2.86)
Physical activity				
No	1.00	1.00	1.00	1.00
Yes	0.94 (0.6-1.46)	0.94 (0.6-1.47)	0.97 (0.72-1.30)	0.95 (0.70-1.28)
Self-reported health				
Good or excellent	1.00	1.00	1.00	1.00
Fair or poor	1.57 (0.84-2.93)	1.57 (0.84-2.94)	1.92 (1.27-2.90)	1.91 (1.27-2.89)
BMI				
Underweight or normal weight	1.00	1.00	1.00	1.00
Overweight	1.03 (0.62-1.69)	1.02 (0.62-1.68)	0.89 (0.64-1.25)	0.89 (0.64-1.24)
Obesity	0.94 (0.51-1.72)	0.93 (0.51-1.71)	0.76 (0.51-1.14)	0.77 (0.52-1.16)
Anxiety				
Moderately or slightly or not at all	1.00	1.00	1.00	1.00
Extremely or a lot	1.86 (1.06-3.24)	1.86 (1.07-3.25)	1.83 (1.27-2.65)	1.81 (1.25-2.62)
Depression				
Moderately or slightly or not at all	1.00	1.00	1.00	1.00
Extremely or a lot	0.89 (0.45-1.78)	0.90 (0.45-1.80)	1.32 (0.85-2.07)	1.29 (0.82-2.02)
Schedule work				
Always during the day	1.00	1.00	1.00	1.00
Always during the night	3.55 (1.30-9.70)	3.50 (1.28-9.59)	0.63 (0.21-1.9)	0.67 (0.22-2.02)
Shift work	2.72 (1.32-5.62)	2.74 (1.33-5.65)	1.31 (0.69-2.46)	1.28 (0.68-2.42)
Not concerned	0.73 (0.44-1.23)	0.73 (0.43-1.22)	0.89 (0.64-1.24)	0.90 (0.65-1.25)
Physical tiredness				
Moderately or slightly or not at all	1.00	1.00	1.00	1.00
Extremely or a lot	0.72 (0.38-1.37)	0.72 (0.38-1.37)	1.97 (1.34-2.89)	1.97 (1.34-2.90)

(continued)

Table 12 - (continued)

	Short TST		Feeling of tiredness on awakening	
	M1 model ¹	M2Model ²	M1 Model ¹	M2 Model ²
	OR (95%CI)	OR (95%CI)	OR (95%CI)	OR (95%CI)
Nervous tiredness				
Moderately or slightly or not at all	1.00	1.00	1.00	1.00
Extremely or a lot	1.12 (0.59-2.13)	1.13 (0.6-2.15)	1.87 (1.25-2.79)	1.84 (1.23-2.74)
Cardiovascular disease				
No	1.00	1.00	1.00	1.00
Yes	0.59 (0.28-1.25)	0.58 (0.27-1.24)	1.30 (0.85-1.97)	1.31 (0.86-2.00)
Hypertension				
No	1.00	1.00	1.00	1.00
Yes	0.94 (0.57-1.55)	0.94 (0.57-1.55)	0.87 (0.63-1.21)	0.87 (0.63-1.22)
Noise sensitivity				
As sensitive as people around you	1.00	1.00	1.00	1.00
> sensitive th. people around you	1.04 (0.63-1.71)	1.05 (0.64-1.73)	1.46 (1.06-2.00)	1.42 (1.03-1.95)
< sensitive th. people around you	1.07 (0.63-1.8)	1.06 (0.63-1.79)	1.09 (0.76-1.57)	1.10 (0.77-1.59)
Annoyance				
Moderately or slightly or not at all		1.00		1.00
Extremely or a lot		0.89 (0.51-1.55)		1.59 (1.12-2.28)

All possible confounding factors were simultaneously included in the model.

¹Model without annoyance

²Model including annoyance as a confounding factor

Bold values are statistically significant $p \leq 0.05$.

Table 12 shows the odds-ratios (OR) and their 95% CIs for a short TST and the feeling of tiredness while awakening in relation to the major a priori confounders. Men (compared to women), single people (compared to married people), daily smokers (compared to non-smokers), anxious people, shift workers and people always working during the night (compared to those always working during the day) had a higher probability of a short TST (≤ 6 hr). Annoyance was not significantly associated with a short TST. Regarding the feeling of tiredness while awakening, women (compared to men), participants with a degree < French high school certificate (compared to > French high school certificate), young people, participants who reported a fair or a poor perceived health, participants who reported to be more sensitive to noise than people around them (compared to those who reported to be as sensitive to noise as people around them), anxious people, and those who reported to be physically or nervously tired were more likely to be rather or very tired while awakening in the morning. The feeling of tiredness while awakening was positively and significantly associated with annoyance due to aircraft noise. Household monthly income was neither associated with a short TST nor with the feeling of tiredness while awakening.

Table 13 - Odds-ratio^a for the relationship between a short total sleep time (TST) or the feeling of tiredness on awakening and aircraft noise exposure

	Short TST				Feeling of tiredness on awakening			
	M1 Model ¹		M2 Model ²		M1 Model ¹		M2 Model ²	
	OR	(95%CI)	OR	(95%CI)	OR	(95%CI)	OR	(95%CI)
L_{den}	1.71	(1.17-2.50)	1.75	(1.18-2.58)	1.28	(1.00-1.63)	1.17	(0.91-1.51)
L_{Aeq, 24hr}	1.81	(1.20-2.71)	1.84	(1.20-2.81)	1.32	(1.01-1.72)	1.21	(0.91-1.60)
L_{Aeq, 6hr-22hr}	1.72	(1.18-2.50)	1.75	(1.19-2.58)	1.27	(1.00-1.61)	1.17	(0.92-1.51)
L_{night}	1.63	(1.15-2.32)	1.66	(1.15-2.38)	1.23	(1.00-1.54)	1.15	(0.91-1.44)

^a Per 10 dB(A) increase.

All possible confounding factors were simultaneously included in the model.

¹Model without annoyance

²Model including annoyance as a confounding factor

Bold values are statistically significant $p \leq 0.05$.

The ORs and their 95% CIs for a short TST or the feeling of tiredness while awakening in relation to aircraft noise exposure are presented in Table 13. Analyses were performed separately for each noise indicator (L_{den} , $L_{Aeq,24hr}$, $L_{Aeq,6hr-22hr}$ and L_{night}). A significant association between a short TST or the feeling of tiredness while awakening and aircraft noise exposure was found regardless of the noise indicator, when annoyance was not included in the models; Participants with higher noise levels had a higher probability of a short TST and felt rather or very tired more often while awakening compared to those with lower noise levels. The ORs were very similar for all noise indicators. A 10 dB(A) increase in aircraft noise level at night was associated with an OR of 1.63 (95%CI: 1.15-2.32) for a short TST and 1.23 (95% CI: 1.00-1.54) for the feeling of tiredness while awakening. When annoyance was included in the models, the results remained similar for a short TST. In contrast, the association between aircraft noise exposure and the feeling of tiredness while awakening was no longer significant, regardless of the noise indicator. The results of the M1 and M2 models remained similar when household monthly income was introduced in the models instead of education level.

Table 14 displays the ORs and their 95% CIs for a short TST or the feeling of tiredness while awakening in relation to aircraft noise exposure for the 991 participants who had resided at their

address for at least 5 years. The association remained significant for a short TST but became non-significant for the feeling of tiredness while awakening in the morning.

Table 14 - Odds-ratio^a for the relationship between a short total sleep time (TST) or the feeling of tiredness on awakening and aircraft noise exposure among the 991 participants who had resided at their address for at least 5 years

	Short TST				Feeling of tiredness on awakening			
	M1 Model ¹		M2 Model ²		M1 Model ¹		M2 Model ²	
	OR	(95%CI)	OR	(95%CI)	OR	(95%CI)	OR	(95%CI)
L_{den}	1.75	(1.14-2.71)	1.70	(1.09-2.66)	1.26	(0.95-1.66)	1.14	(0.86-1.52)
L_{Aeq, 24hr}	1.85	(1.15-2.98)	1.80	(1.10-2.92)	1.29	(0.95-1.75)	1.15	(0.84-1.58)
L_{Aeq, 6hr-22hr}	1.74	(1.13-2.69)	1.69	(1.08-2.64)	1.26	(0.96-1.65)	1.14	(0.86-1.51)
L_{night}	1.70	(1.13-2.56)	1.66	(1.09-2.52)	1.22	(0.95-1.58)	1.12	(0.86-1.45)

^a Per 10 dB(A) increase.

All possible confounding factors were simultaneously included in the model.

¹Model without annoyance

²Model including annoyance as a confounding factor

Bold values are statistically significant $p \leq 0.05$.

4. DISCUSSION

The sex- and age-standardized (to the French population) prevalence of a short TST (≤ 6 hr) estimated in the DEBATS study was very similar to the one observed in the INPES (National Institute for Prevention and Health Education) study in subjects between 15 and 85 years of age in France in 2010. In the INPES study, the prevalence of short sleep (< 5 hr) was 8% [21]. Sleeping less than 6 hours is usually considered the “cut off” for “a short sleep duration” with potential comorbidities [3], [20]. The percentage of the participants reported to be rather or very tired while awakening in the morning in the DEBATS study (30% of the participants older than 18 years of age) was also very similar to the one found in the French Health, Health Care and Insurance Survey where 34% of the French population aged 16 and above reported tiredness on awakening [26].

The increasing air transportation traffic in all parts of the world has led authorities to seek measures to better control the potential impact of aircraft noise on health. Indeed, at night, the urban global level of noise is usually lower than daytime, but the impact of night flights is considered the most disturbing by near-airport populations. Moreover, as underlined by the WHO recommendations on “Noise on health”, airport noise may alter the ability of more vulnerable people to rest at night. Many studies have already been conducted on the effects of aircraft noise on sleep, and exposure to aircraft noise has been shown to disrupt sleep with an increased frequency of awakening, increased motility, decreased slow wave sleep, changes in sleep structure, use of sleep drugs or sedatives, a poor self-reported quality of sleep, an increased time for falling asleep, a decreased total sleep duration and an increased feeling of being tired while awakening in the morning [6], [13], [14]. However, the number of these studies investigating sleep duration is still limited and their results remain unclear [14]. A few studies have evaluated the relationship between aircraft noise and sleep duration, and most of them have been performed in a laboratory. Some of these studies showed a significantly decreased sleep duration [27] or not [28], [29] when aircraft noise exposure increased, whereas others did not show any association [30], [31].

The present study confirms the findings by Kim et al who found that the sleep duration of 1,082 residents near a military airfield was lower in the highly exposed group, followed by the low-exposure group and finally the control group [27]. Indeed, as suggested by Muzet [32], TST can be reduced by an increased sleep latency, prolonged nocturnal awakenings or by an early morning awakening [32]. It is well established that exposure to aircraft noise leads to an increased frequency of awakenings and an increased time to fall asleep.

Controlling for several factors that are known to affect subjective sleep quality and for other potential confounders did not change the significant associations. In this study, the assessment of extensive covariate data made it possible to evaluate a large number of possible confounding factors and ensure the stability of the results.

However, uncontrolled or residual confounding, exposure misclassification, and selection bias all need to be considered. As the association between aircraft noise exposure and a short TST remained similar when annoyance from aircraft noise exposure was included in the models, the present study does not support the hypothesis that the effects of noise exposure on sleep duration are mediated through annoyance. This could either indicate that the evidenced association reflects residual confounding because the selected variable (annoyance from aircraft

noise exposure) does not effectively characterize annoyance or that the shorter sleep duration observed in this study is directly connected to aircraft noise exposure.

The results of the present study also confirm those found in the literature, namely, an association between aircraft noise exposure and the feeling of tiredness while awakening in the morning [6], [30]. However, the association between aircraft noise exposure and the feeling of tiredness while awakening was no longer significant when annoyance from aircraft noise exposure was included in the models. Therefore, it is very likely that the effects of noise exposure on the feeling of tiredness while awakening are mediated through annoyance. Frei and al. found that the association between self-reported sleep quality and noise was mediated through noise annoyance, whereas objective sleep quality was independent of perceived noise annoyance [33]. The present study seems to confirm these findings if TST is considered the most objective variable characterizing self-reported sleep quality and the feeling of tiredness while awakening is considered subjective.

When the analyses were restricted to the 991 participants who resided at their address for at least 5 years, the association remained significant for a short TST but became non-significant for the feeling of tiredness while awakening in the morning. These results support the hypothesis of a sleep habituation to transportation noise for subjective sleep quality and not for objective sleep quality [32], [34], [35].

The present study had specific strength in the evaluation of noise exposure. Indeed, aircraft noise exposure was estimated for each participant using modeled noise levels produced by the French Civil Aviation Authority using the INM software. These modeled noise levels were validated by comparison with measurements from permanent stations [36] or from specific campaigns [37]. Most of the differences were between 0.5 and 1.5 dB(A) in terms of L_{den} , thus showing the validity of the modeled noise levels.

Moreover, a short TST and a feeling of tiredness while awakening were significantly associated with day-evening-night, day- and night-time exposures to aircraft noise. In the literature, different indicators have been used to describe the effects of aircraft noise on sleep quality [38]. Most studies have considered nighttime (L_{night}) noise exposure [6], [39], but some studies have shown that exposure to daytime noise can disrupt sleep [40] and reduce sleep duration [41]. In the present study, day-evening-night, day- and night-time exposures to aircraft noise were estimated at the place of residence of the participants. No information was available about daytime aircraft noise exposure of the participants when outside their home, especially at their

workplace. Misclassification of exposure might occur, especially regarding daytime exposure, because participants were more likely to be outside their home during the day than during the night. However, it is unlikely that the exposure classification would depend on the sleep duration or the feeling of tiredness while awakening. Therefore, such non-differential misclassifications would have induced an appreciable downward bias if there is a true association between aircraft noise exposure and TST or the feeling of tiredness while awakening.

It is worth wondering whether energy-based indicators of exposure such as L_{den} or L_{night} were the most relevant indicators to describe the relationship between aircraft noise exposure and sleep duration. Regarding the effects of aircraft noise on sleep quality, it is currently recommended to consider including event-related indicators such as the number of noise events or the number of events exceeding a certain L_{Amax} level (the maximum A-weighted sound pressure level), especially for the night period. In addition to L_{den} , L_{night} and $L_{Aeq, 6hr-22hr}$, it would have been interesting to consider such noise indicators in the present study to increase the impact of these results. Unfortunately, these indicators were not available in France [42]. However, in the future, such indicators will be available for another study in France on a sub-sample of 110 participants in the DEBATS longitudinal study. For these 110 participants, acoustic measurements at their place of residence were performed for one week.

The fact that TST and the feeling of tiredness while awakening were estimated using a questionnaire could be a limitation in the present study. However, the evaluation of sleep quality with an electroencephalogram (EEG) or with a polysomnography would be very difficult in a large-scale epidemiological study. Nevertheless, the above-cited study on a sub-sample of 110 participants in the longitudinal study will evaluate the objective sleep quality using actimetric measurements.

5. CONCLUSIONS

The DEBATS study is the first to investigate the relationship between long-term aircraft noise exposure and sleep duration or the feeling of tiredness while awakening in the morning near French airports. After adjustment for a number of potential confounders (annoyance in particular), an association was observed between short sleep and aircraft noise exposure. The association with the feeling of tiredness while awakening seems to be mediated through annoyance. These findings contribute to the overall evidence suggesting that aircraft noise exposure may decrease the subjective quality of sleep.

6. Acknowledgements

The Airport Pollution Control Authority (Acnusa) requested the French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks (Ifsttar) for carrying out this study. The authors would like to thank them for their confidence in them.

They are grateful to all the participants in the study.

They also thank Paris Airports and the French Civil Aviation Authority for providing noise exposure maps. They are also grateful to Inès Khati for her participation in the implementation of the study.

7. Funding

The present study was supported by funds from the French Ministry of Health, the French Ministry of Environment, and the French Civil Aviation Authority. We would like to thank them for their kind assistance.

8. Ethics approval

The present study was approved by two national authorities in France, the French Advisory Committee for Data Processing in Health Research and the French National Commission for Data Protection and the Liberties.

9. REFERENCES

- [1] WHO, *Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe*. Copenhagen: World Health Organization, Regional Office for Europe, 2011.
- [2] F. P. Cappuccio *et al.*, ‘Meta-analysis of short sleep duration and obesity in children and adults’, *SLEEP-N. Y. THEN Westchest.*-, vol. 31, no. 5, p. 619, 2008.
- [3] F. P. Cappuccio, L. D’Elia, P. Strazzullo, and M. A. Miller, ‘Sleep Duration and All-Cause Mortality: A Systematic Review and Meta-Analysis of Prospective Studies’, *Sleep*, vol. 33, no. 5, pp. 585–592, May 2010.
- [4] J. E. Gangwisch *et al.*, ‘Short Sleep Duration as a Risk Factor for Hypertension: Analyses of the First National Health and Nutrition Examination Survey’, *Hypertension*, vol. 47, no. 5, pp. 833–839, May 2006.

- [5] M. A. Grandner, N. J. Jackson, V. M. Pak, and P. R. Gehrman, ‘Sleep disturbance is associated with cardiovascular and metabolic disorders: Sleep disturbance and cardiometabolic disorders’, *J. Sleep Res.*, vol. 21, no. 4, pp. 427–433, Aug. 2012.
- [6] K. Jones and D. P. Rhodes, ‘Aircraft noise, sleep disturbance and health effects: a review’, Stationery Office, 2013.
- [7] L. Mallon, J.-E. Broman, and J. Hetta, ‘Relationship Between Insomnia, Depression, and Mortality: A 12-Year Follow-Up of Older Adults in the Community’, *Int. Psychogeriatr.*, vol. 12, no. 3, pp. 295–306, Sep. 2000.
- [8] B. Phillips and D. M. Mannino, ‘Do insomnia complaints cause hypertension or cardiovascular disease’, *J Clin Sleep Med*, vol. 3, no. 5, pp. 489–494, 2007.
- [9] E. Tasali, R. Leproult, D. A. Ehrmann, and E. Van Cauter, ‘Slow-wave sleep and the risk of type 2 diabetes in humans’, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 105, no. 3, pp. 1044–1049, 2008.
- [10] A. N. Vgontzas *et al.*, ‘Insomnia with Short Sleep Duration and Mortality: The Penn State Cohort’, *Sleep*, vol. 33, no. 9, pp. 1159–1164, Sep. 2010.
- [11] J. Lekaviciute Gadala, S. Kephelopoulou, S. Stansfeld, and C. Clark, ‘Final Report of the ENNAH (European Network on Noise and Health) project’, Publications Office of the European Union, EUR - Scientific and Technical Research Reports, 2013.
- [12] W. Babisch *et al.*, ‘Annoyance due to aircraft noise has increased over the years—Results of the HYENA study’, *Environ. Int.*, vol. 35, no. 8, pp. 1169–1176, Nov. 2009.
- [13] D. S. Michaud, S. Fidell, K. Pearsons, K. C. Campbell, and S. E. Keith, ‘Review of field studies of aircraft noise-induced sleep disturbance’, *J Acoust Soc Am*, vol. 121, no. 1, pp. 32–41, Jan. 2007.
- [14] S. Perron, L. F. Tetreault, N. King, C. Plante, and A. Smargiassi, ‘Review of the effect of aircraft noise on sleep disturbance in adults’, *Noise Health*, vol. 14, no. 57, pp. 58–67, Mar. 2012.
- [15] M. Basner, B. Griefahn, and M. Berg, ‘Aircraft noise effects on sleep: mechanisms, mitigation and research needs’, *Noise Health*, vol. 12, no. 47, pp. 95–109, Apr. 2010.
- [16] W. Passchier-Vermeer, H. Vos, J. Steenbekkers, F. van der Ploeg, and K. Groothuis-Oudshoorn, ‘Sleep disturbance and aircraft noise exposure : Exposure-effect relationships’, Division Public Health, The Netherlands, TNO report 2002.027, Jun. 2002.
- [17] A.-S. Evrard, M. Lefèvre, P. Champelovier, J. Lambert, and B. Laumon, ‘Does aircraft noise exposure increase the risk of hypertension in the population living near airports in France?’, *Occup. Environ. Med.*, vol. 74, no. 2, pp. 123–129, Feb. 2017.

- [18] M. Lefèvre, M.-C. Carlier, P. Champelovier, J. Lambert, B. Laumon, and A.-S. Evrard, 'Effects of aircraft noise exposure on saliva cortisol near airports in France', *Occup. Environ. Med.*, 2017.
- [19] B. He *et al.*, 'Integrated Noise Model (INM) Version 7.0 User's Guide', Apr. 2007.
- [20] L. M. Kurina, M. K. McClintock, J.-H. Chen, L. J. Waite, R. A. Thisted, and D. S. Lauderdale, 'Sleep duration and all-cause mortality: a critical review of measurement and associations', *Ann. Epidemiol.*, vol. 23, no. 6, pp. 361–370, Jun. 2013.
- [21] D. Leger, F. Beck, J. B. Richard, F. Sauvet, and B. Faraut, 'The risks of sleeping "too much". Survey of a National Representative Sample of 24671 adults (INPES health barometer)', *PLoS One*, vol. 9, no. 9, p. e106950, 2014.
- [22] F. Beck, J.-B. Richard, and D. Léger, 'Prévalence et facteurs sociodémographiques associés à l'insomnie et au temps de sommeil en France (15–85 ans)', *Rev. Neurol. (Paris)*, vol. 169, no. 12, pp. 956–964, Dec. 2013.
- [23] M. M. Ohayon, 'Epidemiology of insomnia: what we know and what we still need to learn', *Sleep Med. Rev.*, vol. 6, no. 2, pp. 97–111, May 2002.
- [24] A. Marks and B. Griefahn, 'Associations between noise sensitivity and sleep, subjectively evaluated sleep quality, annoyance, and performance after exposure to nocturnal traffic noise', *Noise Health*, vol. 9, no. 34, pp. 1–7, Jan. 2007.
- [25] S. N. Wood, *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. CRC Press, 2006.
- [26] C. Gourier-Fréry, C. Chan-Chee, and D. Léger, 'Insomnie, fatigue et somnolence: prévalence et état de santé associé, déclarés par les plus de 16 ans en France métropolitaine. Données ESPS 2008', *Bull Epidemiol Hebdom*, vol. 44, pp. 502–509, 2012.
- [27] S. J. Kim *et al.*, 'Exposure-Response Relationship Between Aircraft Noise and Sleep Quality: A Community-based Cross-sectional Study', *Osong Public Health Res Perspect*, vol. 5, no. 2, pp. 108–14, Apr. 2014.
- [28] M. Basner and A. Samel, 'Nocturnal aircraft noise effects', *Noise Health*, vol. 6, no. 22, pp. 83–93, Jan. 2004.
- [29] M. Basner, H. Buess, U. Mueller, G. Plath, and A. Samel, 'Aircraft noise effects on sleep: final results of DLR laboratory and field studies of 2240 polysomnographically recorded subject nights', presented at the In 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Internoise 2004), Prague/Czech Republic, 2004, pp. 22–25.
- [30] B. Griefahn, A. Marks, and S. Robens, 'Noise emitted from road, rail and air traffic and their effects on sleep', *J. Sound Vib.*, vol. 295, no. 1–2, pp. 129–140, 2006.

- [31] M. Basner, C. Glatz, B. Griefahn, T. Penzel, and A. Samel, 'Aircraft noise: effects on macro- and microstructure of sleep', *Sleep Med*, vol. 9, no. 4, pp. 382–7, May 2008.
- [32] A. Muzet, 'Environmental noise, sleep and health', *Sleep Med Rev*, vol. 11, no. 2, pp. 135–42, Apr. 2007.
- [33] P. Frei, E. Mohler, and M. Roosli, 'Effect of nocturnal road traffic noise exposure and annoyance on objective and subjective sleep quality', *fyhri*, vol. 217, no. 2–3, pp. 188–95, Mar. 2014.
- [34] M. Kuroiwa, P. Xin, S. Suzuki, Y. Sasazawa, T. Kawada, and Y. Tamura, 'Habituation of Sleep to Road Traffic Noise Observed Not by Polygraphy but by Perception', *J. Sound Vib.*, vol. 250, no. 1, pp. 101–106, 2002.
- [35] T. Kawada, P. Xin, M. Kuroiwa, Y. Sasazawa, S. Suzuki, and Y. Tamura, 'Habituation of Sleep to Road Traffic Noise as Determined by Polysomnography and an Accelerometer', *J. Sound Vib.*, vol. 242, no. 1, pp. 169–178, 2001.
- [36] Aéroports de Paris, 'Exposition au bruit des avions: Aéroport Paris-Charles de Gaulle - Compte rendu annuel 2006', 2007.
- [37] R. Foret, J.-C. Bruyere, and N. Yombo, 'Etude empirique de la validité du Plan de Gêne Sonore de l'aéroport Lyon-Saint Exupéry', Chambre de commerce et d'industrie de Lyon, Rapport d'étude du 12 septembre 2005, 2005.
- [38] L. S. Finegold, 'Sleep disturbance due to aircraft noise exposure', *Noise Health*, vol. 12, no. 47, pp. 88–94, Apr. 2010.
- [39] H. M. Miedema and H. Vos, 'Associations between self-reported sleep disturbance and environmental noise based on reanalyses of pooled data from 24 studies', *Behav Sleep Med*, vol. 5, no. 1, pp. 1–20, 2007.
- [40] B. Fruhstorfer, H. Fruhstorfer, and P. Grass, 'Daytime noise and subsequent night sleep in man', *Eur. J. Appl. Physiol.*, vol. 53, no. 2, pp. 159–163, Oct. 1984.
- [41] R. Blois, G. Debilly, and J. Mouret, 'Daytime noise and its subsequent sleep effects', presented at the Proceedings, 3rd International Congress of Noise as a Public Health Problem, Washington, DC, 1980.
- [42] A.-S. Evrard, I. Khati, B. Laumon, P. Champelovier, and J. Lambert, 'Health effects of aircraft noise near three French airports: results from a pilot epidemiological study of the DEBATS study.', in *41st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, INTER-NOISE 2012*, France, 2012, p. 10 p.

10. Résultats complémentaires

Les résultats qui vont suivre n'ont pas été présentés dans l'article ci-dessus. Ils concernent les variables *Temps d'endormissement*, *Éveils nocturnes*, *Satisfaction de la qualité du sommeil* et *Prise de médicament pour dormir*.

Dans notre étude, la prévalence de l'insomnie d'endormissement (Temps d'endormissement $\geq$ 30 minutes) est de 16%. Celle de l'insomnie de maintien du sommeil (Durée des éveils nocturnes $\geq$ 30 minutes) est de 49%. La prévalence des sujets ayant déclaré être insatisfaits de la qualité de leur sommeil est de 32% et 5% des participants ont rapporté prendre régulièrement ou tous les jours des médicaments pour dormir.

Aucun de ces quatre paramètres subjectifs de la qualité du sommeil n'est associé avec la classe d'exposition au bruit des avions en termes de Lden (Table 15). Le pourcentage de participants ayant une insomnie d'endormissement ou de maintien du sommeil, déclarant être non satisfaits de la qualité de leur sommeil ou prenant des médicaments pour dormir n'est pas significativement plus élevé avec des niveaux d'exposition au bruit des avions les plus élevés.

Table 15 - Distribution des paramètres subjectifs du sommeil dans les quatre classes d'exposition au bruit des avions en termes de Lden

		Niveaux d'expositions au bruit des avions				Total	P-value
		[Lden (dB(A))]					
		< 50	50 - 54	55 - 59	≥ 60		
Temps d'endormissement (≥ 30min)	n (%)	46 (23)	62 (31)	44 (22)	48 (24)	200	0.141
Éveils nocturnes (toutes les nuits ou régulièrement)	n (%)	152 (25)	150 (25)	150 (25)	153 (25)	605	0.943
Prise de médicaments pour dormir (tous les jours ou régulièrement)	n (%)	16 (26)	10 (16)	19 (31)	16 (26)	61	0.431
Satisfaction la qualité du sommeil (plutôt ou très insatisfait)	n (%)	104 (26)	93 (23)	104 (26)	101 (25)	402	0.857

La Table 16 présente les ORs et leurs IC à 95% issus des modèles de régression logistique entre les niveaux d'exposition au bruit des avions et les quatre paramètres subjectifs du sommeil. Les analyses ont été réalisées séparément pour les quatre indicateurs acoustiques

Table 16 - Odds-ratio^a pour la relation entre l'exposition au bruit des avions et le temps d'endormissement, les éveils nocturnes, la satisfaction de la qualité du sommeil ou la prise de médicaments pour dormir

	Temps d'endormissement (≥ 30min)		Éveils nocturnes (toutes les nuits ou régulièrement)		Prise de médicaments pour dormir (tous les jours ou régulièrement)		Satisfaction de la qualité du (plutôt ou très insatisfait)	
	Model M1 ^b	Model M2 ^c	Model M1 ^b	Model M2 ^c	Model M1 ^b	Model M2 ^c	Model M1 ^b	Model M2 ^c
	OR (95%CI)	OR (95%CI)	OR (95%CI)	OR (95%CI)	OR (95%CI)	OR (95%CI)	OR (95%CI)	OR (95%CI)
Lden	0,82 (0,62-1,09)	0,8 (0,58-1,06)	1,03 (0,83-1,27)	0,98 (0,79-1,22)	0,89 (0,52-1,51)	0,83 (0,48-1,44)	1,12 (0,89-1,41)	1,05 (0,82-1,33)
LAeq, 24hr	0,76 (0,55-1,04)	0,7 (0,52-1,00)	1,02 (0,81-1,29)	0,96 (0,75-1,22)	0,96 (0,54-1,73)	0,90 (0,49-1,65)	1,15 (0,89-1,48)	1,06 (0,81-1,38)
LAeq, 6hr-22hr	0,82 (0,62-1,08)	0,8 (0,59-1,05)	1,01 (0,82-1,23)	0,96 (0,78-1,18)	0,98 (0,58-1,63)	0,92 (0,54-1,57)	1,13 (0,90-1,41)	1,06 (0,81-1,38)
Lnight	0,87 (0,67-1,13)	0,8 (0,64-1,10)	1,08 (0,89-1,31)	1,03 (0,85-1,26)	0,83 (0,52-1,34)	0,78 (0,48-1,28)	1,12 (0,91-1,38)	1,05 (0,85-1,31)

^a Pour une augmentation de 10 dB(A).

Tous les facteurs de confusion potentiels ont été inclus simultanément dans le modèle.

^b Modèle sans la gêne due au bruit des avions

^c Modèle incluant la gêne due au bruit des avions comme facteur de confusion

(Lden, LAeq,24h, LAeq,6-22h et Lnight). Aucune association significative n'a été trouvée entre le niveau d'exposition au bruit des avions et le temps d'endormissement, les éveils nocturnes, la satisfaction de la qualité du sommeil ou la prise de médicaments pour dormir.

Les résultats restent inchangés lorsque les analyses sont limitées aux 991 participants qui habitent dans leur logement actuel depuis au moins 5 ans.

11. Discussion des résultats complémentaires

Dans la présente étude, la prévalence de l'insomnie d'endormissement (temps d'endormissement supérieur à 30 minutes) est similaire à celle observée dans l'Enquête santé protection sociale (ESPS) de 2008 auprès de la population française métropolitaine (16%) [1]. En revanche, près de 49% des participants déclarent se réveiller toutes les nuits ou régulièrement et cette proportion est plus élevée que celle des réveils nocturnes fréquents observée dans l'ESPS (23%) [1]. Néanmoins, les questions utilisées pour estimer ces deux proportions ne sont pas les mêmes dans les deux études. À l'inverse, 9% de la population française métropolitaine déclare prendre un médicament pour dormir mais seulement 5% des participants à notre étude (5%) [1]. D'après une enquête de l'Institut national du sommeil et de la vigilance réalisée fin 2016 [2], 54% des Français jugent leur qualité de sommeil insuffisante, alors que environ 32% des participants à notre étude déclarent être plutôt ou très insatisfaits de leur qualité de sommeil.

La présente étude n'a pas montré d'association significative entre l'exposition au bruit des avions et le temps d'endormissement estimé par les participants eux-mêmes. Les résultats des études (peu nombreuses) s'intéressant au temps d'endormissement évalué par questionnaire en lien avec l'exposition au bruit des avions sont contrastés. Certaines études ont montré une augmentation significative du temps d'endormissement [3], [4] alors que d'autres ont trouvé une augmentation mais non significative de celui-ci [11], ou même aucune association [5]. Ainsi, nos résultats confirment ceux de l'étude de Kim *et al.* qui n'ont pas observé de différence significative concernant le temps d'endormissement entre le groupe fortement exposé (WECPNL⁹ > 80), le groupe faiblement exposé (WECPNL 60-80) et le groupe de contrôle (WECPNL < 60) [5].

⁹ Weighted Equivalent Continuous Perceived Noise Level (le niveau continu équivalent pondéré A perçu) : indicateur du niveau quotidien du bruit des avions.

Notre étude n'a pas non plus montré d'association entre l'exposition au bruit des avions et les éveils nocturnes déclarés par les participants eux-mêmes. Ce résultat est contraire à ceux de la littérature. En effet, celle-ci est unanime et montre que les éveils nocturnes déclarés sont associés significativement à l'exposition au bruit des transports la nuit [3], [6], [7]. Passchier-Vermeer *et al.* ont montré que le niveau de bruit des avions et le nombre d'événements de bruit d'avions la nuit sont associés significativement avec le nombre d'éveils nocturnes déclarés le matin [3].

La présente étude n'a pas mis en évidence de relation significative entre l'exposition au bruit des avions et l'auto-estimation de la qualité du sommeil. Les conclusions des études sur le sujet sont partagées. Si la plupart montrent une détérioration de la qualité du sommeil après exposition au bruit des avions [8][9][5], certaines n'ont pas trouvé d'association significative [3]. Ainsi, nos résultats confirment ceux de l'étude de Passchier-Vermeer *et al.* qui n'ont pas observé de relation significative entre l'exposition au bruit des avions et la qualité du sommeil [3].

Si aucune association significative n'a été montrée dans la présente étude entre l'exposition au bruit des avions et la prise de médicament pour dormir, le lien a en revanche été bien établi dans différentes études [3], [10]–[12]. Autour de l'aéroport d'Amsterdam Schiphol, Franssen *et al.* [12] ont montré que le niveau de pression acoustique continu équivalent entre 22 h et 23 h (LAeq22h23h) est fortement associé à la prise de médicaments pour le sommeil ou sédatifs non-prescrits. Au voisinage du même aéroport, Palsschier-Vermeer *et al.* ont trouvé que la probabilité d'utilisation de somnifères augmente significativement avec le niveau sonore équivalent du bruit des avions (LAeq), particulièrement chez les personnes âgées [3]. Franssen *et al.* n'ont en revanche pas montré d'association significative entre la fréquence de prise de médicament pour dormir et l'exposition au bruit des avions [12]. La formulation de la question sur la fréquence de prise de médicament pour dormir dans cette dernière étude est la même que celle de la question sur la prise de médicament dans notre étude. Ainsi, les résultats de notre étude vont dans le même sens que ceux de l'étude de Franssen *et al.* [12].

Le fait que la présente étude n'ait pas trouvé d'association significative entre l'exposition au bruit des avions d'une part et les quatre paramètres subjectifs de la qualité du sommeil que sont le temps d'endormissement, les réveils nocturnes, l'insatisfaction de la qualité du sommeil et la prise de médicaments pour dormir d'autre part pourrait être expliqué par une certaine habitude de la population suite à l'exposition au bruit des avions. En effet, près de 89% des

participants à notre étude résident depuis au moins 5 ans dans son logement actuel et plusieurs études soutiennent l'hypothèse d'une habitation suite à l'exposition au bruit pour les paramètres subjectifs de la qualité du sommeil chez les sujets souvent exposés au bruit des transports [13]–[16]. Il est en effet peu vraisemblable que ce dernier résultat soit expliqué par un manque de puissance statistique car le nombre de participants dans DEBATS est relativement important comparativement à celui d'études qui ont montré des associations significatives pour certains paramètres subjectifs de la qualité du sommeil [3], [5], [9].

Les résultats de cette étude confirment également un constat fait dans une récente revue de la littérature concernant les effets du bruit environnemental sur la qualité du sommeil [17]. Cette dernière a en effet montré qu'aucune association significative n'est trouvée entre l'exposition au bruit des avions et la qualité subjective du sommeil lorsque les questions permettant d'évaluer cette dernière ne mentionnent pas explicitement le bruit. En revanche, lorsque le bruit est évoqué dans la question, des associations significatives sont trouvées. Pour les auteurs, les résultats sont biaisés lorsqu'on mentionne le bruit dans les questions. Dans la présente étude, le bruit n'a pas été introduit dans les questions évaluant la qualité du sommeil. Ainsi, les résultats sont cohérents avec ceux que l'on trouve de façon générale dans la littérature.

Un biais de sélection pourrait concerner l'estimation des prévalences concernant les paramètres subjectifs du sommeil auxquels s'intéresse ce travail de thèse. En effet, celles-ci pourraient être sous-estimées dans les zones les plus exposées au bruit des avions du fait que des personnes sujettes à des troubles du sommeil soient réticentes à habiter dans des zones bruyantes. Peu d'information est disponible dans DEBATS pour en juger. Cependant, si c'est le cas, ceci conduirait à sous-estimer l'association entre l'exposition au bruit des avions et la qualité subjective du sommeil dans cette étude.

12. Références sur la discussion des résultats complémentaires

- [1] C. Gourier-Fréry, C. Chan-Chee, and D. Léger, ‘Insomnie, fatigue et somnolence: prévalence et état de santé associé, déclarés par les plus de 16 ans en France métropolitaine. Données ESPS 2008’, *Bull Epidemiol Hebdom*, vol. 44, pp. 502–509, 2012.
- [2] ‘Enquête INSV/MGEN “Dormir seul ou pas : quel impact sur le sommeil ?”’, *Institut National du Sommeil et de la Vigilance*, 2017. [Online]. Available: <http://www.institut-sommeil-vigilance.org/la-journee-du-sommeil-2>. [Accessed: 05-Apr-2018].
- [3] W. Passchier-Vermeer, H. Vos, J. Steenbekkers, F. van der Ploeg, and K. Groothuis-Oudshoorn, ‘Sleep disturbance and aircraft noise exposure : Exposure-effect relationships’, Division Public Health, The Netherlands, TNO report 2002.027, Jun. 2002.
- [4] A. Marks and B. Griefahn, ‘Associations between noise sensitivity and sleep, subjectively evaluated sleep quality, annoyance, and performance after exposure to nocturnal traffic noise’, *Noise Health*, vol. 9, no. 34, pp. 1–7, Jan. 2007.
- [5] S. J. Kim *et al.*, ‘Exposure-Response Relationship Between Aircraft Noise and Sleep Quality: A Community-based Cross-sectional Study’, *Osong Public Health Res Perspect*, vol. 5, no. 2, pp. 108–114, Apr. 2014.
- [6] B. Jakovljevic, G. Belojevic, K. Paunovic, and V. Stojanov, ‘Road traffic noise and sleep disturbances in an urban population: cross-sectional study’, *Croat Med J*, vol. 47, no. 1, pp. 125–133, Feb. 2006.
- [7] E. M. Elmenhorst *et al.*, ‘Examining nocturnal railway noise and aircraft noise in the field: sleep, psychomotor performance, and annoyance’, *Sci Total Env.*, vol. 424, pp. 48–56, May 2012.
- [8] S. A. Janssen, M. R. Centen, H. Vos, and I. van Kamp, ‘The effect of the number of aircraft noise events on sleep quality’, *Appl. Acoust.*, vol. 84, pp. 9–16, 2014.
- [9] E. Lainey, S. Nerome, J. P. Enjalbert, S. Bouee, and C. Deschaseaux-Voinet, ‘INSOMNIA Impact des Nuisances SONores (Maladies et INSomnie) à proximité des Aéroports’, Hôpital Européen Georges Pompidou (CEMKA-EVAL), May 2004.
- [10] S. Perron, L. F. Tetreault, N. King, C. Plante, and A. Smargiassi, ‘Review of the effect of aircraft noise on sleep disturbance in adults’, *Noise Health*, vol. 14, no. 57, pp. 58–67, Mar. 2012.
- [11] WHO, *Night noise guidelines for Europe*. Copenhagen, Denmark: World Health Organization Europe, 2009.

- [12] E. A. Franssen, C. M. van Wiechen, N. J. Nagelkerke, and E. Lebrecht, 'Aircraft noise around a large international airport and its impact on general health and medication use', *Occup Env. Med*, vol. 61, no. 5, pp. 405–13, May 2004.
- [13] T. Kawada, P. Xin, M. Kuroiwa, Y. Sasazawa, S. Suzuki, and Y. Tamura, 'Habituation of Sleep to Road Traffic Noise as Determined by Polysomnography and an Accelerometer', *J. Sound Vib.*, vol. 242, no. 1, pp. 169–178, 2001.
- [14] A. Muzet, 'Environmental noise, sleep and health', *Sleep Med Rev*, vol. 11, no. 2, pp. 135–42, Apr. 2007.
- [15] P. Xin, T. Kawada, S. Yosiaki, and S. Suzuki, 'Habituation of Sleep to Road Traffic Noise Assessed by Polygraphy and Rating Scale', *J Occup Health*, vol. 42, pp. 20–26, 2000.
- [16] M. Kuroiwa, P. Xin, S. Suzuki, Y. Sasazawa, T. Kawada, and Y. Tamura, 'Habituation of Sleep to Road Traffic Noise Observed Not by Polygraphy but by Perception', *J. Sound Vib.*, vol. 250, no. 1, pp. 101–106, 2002.
- [17] M. Basner and S. McGuire, 'WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Effects on Sleep', *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 15, no. 3, p. 519, Mar. 2018.

III. Effets de l'exposition au bruit des avions sur les paramètres objectifs de la qualité du sommeil des riverains des aéroports français

Ali-Mohamed Nassur, Marie Lefèvre, Maxime Elbaz, Fanny Mietlicki, Philippe Nguyen, Carlos Ribeiro, Matthieu Sineau, Bernard Laumon, Damien Léger, Anne-Sophie Evrard (2018): The impact of aircraft noise exposure on objective parameters of sleep quality: Results of the DEBATS study in France, Sleep Medicine, DOI : 10.1016/j.sleep.2018.10.013

The impact of aircraft noise exposure on objective parameters of sleep quality: Results of the DEBATS study in France

Ali-Mohamed NASSUR¹, Damien LÉGER², Marie LEFÈVRE¹, Maxime ELBAZ², Fanny MIETLICKI³, Philippe NGUYEN³, Carlos RIBEIRO³, Matthieu SINEAU³, Bernard LAUMON⁴, Anne-Sophie EVRARD¹

¹ Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon1, IFSTTAR, UMRESTTE, UMR T_9405, Bron, France

² Université Paris Descartes, APHP, Hôtel-Dieu de Paris, Centre du Sommeil et de la Vigilance et EA 7330 VIFASOM, Paris, France

³ Bruitparif, Noise Observatory in Ile de France, Paris, France

⁴ IFSTTAR, Transport, Health and Safety Department, Bron, France

Abstract

Background: Noise in the vicinity of airports is a crucial public health issue. Exposure to aircraft noise has been shown to have adverse effects on health and particularly on sleep. Many studies support the hypothesis that noise at night can affect subjective sleep quality. Fewer studies, however, have performed objective measurements of sleep.

Objectives: The aim of the present study was to investigate the relationship between aircraft noise exposure and objective parameters assessed by actigraphy of sleep quality in the population living near two French airports.

Methods: This study includes 112 participants living in the vicinity of Paris-Charles de Gaulle and Toulouse-Blagnac airports. Wrist actigraphy measurements were performed during eight nights to evaluate objective parameters of sleep quality such as sleep onset latency (SOL), wake

after sleep onset (WASO), total sleep time (TST), time in bed (TB) and sleep efficiency (SE). Acoustic measurements were made simultaneously both inside the participants' bedrooms and outside (at the exterior frontage) in order to estimate aircraft noise levels. Energy indicators related to the sound energetic average for a given period of time, as well as indicators related to noise events (such as the number of events that exceed a given threshold for example) were estimated. Logistic and linear regression models were used, taking into account potential confounders: age; gender; marital status; education; and body mass index (BMI).

Results: Energy indicators, and more particularly indicators related to noise events, were significantly associated with objective parameters of sleep quality. Increased levels of aircraft noise and increased numbers of aircraft noise events increased the time required for sleep onset (SOL) and the total wake time after sleep onset (WASO), and decreased sleep efficiency (SE). An association was also observed between aircraft noise exposure and an increase in total sleep time (TST) and time in bed (TB).

Conclusion: The findings of the present study contribute to the overall evidence suggesting that nocturnal aircraft noise exposure may decrease objective quality of sleep. Aircraft noise exposure affects objective parameters of sleep quality, not only in terms of noise levels but also in terms of number of events. Mechanisms for adapting to sleep deprivation could be observed.

Key words: Epidemiology; aircraft noise exposure; sleep quality; actigraphie

1. INTRODUCTION

Sleep is fundamental to health and well-being, to physical and psychological balance. It can be disturbed or interrupted by a variety of stimuli, in particular noise. According to the European Environment Agency (EEA), about 125 million European urban dwellers are exposed to environmental noise at levels considered disturbing and which can affect their health [1]. Transportation is the source of most environmental noise.

Sleep disorder is the most serious consequence of environmental noise in Western Europe [2]. According to the World Health Organization (WHO), it is the cause of 903,000 healthy life years lost each year in Europe [3]. Laboratory and field studies have convincingly established that exposure to transportation noise, notably aircraft noise, disturbs sleep. Exposure to noise at night degrades the quality of sleep at both the subjective and objective level [4], [5]. It can prolong the time needed to fall asleep by up to almost 20 minutes [6]. It provokes intermittent and premature awakening, changes of sleep stage, movements of the body, changes to posture and responses by the autonomic nervous system. It increases total waking time to the detriment of deep sleep and/or rapid eye movement (REM) sleep, and reduces total sleep duration [4], [7]–[12]. At the subjective level, a reduction in self-estimated sleep quality and a worsening of mood and performance were observed [13]–[15], as well as an increase in self-declared sleep disorder and medication [2].

In the vicinity of airports, the majority of studies have assessed subjective sleep quality through questionnaires. Some studies, far less numerous, have measured the objective parameters of sleep quality at the participants' homes. It is important to focus not only on the subjective quality of sleep as reported by the subjects themselves, but also on the objective parameters of sleep. Some authors noted a connection between exposure to noise and the objective quality of sleep, but no connection with the subjective quality [16]. Furthermore, some studies showed habituation to noise in the subjective quality of sleep, but not in the objective parameters [17], [18]. However, most studies dealing with objective sleep parameters were carried out in laboratories on young people in good health [12]. Epidemiological studies covering the entire population exposed to aircraft noise are needed for more inclusive and accurate description of its effects on sleep.

Likewise, the majority of studies carried out in the vicinity of airports used data on noise exposure determined by units of sound energy at the exterior of dwellings, estimated by

modeling. The original aspect of this study is that it uses precise data drawn simultaneously from measurements taken both outside and inside the dwellings. This enables simultaneous generation of sound energy and event indicators representative of real exposure of residents to ambient noise such as that produced by aircraft overflights.

In France, studies assessing the effects of exposure to aircraft noise on the sleep quality of residents near airports are few in number and they measured only the subjective quality of sleep with survey questionnaires. Mindful of this, the aim of this study was to better understand and better quantify the effects of aircraft noise on objective parameters of sleep quality of residents living in the vicinity of airports in France, while refining the measurement of noise exposure.

2. METHODS

2.1. Study population

The present study is part of a wider epidemiological research program called DEBATS (*Discussion sur les Effets du Bruit des Avions Touchant la Santé*, or Discussion on the health effects of aircraft noise). The DEBATS study population is composed of residents aged 18 years or older and living in proximity to one of the following three French airports: Paris-Charles de Gaulle, Lyon Saint-Exupéry, and Toulouse-Blagnac. In total, 1,244 individuals participated in the main DEBATS study, which aimed to investigate the effects of exposure to aircraft noise on health, and particularly the subjective quality of sleep [15]. The participation rate (30%) was similar to aircraft noise studies completed in Germany, Italy, and in the UK [19]. These participants replied to a questionnaire administered by an interviewer at their place of residence. At the conclusion of the interview, the interviewer asked them if they would agree to take part in a “sleep study” survey. Subjects were excluded if they declared that they snored during sleep or shared a bedroom with a snorer. For the security of the exterior measuring equipment, participants living in a dwelling situated on the ground floor opening onto a public road were also excluded. In total, 112 volunteers signed and returned their informed consent by mail and took part in the sleep study: 91 residing near Paris-Charles de Gaulle and 21 near Toulouse-Blagnac. The participation rate was 47% near Paris-Charles de Gaulle and 45% near Toulouse-Blagnac. The sleep study was limited to residents in the vicinity of these two airports because a sufficient portion of their population is exposed to aircraft noise levels greater than 55 dB(A) in terms of Lden. The Lden is an annual noise indicator which describes the average equivalent sound pressure levels over a complete year for day (6 a.m. to 6 p.m.), evening (6 p.m. to 10

p.m.), and night (10 p.m. to 6 a.m.) where evening and night sound pressure levels receive a 5 dB and a 10 dB penalty, respectively. The Lden is the “general purpose” indicator defined in the EU directive 2002/49 relating to the assessment and management of environmental noise.

The present study was approved by two national authorities in France, the French Advisory Committee for Data Processing in Health Research and the French National Commission for Data Protection and the Liberties.

2.2. Aircraft noise exposure assessment

Exposure to aircraft noise in participants’ homes was measured around the clock for one week in order to increase the probability of measuring noise under differing meteorological conditions and activity patterns of the airport hubs. Two metrological class 1 sound level meters were installed each time: the first at the exterior wall of the bedroom, 20-25cm in front of the façade, in line with the bedroom window, to detect acoustic events associated with aircraft noise, the second inside the room, on the bedside table, to measure the interior noise level. Technicians set up the equipment and collect it again at the end of the study. The two sound level meters were synchronized at the beginning of the measurements. However, after the measurements, the intercorrelation between both signals was calculated in order to check the temporal synchronization. If needed, the time lag was corrected. Bruitparif (the noise observatory for the Paris area (Île-de-France)) developed an algorithm that enables calculation of the aircraft noise level inside the room, based on these measurements. The first step of the algorithm consists in determining, from the outdoor signal measured on the outer wall of the building, the acoustic events associated with aircraft overflight, based on correspondence between the radar trajectories supplied by the French Civil Aviation Authority (*Direction Générale de l’Aviation Civile: DGAC*) and the observed acoustic events. The second step, based on the measurement taken inside the room, determined the periods affected by aircraft noise, by correlation with the times of acoustic events identified as aircraft noise in the outdoor measurement. The third step consisted in estimation of an exterior/interior transfer function, identifying acoustic signals in the room caused exclusively by the exterior noise. The final stage consisted in statistical analysis of time-matched curves for exterior and interior sound levels at the dwelling, filtering out acoustic events originating indoors (e.g., snoring, clocks, or domestic animals) which occurred during overflight. This filtering is based on comparing the estimate of the sound signal inside the bedroom caused exclusively by exterior noise (using the transfer function) to the sound signal measured in the bedroom. A significant difference between the

two signals corresponds to the presence of an indoor noise. Filtering in this way was necessary in order to produce reliable estimates of indicators linked to noise inside the bedroom generated by the overflight of aircraft.

Many acoustic indicators were derived from these measurements. They were estimated for all sources of noise, but also for aircraft noise only, during the participant's sleep period, from falling asleep to final awakening. A distinction was made between energy indicators (related to the sound energetic average for a given period of time) and event indicators (characteristics and number of events exceeding a given sound level). Energy indicators notably included equivalent continuous acoustic pressure level (**LAeq** for all sources of noise and **LAeq,aero** for aircraft noise only) at the interior (**LAeq,int** for all sources of noise and **LAeq,aero,int** for aircraft noise only) and exterior (**LAeq,ext** for all sources of noise and **LAeq,aero,ext** for aircraft noise only) of the bedroom. This is the average energy level for a given period, and corresponds to a "noise dose" received during a set period. The contribution of aircraft noise to the total level of interior ($\%Contrib,aero,int = LAeq,aero,int / LAeq,int \times 100$) and exterior ($\%Contrib,aero,ext = LAeq,aero,ext / LAeq,ext \times 100$) bedroom noise were each assessed. The following event indicators were determined: the total number of aircraft noise events in the interior (**NA,int**) and exterior (**NA,ext**) of the bedroom; the number of sound events exceeding 30 dB(A) attributable to aircraft overflight, inside the bedroom (**NA30,int**), and exceeding 62 dB(A) on the outside (**NA62,ext**). Another indicator, called the **Harmonica index** (*Indice Harmonica*), was calculated for the total ambient noise at the exterior of the dwelling during the sleep period. This is a noise indicator derived by Bruitparif under the European environmental program, LIFE; it gives summary information on the level of sound pollution on a scale of 0 to 10 (the higher the grade, the greater the sonic environment impairment) and a graphic representation based on the two components of the Harmonica index: the first component is linked to background noise and the second to sound events that emerge from this background noise [20]. This graphic representation neatly illustrates whether a noise is continuous or strongly event-related.

2.3. Sleep assessment

Each participant wore a wrist actigraph during the period of acoustic instrumentation and completed a sleep diary the day after each night. The actigraph records the activity-rest cycle and this enables assessment of the sleep-wake rhythm. It comprises a sensor that detects accelerations linked to movement. A piezoelectric quartz sensor measures the pulse

accelerations on the wrist that generate variable tension with each movement of the subject. These accelerations, above a given threshold, are counted in intervals of one minute and stored with their time of occurrence. Recorder calibration and review and analysis of data are performed through a computer interface. Classification by periods of activity or sleep depends on the sensitivity level of the algorithm. In the present study, a “high” sensitivity of the actigraph with a period of one minute was used: a total of 20 movements was sufficient to designate a period as “awake” [21], [22].

Actigraphy, coupled with analysis of the sleep diary, allowed objective determination of sleep schedule parameters: beginning, end, length, and assessment of motor activity over the course of sleep. Participants did not need to adhere to specific sleep times during the study period. They should behave as much as possible as usual in order to collect sleep parameters that were representative of everyday life. In this study, the following objective parameters of sleep were determined through actimetric measurement:

- Sleep Onset latency (SOL): time between putting out the lights and falling asleep;
- Wake After Sleep Onset (WASO): the total duration of awakenings during sleep;
- Time in Bed (TB): time spent in bed between putting out the lights and finally getting up;
- Total Sleep Period (TSP): time between falling asleep and finally waking up;
- Total Sleep Time (TST): time between falling asleep and finally waking up, reduced by the total duration of awakenings during sleep;
- Sleep Efficiency (SE): total sleep time (TST) / total sleep period (TSP).

All these parameters were dichotomized in order to be linked to aircraft noise exposure. According to the third edition of International Classification of Sleep Disorders (ICSD-3) [23], a sleep onset latency of more than 30 minutes for an adult is considered sleep onset insomnia. The sleep onset latency variable was therefore dichotomized as $SOL \geq 30$ min versus $SOL < 30$ min. Wake After Sleep Onset was dichotomized as $WASO \geq 30$ min versus $WASO < 30$ min: according to the ICSD-3, being awake for a total of more than 30 minutes is characteristic of sleep maintenance insomnia. Time in Bed was dichotomized as $TB > 9$ hr versus $TB \leq 9$ hr in order to study the time that subjects spend in bed. Total Sleep Period (TSP) and Total Sleep Time (TST) were dichotomized as “short sleep” (< 6 hr) versus “normal or long sleep” (≥ 6 hr): adult sleep of less than 6 hours per night on workdays is generally considered as short sleep, with potential comorbidities [24], [25]. Sleep Efficiency (SE) was dichotomized as $< 90\%$ versus $\geq 90\%$: an SE score $< 90\%$ is characteristic of insomnia.

2.4. Statistical analyses

In order to take into account the clustered nature of the data, correlation coefficients between the noise indicators and the objective parameters of sleep quality were calculated using the repeated measures correlation (rmcorr) R package <https://cran.r-project.org/web/packages/rmcorr/> [26]. Risk factors known in the literature as liable to influence sleep were collected either by questionnaire or by objective measurement by the investigators, and were included in the final multivariate analyses: gender; age; marital status; educational qualifications; and body mass index (BMI). Initially, time in bed was also included in the multivariate regression model. However, it did not contribute significantly to the model and did not have any impact on the effect estimate of noise, so it was not included in the final model.

Logistical regression models that take into account data clustering were then executed, treating the objective parameters of sleep as dependent variables, and the acoustic indicators and the previously cited potential confounding factors as covariables, in order to assess the effects of aircraft noise exposure on objective parameters of sleep quality as measured by actigraphy. The models were separately adjusted for each acoustic indicator. Linear regression models were also used to estimate the association between aircraft noise exposure and objective sleep parameters. These models were adjusted on the same confounders as those included in the logistic regression models.

Sensitivity analyses were carried out, separating weekdays from the two days of the weekend. Sleep medication use was also included in the models as a confounding factor.

The analyses were carried out using SAS Version 9.4 software 2014 (Cary, North Carolina, USA).

Table 17 - Description of the 112 participants in the sleep study and of the 1,244 participants in the main DEBATS study

	Sleep study		Main study	
	N=112		N=1,244	
	n	(%)	n	%
Gender				
Female	65	(58)	695	(56)
Male	47	(42)	549	(44)
Age (years)				
18-34	32	(29)	226	(18)
35-44	19	(17)	236	(19)
45-54	27	(24)	266	(21)
55-64	17	(15)	260	(21)
65-74	9	(8)	185	(15)
75+	8	(7)	71	(6)
Marital status				
Single	39	(35)	253	(20)
Married	53	(47)	782	(63)
Widowed	4	(4)	76	(6)
Divorced	16	(14)	133	(11)
Education				
< French high school certificate	39	(35)	452	(36)
French high school certificate	37	(33)	397	(32)
> French high school certificate	36	(32)	395	(32)
BMI				
Underweight or normal weight	58	(52)	562	(46)
Overweight	41	(37)	424	(34)
Obese	13	(12)	249	(20)

3. RESULTS

Table 17 describes the participants in the sleep study and compares them to the 1,244 participants in the main DEBATS study. The two populations were relatively similar, although participants in the sleep study were a little younger than those in the principal DEBATS study (30% and 42% ≥ 55 years, respectively). Table 18 describes the acoustic indicators and the objective parameters of sleep quality. The equivalent continuous noise level, all sources of noise combined, was on average 51 dB(A) at the exterior (LAeq,ext) of the bedroom and 33 dB(A) at the interior (LAeq,int). The equivalent continuous aircraft noise levels at the exterior (LAeq,aero,ext) and interior (LAeq,aero,int) of the participants' bedrooms were respectively 44 dB(A) and 17 dB(A). On average, 37 aircraft noise events were detected at the exterior (NA,ext) and 29 at the interior of the bedroom (NA,int) during the sleep period. Total sleep time (TST) per night was on average 6 hours 56 minutes, with an average sleep onset latency (SOL) of 35 minutes. The average sleep efficiency (SE) was 94%. No differences were observed between weekdays and weekends for acoustic indicators. For the objective sleep parameters, the participants slept more on weekends than during the week, with total sleep time (TST) of respectively 7 hours 16 minutes and 6 hours 48 minutes. They spent more time in bed (TB) on weekends (8 hours 54 minutes) than during the week (8 hours 24 minutes), with slightly higher sleep efficiency (SE) on weekends (94.2% vs 93.8% for the working week).

Table 19 shows that 18% of individuals slept less than 6 hours per night (TST). Almost 45% of participants showed sleep onset insomnia (SOL ≥ 30 min) or sleep maintenance insomnia (WASO ≥ 30 min). About 13% of participants had poor sleep efficiency (SE score $< 90\%$).

Table 20 presents the correlations between the acoustic indicators and the objective sleep parameters. Significant positive correlations were obtained between the acoustic indicators, whether energy indicators or event indicators, and TB, TSP, TST and WASO. The more the level or number of aircraft noise events increased, the more time was spent in bed (TB), and the duration of TSP, TST and WASO increased. Weakly significant negative correlations were observed between the acoustic indicators and sleep efficiency (SE): increase in the level of aircraft noise exposure degraded sleep efficiency. Significant correlations were shown between the Harmonica index and all the objective sleep parameters except SOL.

Table 18 - Description of noise indicators and objective sleep parameters

		All days				Weekdays		Weekend	
		Number of nights	Mean	SD	P5	P95	Mean	SD	Mean
Noise indicators									
L _{Aeq,ext} (dB(A))	839	51	5	42	60	51	6	51	5
L _{Aeq,int} (dB(A))	840	33	7	24	47	33	7	33	7
L _{Aeq,aero,ext} (dB(A))	825	44	14	0	58	44	13	43	15
L _{Aeq,aero,int} (dB(A))	826	17	10	0	31	17	10	16	9
%Contrib,aero,ext (%)	825	46	32	0	93	46	32	45	33
% Contrib,aero,int (%)	826	11	16	0	46	11	17	11	16
N _{ext}	825	37	36	0	99	37	36	38	38
N _{int}	826	29	30	0	84	28	30	30	32
NA62,ext	825	25	30	0	79	24	29	28	33
NA30,int	826	25	29	0	79	25	28	26	31
Harmonica	786	5	1	3	7	5	1	5	1
Objective sleep parameters									
SOL (h:min:s)	885	00:35:39	00:38:08	00:08:00	01:59:00	00:36:05	00:39:48	00:34:26	00:33:17
TB (h:min:s)	885	08:32:27	01:35:57	05:54:00	11:05:00	08:24:28	01:32:58	08:54:08	01:40:39
TSP (h:min:s)	885	07:23:34	01:29:19	04:53:00	09:35:00	07:16:17	01:25:49	07:43:22	01:35:37
TST (h:min:s)	885	06:56:26	01:25:18	04:32:00	09:01:00	06:48:59	01:21:34	07:16:43	01:31:53
WASO (h:min:s)	885	00:27:08	00:19:42	00:06:00	01:05:00	00:27:18	00:20:38	00:26:39	00:16:56
SE	885	94	4	86	98	94	4	94	4

Table 19 - Distribution of the participants according to objective sleep parameters

		Number of participants	Percentage of participants
SOL	< 30 min	62	55
	≥ 30 min	50	45
TB	≤ 9hr	74	66
	> 9hr	38	34
TSP	≥ 6hr	100	89
	< 6hr	12	11
TST	≥ 6hr	92	82
	< 6hr	20	18
WASO	< 30 min	73	65
	≥ 30 min	39	35
SE	≥ 90	98	88
	< 90	14	13

The odds ratios (ORs) and their confidence intervals (95% CI) derived from logistic regression models between acoustic indicators and objective sleep parameters are shown in [Table 21](#). Unadjusted and adjusted findings were very similar. A significant positive relationship was found between the energy and event indicators of exposure to aircraft noise (except for %Contrib,aero,int) and TB and TSP: an increase in aircraft noise or the number of aircraft noise events in both the interior and exterior of the bedroom increased the probability of spending more than 9 hours in bed (TB) and of sleeping more than 6 hours (TSP). All of the energy and event indicators of exposure to aircraft noise were significantly positively related to TST. A significant positive relationship was found between all of the energy indicators (except LAeq,aero,ext) and sleep onset latency (SOL): an increase of 10 dB(A) in the equivalent level of noise inside the room (LAeq,aero,int) was associated with an increase in SOL (OR=1.26, 95% CI: 1.00-1.60). With regard to wake after sleep onset (WASO), significant positive relationships were found for all the event indicators: an increase of 10 aircraft noise events exceeding 30 dB(A) inside the bedroom was associated with an increase in the total WASO (OR=1.09, 95% CI : 1.03-1.16). ORs between acoustic indicators and sleep efficiency (SE) indicated deterioration in SE with increasing level or number of aircraft noise events; however, these associations were not significant when confounders were included in the models. ORs between the Harmonica index and the objective sleep parameters were in the same direction as for the other acoustic indicators. Deterioration in the soundscape was significantly associated with an increase in TB, TSP, TST and WASO, and a reduction in sleep efficiency.

The results were very similar when linear regression models were used instead of logistic regression models ([Table 22](#)).

There was no difference in these associations between weekdays and weekends (results not shown).

The results remained similar if the models included sleep medication use as a potential confounding factor (results not shown).

Table 20 - Correlations between noise indicators and objective sleep parameters

	SOL	TB	TSP	TST	WASO	SE
	r* (p-value)	r* (p-value)	r* (p-value)	r* (p-value)	r* (p-value)	r* (p-value)
Integrated indicators						
L _{Aeq,aero,ext}	-0.04 (0.32)	0.21 (<0.001)	0.25 (<0.001)	0.24 (<0.001)	0.15 (<0.001)	-0.09 (0.01)
L _{Aeq,aero,int}	0.01 (0.79)	0.17 (<0.001)	0.17 (<0.001)	0.16 (<0.001)	0.11 (0.002)	-0.08 (0.03)
%Contrib aero,ext	0.02 (0.53)	0.12 (0.001)	0.10 (0.006)	0.10 (0.01)	0.07 (0.07)	-0.05 (0.21)
% Contrib,aero ,int	0.01 (0.71)	-0.04 (0.27)	-0.05 (0.15)	-0.04 (0.33)	-0.1 (0.005)	0.06 (0.09)
Noise event indicators						
N _{ext}	-0.09 (0.01)	0.45 (<0.001)	0.52 (<0.001)	0.52 (<0.001)	0.20 (<0.001)	-0.03 (0.37)
N _{int}	-0.07 (0.08)	0.36 (<0.001)	0.41 (<0.001)	0.41 (<0.001)	0.18 (<0.001)	-0.05 (0.20)
NA _{62,ext}	- 0.09 (0.02)	0.36 (<0.001)	0.41 (<0.001)	0.41 (<0.001)	0.16 (<0.001)	-0.03 (0.48)
NA _{30,int}	-0.06 (0.12)	0.33 (<0.001)	0.37 (<0.001)	0.36 (<0.001)	0.16 (<0.001)	-0.04 (0.28)
Harmonica	0.004 (0.91)	0.19 (<0.001)	0.21 (<0.001)	0.20 (<0.001)	0.13 (0.001)	-0.08 (0.05)

* r: Correlations coefficients

Bold values are statistically significant $p < 0.05$.

Table 21 - Odds ratios for the relationship between noise indicators and objective sleep parameters

	SOL ≥ 30 min OR (95% CI)	TB > 9 hr OR (95% CI)	TSP < 6 hr OR (95% CI)	TST < 6 hr OR (95% CI)	WASO ≥ 30 min OR (95% CI)	SE < 90 OR (95% CI)
Integrated indicators						
Crude estimates						
LAeq.aero.ext ¹	1.07 (0.93-1.23)	1.36 (1.12-1.65)	0.73 (0.64-0.83)	0.72 (0.62-0.83)	1.22 (1.07-1.39)	1.23 (0.89-1.69)
LAeq.aero.int ¹	1.27 (1.02-1.59)	1.53 (1.24-1.88)	0.60 (0.47-0.75)	0.61 (0.49-0.75)	1.10 (0.91-1.33)	1.40 (0.97-2.02)
%Contrib.aero.ext ²	1.08 (1.02-1.16)	1.08 (1.02-1.15)	0.89 (0.82-0.97)	0.91 (0.84-0.98)	1.00 (0.94-1.05)	1.09 (1.00-1.18)
% Contrib.aero.int ²	1.23 (1.09-1.38)	1.03 (0.93-1.14)	0.88 (0.72-1.09)	0.86 (0.74-1.00)	0.88 (0.77-1.01)	1.07 (0.94-1.22)
Adjusted estimates*						
LAeq.aero.ext ¹	1.07 (0.92-1.24)	1.42 (1.14-1.77)	0.70 (0.62-0.80)	0.66 (0.57-0.76)	1.20 (1.05-1.37)	1.17 (0.88-1.55)
LAeq.aero.int ¹	1.26 (1.00-1.60)	1.64 (1.29-2.08)	0.57 (0.46-0.72)	0.55 (0.45-0.69)	1.08 (0.88-1.31)	1.30 (0.93-1.81)
%Contrib.aero.ext ²	1.09 (1.02-1.16)	1.09 (1.02-1.16)	0.88 (0.81-0.96)	0.89 (0.83-0.96)	1.00 (0.90-1.10)	1.06 (0.97-1.16)
% Contrib.aero.int ²	1.22 (1.08-1.38)	1.04 (0.94-1.15)	0.87 (0.68-1.10)	0.82 (0.69-0.97)	0.86 (0.76-0.99)	1.02 (0.88-1.18)
Noise events indicators						
Crude estimates						
N.ext ³	1.03 (0.97-1.09)	1.23 (1.15-1.32)	0.71 (0.64-0.79)	0.74 (0.68-0.81)	1.11 (1.05-1.18)	1.09 (1.01-1.17)
N.int ³	1.05 (0.98-1.12)	1.23 (1.14-1.32)	0.68 (0.60-0.78)	0.73 (0.66-0.81)	1.10 (1.03-1.16)	1.10 (1.01-1.20)

	SOL ≥ 30 min	TB > 9 hr	TSP < 6 hr	TST < 6 hr	WASO ≥ 30 min	SE < 90
	OR (95% CI)	OR (95% CI)	OR (95% CI)	OR (95% CI)	OR (95% CI)	OR (95% CI)
NA62.ext ³	1.04 (0.98-1.11)	1.28 (1.18-1.39)	0.66 (0.57-0.76)	0.71 (0.63-0.81)	1.10 (1.02-1.19)	1.11 (1.02-1.21)
NA30.int ³	1.06 (1.00-1.13)	1.23 (1.14-1.32)	0.66 (0.57-0.77)	0.72 (0.63-0.81)	1.10 (1.03-1.17)	1.11 (1.02-1.22)
Adjusted estimates*						
N.ext ³	1.02 (0.96-1.08)	1.27 (1.17-1.38)	0.67 (0.61-0.74)	0.69 (0.63-0.76)	1.11 (1.04-1.18)	1.06 (0.99-1.14)
N.int ³	1.04 (0.97-1.11)	1.27 (1.17-1.39)	0.66 (0.59-0.74)	0.69 (0.62-0.76)	1.09 (1.03-1.16)	1.07 (0.98-1.16)
NA62.ext ³	1.04 (0.97-1.11)	1.34 (1.23-1.46)	0.62 (0.54-0.72)	0.65 (0.58-0.74)	1.10 (1.02-1.18)	1.07 (0.98-1.16)
NA30.int ³	1.05 (0.98-1.13)	1.28 (1.18-1.38)	0.64 (0.56-0.73)	0.68 (0.60-0.75)	1.10 (1.03-1.17)	1.08 (0.99-1.17)
Harmonica⁴						
Crude estimates	1.11 (0.96-1.28)	1.32 (1.09-1.61)	0.72 (0.59-0.89)	0.70 (0.58-0.85)	1.28 (1.09-1.49)	1.21 (1.04-1.41)
Adjusted estimates*	1.07 (0.94-1.22)	1.36 (1.14-1.61)	0.65 (0.53-0.80)	0.61 (0.51-0.73)	1.26 (1.08-1.48)	1.20 (1.02-1.41)

* Multivariate regression model adjusted on gender; age; marital status; educational qualifications; and body mass index (BMI)

¹Per 10 dBA increase

²Per 10% increase

³Per 10 events increase

⁴Per 1 point increase

Bold values are statistically significant ($p < 0.05$)

Table 22 - Results of the linear regression models for the relationship between noise indicators and objective sleep parameters

	SOL	TB	TSP	TST	WASO	SE
	Increase in second (95% CI)	Increase in second (95% CI)	Increase in second (95% CI)	Increase in second (95% CI)	Increase in second (95% CI)	Increase (95% CI)
Integrated indicators						
Crude estimates						
LAeq.aero.ext ¹	-3.32 (-17.0 - 10.4)	101.8 (69.7 - 133.9)	116.5 (86.7 - 146.3)	102.6 (74.6 - 131.1)	14.5 (8.13 - 20.8)	-0.03 (-0.05 - -0.01)
LAeq.aero.int ¹	12.1 (-8.66 - 32.9)	132.1 (82.9 - 181.3)	128.8 (82.6 - 174.8)	110.9 (67.1 - 154.7)	17.9 (8.09 - 27.7)	-0.04 (-0.08 - -0.01)
%Contrib.aero.ext ²	4.48 (-1.81 - 10.8)	29.5 (14.5 - 44.6)	26.8 (12.7 - 40.9)	23.1 (9.65 - 36.4)	3.40 (0.39 - 6.4)	-0.01 (-0.02 - 0.003)
%Contrib.aero.int ²	5.46 (-5.77 - 16.7)	-2.70 (-29.7 - 24.3)	-1.92 (-27.3 - 23.5)	1.30 (-22.6 - 25.2)	-6.08 (-11.3 - -0.83)	0.01 (-0.004 - 0.03)
Adjusted estimates*						
LAeq.aero.ext ¹	-4.35 (-18.4 - 9.68)	103.9 (71.4 - 136.5)	120.8 (90.9 - 150.7)	107.1 (78.8 - 135.4)	14.2 (7.75 - 20.6)	-0.03 (-0.05 - -0.01)
LAeq.aero.int ¹	10.2 (-11.3 - 31.6)	136.2 (86.2 - 186.3)	135.4 (89.1 - 181.6)	117.7 (74.0 - 161.7)	17.1 (7.15 - 27.1)	-0.04 (-0.08 - -0.005)
%Contrib.aero.ext ²	4.38 (-2.04 - 10.8)	30.3 (15.2 - 45.5)	28.2 (14.3 - 42.2)	24.6 (11.4 - 37.9)	3.22 (0.19 - 6.25)	-0.01 (-0.02 - 0.004)
%Contrib.aero.int ²	4.64 (-6.90 - 16.2)	-3.93 (-31.4 - 23.5)	-2.96 (-28.6 - 22.7)	1.61 (-22.5 - 25.7)	-6.88 (-12.2 - -1.56)	0.02 (-0.003 - 0.03)
Noise events indicators						
Crude estimates						
N.ext ³	-4.07 (-9.64 - 1.49)	82.9 (70.6 - 95.3)	91.6 (80.4 - 102.9)	85.9 (75.2 - 96.6)	8.04 (5.45 - 10.6)	-0.01 (-0.02 - 0.003)

	SOL	TB	TSP	TST	WASO	SE
	Increase in second (95% CI)	Increase in second (95% CI)	Increase in second (95% CI)	Increase in second (95% CI)	Increase in second (95% CI)	Increase (95% CI)
N.int ³	-2.83 (-9.39 - 3.73)	80.7 (65.8 - 95.5)	86.9 (73.3 - 100.6)	80.4 (67.4 - 93.4)	8.27 (5.22 - 11.3)	-0.01 (-0.02 - 0.002)
NA62.ext ³	-4.34 (-11.0 - 2.27)	81.6 (66.6 - 96.5)	87.1 (73.3 - 100.9)	81.2 (68.0 - 94.3)	7.78 (4.69 - 10.9)	-0.01 (-0.02 - 0.004)
NA30.int ³	-2.08 (-8.84 - 4.68)	76.7 (61.3 - 92.1)	81.2 (67.0 - 95.5)	74.3 (60.8 - 87.9)	8.18 (5.04 - 11.3)	-0.01 (-0.02 - 0.002)
Adjusted estimates*						
N.ext ³	-4.99 (-10.7 - 0.74)	85.6 (73.2 - 98.0)	93.2 (82.0 - 104.4)	87.3 (76.7 - 97.9)	7.80 (5.16 - 10.4)	-0.01 (-0.01 - 0.004)
N.int ³	-3.64 (-10.4 - 3.10)	84.0 (69.1 - 98.9)	89.5 (76.1 - 103.0)	82.9 (70.1 - 95.7)	7.98 (4.88 - 11.1)	-0.01 (-0.02 - 0.004)
NA62.ext ³	-5.10 (-11.9 - 1.68)	85.3 (70.4 - 100.2)	89.8 (76.2 - 103.4)	83.7 (70.7 - 96.6)	7.49 (4.36 - 10.6)	-0.005 (-0.02 - 0.01)
NA30.int ³	-2.93 (-9.88 - 4.01)	80.8 (65.3 - 96.2)	84.8 (70.8 - 98.9)	77.8 (64.4 - 91.2)	7.84 (4.65 - 11.0)	-0.01 (-0.02 - 0.004)
Harmonica⁴						
Crude estimates	60.3 (-105.3 - 225.8)	1153.2 (759.5 - 1546.9)	1115.0 (750.6 - 1479.4)	983.2 (635.2 - 1331.2)	147.6 (69.9 - 225.4)	-0.32 (-0.60 - -0.038)
Adjusted estimates*	46.1 (-124.2 - 216.5)	1229.1 (831.0 - 1627.2)	1210.9 (849.8 - 1572.1)	1075.0 (731.1 - 1418.9)	142.9 (63.9 - 222.0)	-0.29 (-0.57 - -0.005)

* Multivariate regression model adjusted on gender; age; marital status; educational qualifications; and body mass index (BMI)

¹Per 10 dBA increase

²Per 10% increase

³Per 10 events increase

⁴Per 1 point increase

Bold values are statistically significant ($p < 0.05$)

4. DISCUSSION

This field study is the first in France to investigate a relationship between exposure to aircraft noise and objective sleep quality assessed by means of actimetric measurement. It included 112 participants for a total of 911 instrumentation days (an average of 8 instrumentation days per subject). The average total sleep period (TSP) of participants (7 hours 16 minutes on weekdays and 7 hours 43 minutes at the weekend) was similar to that of the general French population. According to a survey by the *Institut National du Sommeil et de la Vigilance* (National Institute of Sleep and Alertness) in late 2016 [27], the French sleep on average 7 hours and 7 minutes during the week and 8 hours and 4 minutes at the weekend. Therefore, in line with the literature, the duration of sleep at weekends is longer than on weekdays [28]. However, the difference in sleep duration between weekends and weekdays was smaller for participants in our study than for the French population as a whole (27 minutes versus 57 minutes). Given that nocturnal exposure to aircraft noise is comparable on weekends and weekdays, the potential for longer sleep on weekends was presumably limited. On the other hand, the average sleep onset latency of the participants (35 minutes) was higher than that of the general population (24 minutes) [27], even if it is rough to compare sleep onset latency estimated with actigraphy with survey estimates. The prevalence of short sleepers (TST < 6 hours) in this study (18%) was similar to the estimate in the 2010 INPES (National Institute for Prevention and Health Education) “Health barometer” (*Baromètre santé*) (also 18%) [29]. The sound level for all sources of noise combined measured in the bedrooms of participants during sleep periods (LAeq,int) was on average 33 dB(A), relatively similar to the level recommended by the WHO for inside bedrooms (30 dB(A)) [2]. About 67% of our study’s population were exposed to noise levels inside the room averaging more than 30 dB(A).

Several studies have been conducted around large airports, particularly in Europe, in order to investigate the effects of aircraft noise exposure on the sleep of residents. The majority of these studies concerned the subjective quality of sleep and showed that exposure to aircraft noise causes poor self-reported sleep quality, an increased feeling of fatigue on waking up in the morning and an increase in consumption of non-prescription drugs [30]–[33]. This was also the case for the main DEBATS study, which showed an association between exposure to aircraft noise and short reported sleep duration (less than 6 hours) (OR=1.63, 95% CI: 1.15–2.32) for an increase of 10 dB(A) in the level of aircraft noise, and a feeling of fatigue on waking up (OR=1.23, 95% CI: 1.00–1.54) for an increase of 10 dB(A) in the level of aircraft noise [15].

The majority of studies on the effects of exposure to aircraft noise on objective sleep quality parameters were carried out in laboratories, with just a few based on fieldwork. Around airport, field studies showed that exposure to aircraft noise increased sleep onset latency [32], the probability of waking [34] and movements [30], [32] and changed vegetative functions [35], [36] in those living near airports. In the laboratory, in addition to these effects, a reduction in slow-wave sleep and changes in the structure of sleep were observed [8], [37].

As with the majority of studies in the literature, the present study showed that exposure to aircraft noise caused an increase in sleep onset latency (SOL) and wake time after sleep onset (WASO) [32], [34]. Basner *et al.* [34] showed that exposure to aircraft noise in the vicinity of Cologne-Bonn Airport was related to an increase in the probability of awakening. An increase in time of sleep onset was observed after exposure to aircraft noise in residents living close to Amsterdam Schiphol [32].

Contrary to the majority of studies, which found that exposure to transportation noise causes a reduction in total sleep time [38], [39], the present study found increases in total sleep time (TST) and time in bed (TB). This could be a matter of behavioral adaption to sleep deprivation: as wake time after sleep onset (WASO) increases following exposure to aircraft noise, sleep efficiency (SE) is unsatisfactory. Subjects would therefore stay longer in bed in order to sleep more and recuperate. However, uncontrolled or residual confounding could also explain this finding. Nevertheless, an earlier laboratory study also found an increase in total sleep time after exposure to aircraft noise [37]. The authors interpreted this as adaptation to partial sleep deprivation during previous nights when the subjects were exposed to noise [37]. Ohrstrom and Skanberg also observed a significant reduction in total sleep time and time in bed, as measured by actigraphy, after a reduction in road traffic at night [40]. The authors explained this reduction as the result of long wake times and by the fact that the individuals were probably much less tired after the reduction in nocturnal traffic [40].

Some studies showed that sleep habits differed between weekdays and weekends [41], [42]. In spite of these differences, the relationships we observed between exposure to aircraft noise and objective sleep parameters were the same on weekdays and on the weekend.

The participants in this study were recruited from subjects who had taken part in the main DEBATS study. Participants in the main study were randomly selected, but those who participated in our sleep study were volunteers. It could therefore be that they were the most concerned and bothered by noise nuisances. The prevalence of subjects reporting poor sleep

was 43% in the sleep study, while it was 32% in the main DEBATS study. In the present study, 32% of subjects also reported feeling tired on waking up in the morning, compared to 30% in the main study. Concerning annoyance, 24% of participants in the present study reported being extremely or bothered by aircraft noise while the corresponding figure in the main DEBATS study was 18%. Thus, a slight selection bias probably cannot be ruled out in interpreting the results of the sleep study.

The first strength of the present study was the estimation of the objective sleep quality parameters by means of an actigraph which participants wore on their wrists. Actimetric recording has rarely been used in epidemiological studies. Polysomnography is the laboratory reference method. Its high cost and the practical difficulties linked to its implementation in the dwellings of participants have meant that few field studies have used this method. Actigraphy is easy to perform in a larger sample while preserving the sleep habits of participants in their homes. It cannot only estimate objective parameters of sleep quality, such as TST and WASO [43], but also diagnose certain sleep problems [44]. Martoni *et al.* showed that actigraphy and ambulatory polysomnography can produce similar results concerning chronic insomnia [45]. O'Driscoll *et al.* demonstrated that actigraphy provides a correct indication of the level of sleep fragmentation in children [46]. However, there are uncertainties regarding the assessment of objective sleep parameters through actigraphy. A review of the literature by Martin and Hakim showed that actigraphy was of limited use compared to polysomnography in estimating sleep onset latency (SOL), in particular for subjects suffering from a sleep disorder [43]. Furthermore, actigraphy defines awakening as a certain number of movements per unit of time. In the present study the threshold was 20. This definition can lead to a classification bias: an individual who is totally immobile but is in fact awake is considered as being in a sleep phase, and an individual making a large number of movements is treated as being awake, while in reality they may be asleep. Nonetheless, one can reasonably hope that this bias is independent of exposure to aircraft noise, and would have led to under-estimation of the associations observed in this study. It has also been shown that actigraphy had less validity when the actigraph was worn only in bed [44]. This was not the case in this study, since participants wore the actigraph throughout the instrumentation period, by day as well as by night, which strengthens the validity of the values obtained for the sleep parameters. Moreover, actimetric assessment was completed using information reported by the participants in a sleep diary they filled out each morning. Data from this sleep diary enabled adjustment and correction of any irregularities in the actimetric measurements.

The second strength of this study concerns the acoustic measurements from which acoustic indicators were estimated. These measurements were performed at the homes of the participants, both inside and outside their bedrooms. Estimation of indicators from the inside of the dwelling made it possible to take into account any sound insulation of the building, and the practice of opening and closing windows, while French and European Union regulations, and also other epidemiological studies that have been carried out to date, were based on noise exposure at building exteriors, despite the fact that aircraft noise measured indoors was shown to be more closely related to sleeping problems than levels measured outdoors [47]; this review of the literature of field studies of sleep problems induced by exposure to aircraft noise indicated that, in almost all cases where acoustic measurements were made at the outside of the dwelling, outdoor sound levels were not predictive of sleep disorder. This does not apply to the present study: acoustic measurements both inside the bedroom and at the exterior were associated with objective sleep parameter values.

The acoustic measurements also allowed us to estimate not just energy indicators but also event indicators to characterize aircraft noise exposure, while almost all epidemiological studies on the subject used only energy indicators. Although energy indicators are recommended by the European Directive of 2002 [48] relating to the management of environmental noise, event indicators are currently recommended for studies on the effects of noise on sleep, because they can better characterize aircraft noise [49]. The present study found that, contrary to the energy indicators, the event indicators were significantly related to almost all objective parameters of sleep quality that were considered. These results confirm those obtained by Ohrstrom and Rylander, that the number of road traffic noise events had a considerably more significant effect on the quality of sleep, assessed objectively and subjectively, than did the continuous noise level [50]. Griefahn *et al.* also showed, in a laboratory study, that the equivalent level of noise (LAeq) of transport (road, rail and aviation) was a good predictor of subjectively assessed sleep quality, but not of physiological sleep problems such as awakenings [51]. The WHO also pointed out that event indicators seemed to be more predictive of sudden short-term effects, such as movement onset, awakening, cardiovascular response and change in sleep stage [2].

5. CONCLUSIONS

This study is the first in France and one of only few in Europe to investigate an association between exposure to aircraft noise and objective sleep quality assessed by actimetric measurements at the homes of residents near airports. Its results confirm that exposure to aircraft noise affects the objective parameters of sleep quality, with an increase in time of sleep onset and duration of wake after sleep onset, and a reduction in sleep efficiency. It also increases total sleep time and time in bed: this could be a matter of behavioral adaption to sleep deprivation. The results also support the hypothesis that acoustic event indicators can better characterize the effects of aircraft noise on sleep than the more widely used energy indicators.

6. Acknowledgements

The Airport Pollution Control Authority (Acnusa) requested the French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks (Ifsttar) for carrying out this study. The authors would like to thank them for their confidence in them.

They are grateful to all the participants in the study.

They also thank Paris Airports and the French Civil Aviation Authority for providing noise exposure maps. They are also grateful to Inès Khati for her participation in the implementation of the study, and to Iain McGill for the translation of the manuscript from French into English.

7. Funding

The present study was supported by funds from the French Ministry of Health, the French Ministry of Environment, and the French Civil Aviation Authority. We would like to thank them for their kind assistance.

8. REFERENCES

- [1] European Environment Agency, *Noise in Europe 2014*. Luxembourg: Publications Office, 2014.
- [2] WHO, *Night noise guidelines for Europe*. Copenhagen, Denmark: World Health Organization Europe, 2009.
- [3] WHO, *Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe*. Copenhagen: World Health Organization, Regional Office for Europe, 2011.
- [4] B. Griefahn, K. Scheuch, G. Jansen, and M. Spreng, 'Protection goals for residents in the vicinity of civil airports', *Noise Health*, vol. 6, no. 24, pp. 51–62, Jul. 2004.
- [5] D. Halperin, 'Environmental noise and sleep disturbances: A threat to health?', *Sleep Sci*, vol. 7, no. 4, pp. 209–12, Dec. 2014.
- [6] E. Öhrström, 'Research on noise since 1988: present state', in *INRETS*, Nice, 1993, vol. 1.
- [7] B. Griefahn and M. Spreng, 'Disturbed sleep patterns and limitation of noise', *Noise Health*, vol. 6, no. 22, pp. 27–33, Jan. 2004.
- [8] M. Basner, C. Glatz, B. Griefahn, T. Penzel, and A. Samel, 'Aircraft noise: effects on macro- and microstructure of sleep', *Sleep Med*, vol. 9, no. 4, pp. 382–7, May 2008.
- [9] G. Hajak *et al.*, *Impact of overnight traffic noise on sleep quality, sleepiness, and vigilant attention in long-haul truck drivers: Results of a pilot study*, vol. 17. 2015.
- [10] K. I. Hume, M. Brink, and M. Basner, 'Effects of environmental noise on sleep', *Noise Health*, vol. 14, no. 61, pp. 297–302, Nov. 2012.
- [11] S. Morrell, R. Taylor, and D. Lyle, 'A review of health effects of aircraft noise', *Aust N Z J Public Health*, vol. 21, no. 2, pp. 221–36, Apr. 1997.
- [12] S. Perron, L. F. Tetreault, N. King, C. Plante, and A. Smargiassi, 'Review of the effect of aircraft noise on sleep disturbance in adults', *Noise Health*, vol. 14, no. 57, pp. 58–67, Mar. 2012.
- [13] K. P. Waye, A. Clow, S. Edwards, F. Hucklebridge, and R. Rylander, 'Effects of nighttime low frequency noise on the cortisol response to awakening and subjective sleep quality', *Life Sci*, vol. 72, no. 8, pp. 863–75, Jan. 2003.
- [14] L. Stosic, G. Belojevic, and S. Milutinovic, 'Effects of traffic noise on sleep in an urban population', *Arh Hig Rada Toksikol*, vol. 60, no. 3, pp. 335–42, Sep. 2009.
- [15] A.-M. Nassur, M. Lefèvre, B. Laumon, D. Léger, and A.-S. Evrard, 'Aircraft Noise Exposure and Subjective Sleep Quality: The Results of the DEBATS Study in France', *Behav. Sleep. Med.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–12, Nov. 2017.

- [16] P. Frei, E. Mohler, and M. Roosli, 'Effect of nocturnal road traffic noise exposure and annoyance on objective and subjective sleep quality', *Int J Hyg Env. Health*, vol. 217, no. 2–3, pp. 188–95, Mar. 2014.
- [17] M. Kuroiwa, P. Xin, S. Suzuki, Y. Sasazawa, T. Kawada, and Y. Tamura, 'Habituation of Sleep to Road Traffic Noise Observed Not by Polygraphy but by Perception', *J. Sound Vib.*, vol. 250, no. 1, pp. 101–106, 2002.
- [18] J. L. Eberhardt and K. R. Akselsson, 'The disturbance by road traffic noise of the sleep of young male adults as recorded in the home', *J. Sound Vib.*, vol. 114, no. 3, pp. 417–434, 1987.
- [19] L. Jarup *et al.*, 'Hypertension and Exposure to Noise Near Airports: the HYENA Study', *Environ. Health Perspect.*, vol. 116, no. 3, pp. 329–333, 2008.
- [20] F. Mietlicki, C. Mietlicki, C. Ribeiro, P. Gaudibert, B. Vincent, and V. Gissinger, 'New tools to inform the public about environmental noise in cities and to assist decision-making', in *Euro Noise*, Maastricht, 2015.
- [21] E. J. W. V. Someren, 'Improving actigraphic sleep estimates in insomnia and dementia: how many nights?', *J. Sleep Res.*, vol. 16, no. 3, pp. 269–275, Sep. 2007.
- [22] M. Elbaz, K. Yaou, A. Metlaine, M. Martoni, and D. Leger, 'Validation of a new actigraph motion watch versus polysomnography on 70 healthy and suspected sleepdisordered subjects', *J. Sleep Res.*, vol. 21, no. 1, p. 218, 2012.
- [23] *International classification of sleep disorders – Third Edition (ICSD-3)*, 3rd ed. American Academy of Sleep Medicine, 2014.
- [24] F. P. Cappuccio, L. D'Elia, P. Strazzullo, and M. A. Miller, 'Sleep Duration and All-Cause Mortality: A Systematic Review and Meta-Analysis of Prospective Studies', *Sleep*, vol. 33, no. 5, pp. 585–592, May 2010.
- [25] L. M. Kurina, M. K. McClintock, J.-H. Chen, L. J. Waite, R. A. Thisted, and D. S. Lauderdale, 'Sleep duration and all-cause mortality: a critical review of measurement and associations', *Ann. Epidemiol.*, vol. 23, no. 6, pp. 361–370, Jun. 2013.
- [26] J. Z. Bakdash and L. R. Marusich, 'Repeated Measures Correlation', *Front. Psychol.*, vol. 8, Apr. 2017.
- [27] 'Enquête INSV/MGEN "Dormir seul ou pas : quel impact sur le sommeil ?"', *Institut National du Sommeil et de la Vigilance*, 2017. [Online]. Available: <http://www.institut-sommeil-vigilance.org/la-journee-du-sommeil-2>. [Accessed: 05-Apr-2018].

- [28] B. Thorleifsdottir, J. . Björnsson, B. Benediktsdottir, T. Gislason, and H. Kristbjarnarson, ‘Sleep and sleep habits from childhood to young adulthood over a 10-year period’, *J. Psychosom. Res.*, vol. 53, pp. 529–537, Jul. 2002.
- [29] D. Leger, F. Beck, J. B. Richard, F. Sauvet, and B. Faraut, ‘The risks of sleeping “too much”. Survey of a National Representative Sample of 24671 adults (INPES health barometer)’, *PLoS One*, vol. 9, no. 9, p. e106950, 2014.
- [30] S. A. Janssen, M. R. Centen, H. Vos, and I. van Kamp, ‘The effect of the number of aircraft noise events on sleep quality’, *Appl. Acoust.*, vol. 84, pp. 9–16, 2014.
- [31] S. J. Kim *et al.*, ‘Exposure-Response Relationship Between Aircraft Noise and Sleep Quality: A Community-based Cross-sectional Study’, *Osong Public Health Res Perspect*, vol. 5, no. 2, pp. 108–14, Apr. 2014.
- [32] W. Passchier-Vermeer, H. Vos, J. Steenbekkers, F. van der Ploeg, and K. Groothuis-Oudshoorn, ‘Sleep disturbance and aircraft noise exposure : Exposure-effect relationships’, Division Public Health, The Netherlands, TNO report 2002.027, Jun. 2002.
- [33] E. A. Franssen, C. M. van Wiechen, N. J. Nagelkerke, and E. Lebrecht, ‘Aircraft noise around a large international airport and its impact on general health and medication use’, *Occup Env. Med*, vol. 61, no. 5, pp. 405–13, May 2004.
- [34] M. Basner, A. Samel, and U. Isermann, ‘Aircraft noise effects on sleep: application of the results of a large polysomnographic field study’, *J Acoust Soc Am*, vol. 119, no. 5 Pt 1, pp. 2772–84, May 2006.
- [35] Y. Aydin and M. Kaltenbach, ‘Noise perception, heart rate and blood pressure in relation to aircraft noise in the vicinity of the Frankfurt airport’, *Clin Res Cardiol*, vol. 96, no. 6, pp. 347–58, Jun. 2007.
- [36] F. P. Schmidt *et al.*, ‘Effect of nighttime aircraft noise exposure on endothelial function and stress hormone release in healthy adults’, *Eur Heart J*, vol. 34, no. 45, pp. 3508–14a, Dec. 2013.
- [37] M. Basner and A. Samel, ‘Effects of Nocturnal Aircraft Noise on Sleep Structure’, *Somnologie*, vol. 9, no. 2, pp. 84–95, May 2005.
- [38] A. Muzet, ‘Environmental noise, sleep and health’, *Sleep Med Rev*, vol. 11, no. 2, pp. 135–42, Apr. 2007.
- [39] S. Pirrera, E. De Valck, and R. Cluydts, ‘Nocturnal road traffic noise: A review on its assessment and consequences on sleep and health’, *Env. Int*, vol. 36, no. 5, pp. 492–8, Jul. 2010.

- [40] E. Öhrström and A. Skånberg, ‘Longitudinal surveys on effects of road traffic noise: substudy on sleep assessed by wrist actigraphs and sleep logs’, *J. Sound Vib.*, vol. 272, no. 3–5, pp. 1097–1109, 2004.
- [41] J. Taillard, P. Philip, and B. Bioulac, ‘Morningness/eveningness and the need for sleep’, *J. Sleep Res.*, vol. 8, no. 4, pp. 291–295, Dec. 1999.
- [42] L. Hale, ‘Who has time to sleep?’, *J. Public Health*, vol. 27, no. 2, pp. 205–211, Jun. 2005.
- [43] J. L. Martin and A. D. Hakim, ‘Wrist Actigraphy’, *CHEST*, vol. 139, no. 6, pp. 1514–1527, Jun. 2011.
- [44] A. Sadeh, P. J. Hauri, D. F. Kripke, and P. Lavie, ‘The Role of Actigraphy in the Evaluation of Sleep Disorders’, *Sleep*, vol. 18, no. 4, pp. 288–302, Jun. 1995.
- [45] M. Martoni, V. Bayon, M. Elbaz, and D. Léger, ‘Using actigraphy versus polysomnography in the clinical assessment of chronic insomnia (retrospective analysis of 27 patients)’, *Presse Médicale*, vol. 41, no. 3, pp. e95–e100, 2012.
- [46] D. M. O’Driscoll, A. M. Foster, M. J. Davey, G. M. Nixon, and R. S. C. Horne, ‘Can actigraphy measure sleep fragmentation in children?’, *Arch. Dis. Child.*, vol. 95, no. 12, pp. 1031–1033, Dec. 2010.
- [47] D. S. Michaud, S. Fidell, K. Pearsons, K. C. Campbell, and S. E. Keith, ‘Review of field studies of aircraft noise-induced sleep disturbance’, *J Acoust Soc Am*, vol. 121, no. 1, pp. 32–41, Jan. 2007.
- [48] European Commission, ‘EU Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise (END)’, *The European parliament and the Council of the European Union*, 2002. [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0049&from=en>. [Accessed: 06-Apr-2017].
- [49] J. Lekaviciute Gadala, S. Kephelopoulos, S. Stansfeld, and C. Clark, ‘Final Report of the ENNAH (European Network on Noise and Health) project’, Publications Office of the European Union, EUR - Scientific and Technical Research Reports, 2013.
- [50] E. Ohrstrom and R. Rylander, ‘Sleep disturbance effects of traffic noise - a laboratory study on after effects’, *J. Sound Vib.*, vol. 84, no. 1, pp. 87–103, 1982.
- [51] B. Griefahn, A. Marks, and S. Robens, ‘Noise emitted from road, rail and air traffic and their effects on sleep’, *J. Sound Vib.*, vol. 295, no. 1–2, pp. 129–140, 2006.

IV. Effets de l'exposition au bruit des avions sur la fréquence cardiaque pendant le sommeil des riverains des aéroports français

Ali-Mohamed Nassur, Marie Lefèvre, Maxime Elbaz, Fanny Mietlicki, Philippe Nguyen, Carlos Ribeiro, Matthieu Sineau, Bernard Laumon, Damien Léger, Anne-Sophie Evrard (2019): Effects of aircraft noise exposure on heart rate during sleep in the population living near airports in France, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, DOI: 10.3390/ijerph16020269

Effects of Aircraft Noise Exposure on Heart Rate during Sleep in the Population Living Near Airports

Ali-Mohamed Nassur ¹, Damien Léger ², Marie Lefèvre ¹, Maxime Elbaz ², Fanny Mietlicki ³, Philippe Nguyen ³, Carlos Ribeiro ³, Matthieu Sineau ³, Bernard Laumon ⁴ and Anne-Sophie Evrard ¹

¹ Université Lyon, Université Claude Bernard Lyon1, IFSTTAR, UMRESTTE, UMR T_9405, F-69675 Bron, France; marie.lef@laposte.net (M.L.); anne-sophie.evrard@ifsttar.fr (A.S.E.)

² Université Paris Descartes, APHP, Hôtel-Dieu de Paris, Centre du Sommeil et de la Vigilance et EA 7330 VIFASOM, 75004 Paris, France; damien.leger@aphp.fr (D.L.); maxime.elbaz@aphp.fr (M.E.)

³ Bruitparif, the center for technical assessment of the noise environment in the Île-de-France region of France, around Paris, 93200 Saint-Denis, France; Fanny.Mietlicki@bruitparif.fr (F.M.); Philippe.NGuyen@bruitparif.fr (P.N.); Carlos.Ribeiro@bruitparif.fr (C.R.); Matthieu.Sineau@bruitparif.fr (M.S.)

⁴ IFSTTAR, Transport, Health and Safety Department, F-69675 Bron, France; bernard.laumon@ifsttar.fr (B.L.)

* Correspondence: ali.mohamed.nassur@gmail.com

Abstract

Background : Noise in the vicinity of airports is a public health problem. Many laboratory studies have shown that heart rate is altered during sleep after exposure to road or railway noise. Fewer studies have looked at the effects of exposure to aircraft noise on heart rate during sleep in populations living near airports.

Objective : The aim of this study was to investigate the relationship between the sound pressure level (SPL) of aircraft noise and heart rate during sleep in populations living near airports in France.

Methods : In total, 92 people living near the Paris-Charles de Gaulle and Toulouse-Blagnac airports participated in this study. Heart rate was recorded every 15 s during one night, using an Actiheart monitor, with simultaneous measurements of SPL of aircraft noise inside the participants' bedrooms. Energy and event-related indicators were then estimated. Mixed linear

regression models were applied, taking into account potential confounding factors, to investigate the relationship between energy indicators and heart rate during sleep measured every 15 s. Event-related analyses were also carried out in order to study the effects of an acoustic event associated with aircraft noise on heart rate during sleep.

Results : The more the SPL from all sources ($LA_{eq,15s}$) and the SPL exceeded for 90% of the measurement period ($LA_{90,15s}$) increased, the more heart rate also increased. No significant associations were observed between the maximum 1-s equivalent SPL associated with aircraft overflight ($LA_{max,1s}$) and differences between the heart rate recorded during or 15 or 30 s after an aircraft noise event and that recorded before the event. On the other hand, a positive and significant association was found between $LA_{max,1s}$ and the heart rate amplitude calculated during an aircraft noise event. Results were unchanged when analyses were limited to participants who had lived more than five years in their present dwelling.

Conclusion : Our study shows that exposure to the maximum SPL linked to aircraft overflight affect the heart rate during sleep of residents near airports. However, further studies on a larger number of participants over several nights are needed to confirm these results.

Keywords : aircraft noise; sleep; heart rate; cross-sectional study

1. INTRODUCTION

The environmental and health consequences of the increase in air traffic have led to questioning and mounting concern among residents near airports. Noise pollution around airports is the subject of constant conflict between airport authorities and local residents and is viewed as a major factor of environmental stress. According to the World Health Organisation (WHO), sleep disorder is the most serious consequence of environmental noise in Western Europe [1].

Several studies have shown a relationship between aircraft noise exposure and sleep disturbances [2]. The effects of aircraft noise on sleep can result in the modification of several physiological parameters of sleep, such as sleep onset latency, the number and duration of awakenings during sleep, the total length of sleep, modification in sleep structure (the number of changes in sleep stages and in rhythms characteristic of sleep stages), the number of body movements and of autonomic modifications during sleep such as to heart rate and blood pressure [2–5]. If noise-induced sleep disturbance is considerable and frequent, it can lead to significant fragmentation and deprivation of sleep which in turn may seriously affect one's physical and mental health [6]. Sleep disturbances can have immediate and long-term health consequences [7].

During sleep, sympathetic tone is reduced, leading to a reduction in heart rate which becomes very regular. However, the presence of an external stimulus, such as a noise event due to aircraft overflight, is likely to accelerate the heart rate. Then, heart rate measured during sleep can be an indicator that may be used to objectively assess sleep quality [8]. Many studies have shown an increase in heart rate in persons exposed to noise from road, railway and air transportation [8,9]. Exposure to noise disturbs sleep, notably by increasing the heart rate [9], but also blood pressure [10] and hormone levels linked to stress [11]. In turn, these increases can lead to endothelial dysfunction and high blood pressure [12]. Sleep disturbances linked to exposure to transportation noise can be a factor causing cardiovascular disease [9].

Almost all studies on the effects of transportation noise on heart rate have been carried out in laboratories and looked at noise from either road or railway traffic. No similar studies have been conducted at participants' homes, focusing on the effects of aircraft noise.

In France, a research program called DEBATS (Discussion on the Health Effects of Aircraft Noise) was set up to deepen the knowledge and understanding of the consequences of aircraft noise and to quantify its effects on the health of populations residing near French airports. One of the program's objectives is to assess, for the first time in France, the subjective

and objective sleep quality of those living near the country's airports. DEBATS has shown that exposure to aircraft noise near airports affects the subjective quality of sleep, with an increased risk of sleeping less than 6 h and an increased feeling of tiredness in the morning [13]. Aircraft noise exposure also affected the objective parameters of sleep quality, with an increase in the time taken to fall asleep and in the total wake time after sleep onset, and a reduction in sleep efficiency. On the other hand, there was an increase in total sleep time and time spent in bed; this could be a matter of behavioral adaption to sleep deprivation [14]. The present article more specifically addresses the issue of heart rate as an objective indicator of sleep quality, and its association with aircraft noise exposure as the question of whether a rise in heart rate is linked to an increase in the level or number of aircraft noise events has been raised.

2. METHODS

2.1. Study population

The DEBATS study population comprises residents of at least 18 years of age and living in the vicinity of one of three major French airports: Paris-Charles de Gaulle, Lyon Saint-Exupéry, and Toulouse-Blagnac. In total, 1244 individuals took part in the main DEBATS study. These participants responded to a questionnaire administered by an interviewer at their home. At the beginning of the interview, they were asked if they agreed to take part in a further study aimed at better understanding the effects of aircraft noise on their sleep. Individuals who had declared that they snore during sleep or share a bedroom with a snorer were excluded. For material reasons, participants living on the ground floor of a building and overlooking a public road were also excluded. In total, 112 volunteers signed and returned their informed consent by mail and took part in the supplementary study: 91 residents near Paris-Charles de Gaulle airport and 21 residents near Toulouse-Blagnac airport. This study was limited to those two airports because contrasts in exposure to aircraft noise are sufficiently significant in their vicinity, which is not the case for Lyon Saint-Exupéry.

The present study was approved by two national authorities in France, the French Advisory Committee for Data Processing in Health Research (Project identification code: 11.405) and the French National Commission for Data Protection and the Liberties (Project identification code: 911365).

2.2. Aircraft noise exposure assessment

Exposure to aircraft noise at home was measured continuously during eight days in order to increase the probability of measuring noise under differing meteorological conditions and activity patterns of the airport hubs. Two metrological class 1 sound level meters were installed at the home of each participant. The first was installed on the outside wall of the bedroom in line with the bedroom window and 20–25 cm in front of the façade, in order to detect acoustic events associated with aircraft noise, while the second was on the bedside table inside the bedroom in order to measure the overall interior sound pressure level (SPL). Technicians set up the equipment and collect it again at the end of measurement period. The two sound level meters were synchronized at the beginning of the measurements. However, after the measurements, the intercorrelation between both signals was calculated in order to check the temporal synchronization. If needed, the time lag was corrected. The recorded SPL correspond to $L_{Aeq,1s}$ and the associated third octave frequency band levels. The sound level meters used complies with class 1 of the standard CEI 61672 (maximum accuracy in acoustic measurement). The processing of data associated with aircraft noise outside the dwelling is in accordance with the procedures of ISO 20906, and NF S 31-190.

Bruitparif (the center for technical assessment of the noise environment in the Île-de-France region of France, around Paris) has developed an algorithm to deduce, from these measurements, the original SPL of aircraft noise inside the bedroom. This algorithm is composed of four steps. The first step consists in determining, from the outdoor signal measured on the outer wall of the building, the acoustic events associated with aircraft overflight, based on correspondence between the radar trajectories supplied by the French Civil Aviation Authority (DGAC) and the observed acoustic events. The second step, based on the measurement taken inside the room, determined the periods affected by aircraft noise, by correlation with the times of acoustic events identified as aircraft noise in the outdoor measurement. The third step consisted of estimation of an exterior/interior transfer function, identifying acoustic signals in the room caused exclusively by the exterior noise. The final stage consisted of statistical analysis of time-matched curves for exterior and interior SPL at the dwelling, filtering out acoustic events originating indoors (e.g., snoring, clocks, or domestic animals) which occurred during overflight. This filtering is based on comparing the estimate of the sound signal inside the bedroom caused exclusively by exterior noise (using the transfer function) to the sound signal measured in the bedroom. A significant difference between the two signals corresponds to the presence of an indoor noise. Filtering in this way was necessary

in order to produce reliable estimates of indicators linked to noise inside the bedroom generated by the overflight of aircraft. Energy indicators (relative to the sound energetic averages of noise for given periods) and event-related indicators (characteristics and number of events exceeding a given SPL) were derived from these measurements. They were estimated inside the participants' bedroom, for all noise sources, but also for aircraft noise alone, every 15 s during the participant's sleep period, which is to say between falling asleep and final awakening. Energy indicators included the A-weighted equivalent SPL from all sources ($L_{Aeq,15s}$) and specifically from aircraft noise ($L_{Aeq,aero,15s}$) during 15 s, and the SPL during 15 s exceeded for 90% of the measurement period ($L_{A90,15s}$). For each acoustic event associated with aircraft noise during sleep time, two acoustic indicators were calculated inside the room: the maximum SPL observed in one second associated with an aircraft overflight ($L_{Amax,1s}$), and the level of background noise 10 min before an aircraft overflight.

2.3. Heart rate

During one of the eight nights of acoustic measurements (generally the first night, due to the device autonomy and storage capacity), the participants wore a heart rate monitor, called Actiheart. Actiheart (CamNtech, Cambridge, UK) is a compact device that records heart rate and movement. It has a sensitivity of 0.250 mV. The signal of the electrocardiogram (ECG) is sampled at 128 Hz and, at the end of each period, the adjusted average of the last 16 R-R intervals is calculated, excluding values outside $\pm 25\%$ of the initial average. This signal is converted into beats per minute (bpm) and stored in the device memory at the end of each period. The possible measurement span for heart rate is from 31 to 250 bpm. Explanations about the device's functions and instructions on using it were given to participants by a Bruitparif technician during installation of the acoustic equipment. The participants were instructed to sleep under normal conditions, and to place two ECG electrodes on their upper chest before going to bed. Data were then uploaded by means of a USB reader and Actiheart software (CamNtech, Cambridge, UK) version 4.0.16, then exported to a file which enabled calculation of the heart rate. The Actiheart measurements were then used to determine the number of heart beats per minute (HR) of each participant every 15 s during their sleep. Measurements from six subjects were judged unusable because of a hardware problem. In the end, Bpm measurements < 35 and > 130 were excluded from analysis [9,15]: at rest, bpm below 35 or above 130 is considered abnormal [16].

The two sound level meters and the Actiheart monitor were synchronized at the beginning of the measurements to the nearest second. The recording dates of the SPL and heart rates did

not match for 14 subjects who were therefore excluded from analysis. In the end, measurements of 92 of the 112 subjects were used in the analyses for a total of 92 nights.

2.4. Statistical Analysis

2.4.1. Energy Indicators

In total, 141,595 observations were used to estimate the models: indeed, for each participant, a little more than 1500 $L_{Aeq,15s}$ have been linked to as many HR measured every 15 s.

Mixed univariate (Model 1) and multivariate (Model 2) linear regression models were used to study the association between the SPL of aircraft noise characterized by energy indicators ($L_{Aeq,15s}$, $L_{Aeq,aero,15s}$ and $L_{A90,15s}$) and heart rate during sleep measured every 15 s. The multivariate models (Model 2) were adjusted on risk factors known in the literature to have an influence on heart rate: gender, age, body mass index (BMI), physical exercise, smoking and alcohol consumption [17,18]. As the presence of cardiovascular or hypertensive problems could modify the association between aircraft noise exposure and heart rate during sleep, they were also included in the models (Model 2). These factors were either collected through the questionnaire used in the interview with participants, or through objective assessments made by the interviewers. The time elapsed since the onset of sleep, determined through measurements with a wrist actigraph, was also introduced into the multivariate models [14,19].

2.4.2. Event-Related Indicators

To study changes to heart rate during sleep that are linked to an acoustic event associated with aircraft noise, the heart rate measured 15 s before an event was considered as baseline. This was compared to the mean heart rate during the event, and then 15 s and 30 s after the event. Three variables were thus constructed:

- HR1 = the difference between the heart rate during the event and the heart rate before the event in beats per minute,
- HR2 = the difference between the heart rate 15 s after the event and heart rate before the event in beats per minute,
- HR3 = the difference between the heart rate 30 s after the event and the heart rate before the event in beats per minute.

Finally, another variable, HRA-, was determined: heart rate amplitude during an acoustic event implicating aircraft noise. HRA was calculated as the difference between the maximum and minimum heart rate during an acoustic event, in beats per minute.

No aircraft-related event was detected overnight for six participants. Thus, the event-related analyses included 86 subjects and used 3081 observations corresponding to the total number of events related to aircraft noise to estimate the coefficients.

Mixed linear models including a random intercept were applied in order to assess the effects of aircraft noise events characterized by the $L_{Amax,1s}$ on heart rate during sleep defined by the variables HR1, HR2, HR3 and HRA. In addition to the previously cited risk factors known in the literature to influence heart rate, and the time elapsed since the onset of sleep, the multivariate models were also adjusted on the background SPL 10 min before the onset of the event. The interaction between the background SPL 10 min before the onset of the event and $L_{Amax,1s}$ was included initially in the multivariate regression model, but did not contribute significantly to the model and had no impact on estimating the noise effect, and was therefore not included in the final model.

Sensitivity analyses were carried out on the population sample who had resided longer than 5 years in their present dwelling.

Analyses were performed using SAS software version 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA).

2.5. Ethics Approval

Two national authorities in France, the French Advisory Committee for Data Processing in Health Research and the French National Commission for Data Protection and the Liberties approved the present study.

3. RESULTS

La [Table 23](#) describes the sociodemographic characteristics of the 92 participants for whom the acoustic and Actiheart measurements were available. Their sociodemographic characteristics were similar to those of participants in the main DEBATS study, although the proportions of females, young adults aged between 18 and 34, and singles were higher in our study (61%, 26% and 32% respectively) than in the main DEBATS study (56%, 18% and 20% respectively). The proportion of obese persons was conversely lower in our study (10% against 20% in the main study).

Table 23 - Description of the 92 participants in the Actiheart study and of the 1244 participants in the main DEBATS (Discussion on the Health Effects of Aircraft Noise) study

Characteristics of the participants	Actiheart Study <i>n</i> = 92		Main Study <i>n</i> = 1244	
	<i>n</i>	(%)	<i>n</i>	(%)
Gender				
Female	56	(61)	695	(56)
Male	36	(39)	549	(44)
Age (years)				
18–34	24	(26)	226	(18)
35–44	17	(18)	236	(19)
45–54	23	(25)	266	(21)
55–64	13	(14)	260	(21)
65–74	8	(9)	185	(15)
75+	7	(8)	71	(6)
Marital status				
Single	29	(32)	253	(20)
Married	46	(50)	782	(63)
Widowed	3	(3)	76	(6)
Divorced	14	(15)	133	(11)
Education				
<French high school certificate	33	(36)	452	(36)
French high school certificate	27	(29)	397	(32)
>French high school certificate	32	(35)	395	(32)
BMI				
Underweight or normal weight	51	(55)	562	(46)
Overweight	32	(35)	424	(34)
Obese	9	(10)	249	(20)
Smoking habits				
Non smoker	52	(57)	625	(50)
Ex-smoker	19	(21)	330	(27)
Occasional and Daily smoker	21	(23)	288	(23)
Alcohol consumption				
No	35	(38)	348	(28)
Light	46	(50)	638	(52)
Moderate and Heavy	11	(12)	247	(20)
Physical activity				
No	46	(50)	587	(47)
Low	26	(28)	366	(29)
Moderate	15	(16)	182	(15)
Intense	5	(5)	106	(9)
Cardiovascular disease				
No	83	(90)	1088	(87)
Yes	9	(10)	156	(13)
Hypertension				
No	64	(70)	804	(65)
Yes	28	(30)	426	(35)

The average level of 15-s equivalent SPL inside the bedroom was 26 dB(A) for all sources of noise taken together ($L_{Aeq,15s}$) and 27 dB(A) for aircraft noise alone ($L_{Aeq,aero,15s}$). The average 15-s equivalent SPL exceeded for 90% of the measurement period ($L_{A90,15s}$) inside the bedroom was 23 dB(A) (Figure 22).

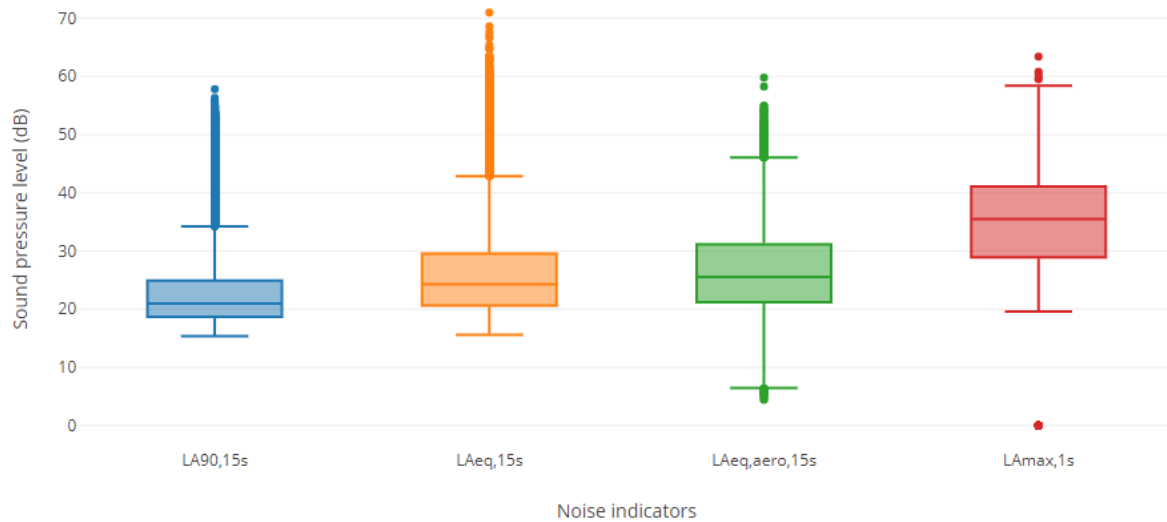


Figure 22 - Box plots of the sound level indicators measured indoors during the Actiheart measurement night.

Table 24 reports the average number of events linked to aircraft noise at night and their duration. On average, 30 acoustic events linked to aircraft noise were detected and recorded in the course of one night, with an average maximum SPL associated with overflight of an aircraft (mean $L_{Amax,1s}$) of 31 dB(A). The average duration of an acoustic event linked to aircraft noise was 1 min 41 s. Table 2 also presents the heart rate characteristics (HR) of each participant, and the heart rate variables used in the models (HR1, HR2, HR3 and HRA). For the 92 participants as a whole, the average heart rate during sleep was 65 bpm. The differences between the heart rate during or 15 or 30 s after the event and before the event (HR1, HR2 and HR3) were very minor. The average amplitude of the heart rate during an acoustic event associated with aircraft was 6.21.

Table 24 - Description of the outcomes and sound level indicators.

Outcomes and acoustic indicators	Mean	SD	P5	P95
Outcomes				
HR	65	8	51	80
HR1	0.32	1.59	-1.14	2.00
HR2	0.01	1.21	-2.03	1.71
HR3	-0.06	1.92	-2.15	2.00
HRA	6.21	2.96	2.17	12.06
Events indicators				
Number of aircraft events per night	30	23	2	72
Event duration (h:m:s)	00:01:41	00:00:33	00:00:46	00:02:37
L _{Amax,1s} (dB(A))	31	16	0	50
Energy indicators				
L _{Aeq,15s}	26	7	18	40
L _{Aeq,aero,15s}	27	7	16	40
L _{A90,15s}	23	6	17	33

HR1 = heart rate during event – heart rate before event; HR2 = heart rate 15 s after event – heart rate before event; HR3 = heart rate 30 s after event – heart rate before event; HRA = Amplitude during event.

3.1. Energy Indicators

Positive and significant associations were highlighted between the energy indicators (L_{Aeq,15s} and L_{A90,15s}) and the heart rate (HR) measured every 15 s during sleep (Table 25). An increase in the SPL inside the bedroom, from all sources of noise, or exclusively linked to aircraft noise, or exceeded for 90% of the measurement period, significantly increased heart rate during sleep. For example, a 10 dB(A) increase in L_{Aeq,15s} was associated with an increase of 0.71 bpm in HR. This increase was greater for the SPL from all sources (L_{Aeq,15s}) than for the SPL exceeded for 90% of the measurement period (L_{A90,15s}) or for the SPL due to aircraft (L_{Aeq,aero,15s}). The association between the SPL exclusively linked to aircraft noise (L_{Aeq,aero,15s}) and heart rate was not significant in the multivariate models.

Table 25 - Association between energy indicators estimated every 15 s and heart rate measured every 15 s during the sleep period (HR).

Energy indicators	Model 1	Model 2
	Estimate (95% CI)	Estimate (95% CI)
L _{Aeq,15s} (dB(A)) *	0.85 (0.79;0.90)	0.71 (0.65;0.76)
L _{Aeq,aero,15s} (dB(A)) *	0.17 (0.04;0.30)	0.005 (-0.13;0.14)
L _{A90,15s} (dB(A)) *	0.44 (0.36;0.52)	0.18 (0.10;0.25)

Model 1: univariate model including energy indicators separately; Model 2: multivariate model including energy indicators separately together with gender, age, body mass index (BMI), physical activity, tobacco consumption, alcohol consumption, cardiovascular disease, hypertension and elapsed time after sleep onset. * Per 10 dBA increase; Bold values are statistically significant $p < 0.05$.

3.2. Event-Related Indicators

Table 26 - Analysis of event-related heart rate response

$L_{Amax,1s}$	HR1	HR2	HR3	HRA
	Estimate (95% CI)	Estimate (95% CI)	Estimate (95% CI)	Estimate (95% CI)
Model 1	-0.01 (-0.11;0.09)	0.03 (-0.11;0.17)	0.02 (-0.11;0.16)	0.27 (0.06;0.47)
Model 2	-0.04 (-0.15;0.07)	-0.02 (-0.18;0.14)	-0.04 (-0.19;0.11)	0.34 (0.13;0.55)

Model 1: univariate model including $L_{Amax,1s}$; Model 2: multivariate model including $L_{Amax,1s}$ gender, age, body mass index (BMI), physical activity, tobacco consumption, alcohol consumption, cardiovascular disease, hypertension, elapsed time after sleep onset, and background 10 min before event; Per 10 dBA increase; HR1 = heart rate during event – heart rate before event; HR2 = heart rate 15 s after event – heart rate before event; HR3 = heart rate 30 s after event – heart rate before event
HRA = Amplitude during event; Bold values are statistically significant $p < 0.05$.

Table 26 presents the results from models assessing the effects of acoustic events linked to aircraft noise on the heart rate during sleep, characterized by the variables HR1, HR2, HR3 and HRA. Whatever the model, no significant association was found between aircraft noise exposure characterized by the event indicator $L_{Amax,1s}$ and the differences between the heart rates recorded during or 15 or 30 s (HR1, HR2 and HR3) after the aircraft noise event and the heart rate before the event. In contrast, the univariate and multivariate models highlighted a significant positive association between $L_{Amax,1s}$ and the heart rate amplitude during an aircraft noise event (HRA).

Limiting the analyses to participants who had occupied their present dwelling for at least 5 years did not affect the results.

4. DISCUSSION

The present study showed a significant increase in heart rate during sleep with increasing equivalent SPL inside the bedroom of all noise sources ($L_{Aeq,15s}$), and with increasing SPL exceeded for 90% of the measurement period inside the bedroom ($L_{A90,15s}$). This result confirms the findings obtained in the literature [8]. In the field, Wilkinson and Campbell also reported that an increase in road traffic noise (L_{Aeq}) showed a significant positive correlation with elevated heart rate [20]. Griefahn and Gros also found, in the field, a significant positive correlation between the equivalent level of railway noise calculated for each minute ($L_{Aeq,1min}$) and heart rate [21]. In the laboratory, Tassi et al. showed a dose-effect relationship between the level of railway noise and heart rate during sleep [22].

On the other hand, contrary to almost all studies that found an increase in heart rate after an acoustic event linked to transportation noise [9,23,24], this study did not show a significant increase in heart rate linked to the maximum SPL associated with aircraft overflight ($L_{Amax,1s}$). Griefahn et al. highlighted an increase in heart rate after a noise event related to road, railway or air transportation at maximum levels (L_{Amax}) from 45 to 77 dB(A) [9]. Öhrström et al. showed a significant 1.8 bpm increase in heart rate after a noise event linked to road traffic for individuals sensitive to noise and a 1.1 bpm increase for individuals non-sensitive to noise [23]. In another experiment, while the authors did not find an association between average heart rate over total sleep duration and exposure to road traffic noise, they did observe a significant increase in heart rate immediately following an acoustic event linked to road traffic [24].

Acoustic events associated with aircraft noise detected in our study were found to have low levels of $L_{Amax,1s}$ inside the bedroom (mean: 31 dB(A)). These low levels of $L_{Amax,1s}$ could explain the fact that no significant increase in heart rate after the passage of an aircraft (HR1, HR2, HR3) was observed in the present study. In most studies investigating the effects of transportation noise on heart rate during sleep, noise levels were higher, rarely lower than 45 dB(A) [9,23–26]. In the study by Griefahn et al., the average levels of L_{Amax} were 55 dB(A) for aircraft noise events [9], while in the one by Öhrström et al., the subjects were exposed to at least 50 dB(A) in terms of L_{Amax} [23].

As in the majority of studies, the present study showed that the amplitude of heart rate during an aircraft noise event increased significantly with the maximum level of aircraft noise ($L_{Amax,1s}$). Tassi et al. found a dose-response relationship between the maximum level associated with a railway noise event (L_{Amax}) and the amplitude of the cardiac response during the event [22]. In another study, the maximum level of night-time noise from trains (L_{Amax}) also led to a large significant increase in the amplitude of cardiac response during the event [27]. Di Nisi et al. showed that the amplitude of heart rate during the event was higher during air and railway noise events than during events linked to the noise of trucks and motorbikes [28].

In the present study, the results of sensitivity analyses limited to participants living more than five years at their current dwelling were similar to those obtained for the whole population. Therefore, there does not seem to exist an habituation of heart rate to aircraft noise events in our population, which confirms the results of the majority of studies [8,9,23]. Öhrström et al. found that the cardiac reaction to exposure to road traffic noise was as pronounced at the end as at the beginning of the noise exposure period [23]. Griefahn et al. observed that cardiac responses did not diminish in the course of the night [9].

The first strength of this study concerns the measurement by an Actiheart monitor of participants' heart rates while asleep at home as an objective indicator of sleep quality. The participants had to sleep in their usual conditions. Most studies of the effects of transportation noise in general, and aircraft noise in particular, on heart rate during sleep were carried out in a laboratory and used an electrocardiogram (ECG) to measure heart rate. Only the study by Haralabidis et al. was conducted in the field [27]. That study did not find a significant association between the maximum level of noise associated with overflight of an aircraft (L_{Amax}) and heart rate measured by means of a "Mobilograph" device [27]. Using an ECG allowed these studies to estimate heart rate beat-by-beat. This showed an immediate increase in the number of heart beats following the onset of the noise event. Griefahn et al. reported that this increase reached a maximum 13.2 s after the onset of the event and was immediately followed by a deceleration in the number of heart beats [9,29]; the heart rate became stable between 30 and 40 s after the onset of the event [9]. Our study was the first to use an Actiheart monitor to measure heart rate during sleep, and this device does not allow a beat-by-beat study. It is difficult and costly to use an ECG at a subject's home and with large-scale samples. The Actiheart monitor is a small light-weight device that can be easily worn on the chest and does not require the attendance of a medical professional. It is commonly used for monitoring heart rate during physical exercise. One study showed that heart rate measured by an Actiheart monitor was similar to that measured by ECG [29]. Our results are compatible with the hypothesis that cardiac response increases immediately after onset of a noise event but stabilizes before or less than 15 s after the end of the event.

The second strength of this study concerns acoustic measurements taken at participants' homes from which the energy- and event-related indicators were estimated inside the bedroom. In the field, the majority of studies did not have control over levels of noise exposure, unlike laboratory studies [30]. At the homes of some participants, several noise events linked to airplanes followed one another at intervals of less than a second during the night, a situation quite different from laboratory studies, where noise events are generally more spaced out. Furthermore, the acoustic measurements performed during this study allowed us to estimate not only the energy indicators but also event-related indicators. The energy indicators are recommended by the European Directive of 2002 [31] relating to the assessment and management of environmental noise. At the present time, however, event-related indicators are preferred for studies of the effects of noise on sleep, as they can better characterize aircraft noise [32]. The WHO also pointed out that event-related indicators seemed to be more predictive of sudden short-term effects, such as movement onset, awakening, cardiovascular

response and change in sleep stage [1]. Our study, like most of the literature, showed an increase in heart rate with exposure to aircraft noise, whether characterized by energy indicators or event-related indicators.

Nevertheless, a selection bias cannot be excluded from our study. Participants were recruited on a voluntary basis from the main DEBATS study, and therefore may have been more concerned about noise pollution and more annoyed by it. Indeed, 43% of participants in this Actiheart study reported sleep problems, compared to 32% in the main DEBATS study. In the present study, 32% of subjects stated they felt tired on waking up in the morning, against 30% in the main study and 24% of participants in the Actiheart study stated that they felt extremely or greatly bothered by aircraft noise, compared to 18% in the main DEBATS study. Thus, mild selection bias probably cannot be excluded in interpreting the results of the present study.

One of the limitations of our study concerns the fact that we lacked information on possible awakening when an aircraft noise event occurred during the sleep period. Heart rate responses to transportation noise can differ according to whether the subject has been awakened or not by the noise event [9]. If the subject is awakened, monophasic elevations lasting more than one minute are observed, with an average maximum elevation of 30 beats per minute. If the subject is not awakened, the heart rate responses are biphasic with accelerations (maximal elevation of 9 bpm) followed by decelerations below baseline [9]. In our study, the subjects also wore a wrist actigraph during the night [14]. The actigraph recorded the rest/activity rhythm which enabled assessment of the wake/sleep rhythm based on accelerations linked to movements; a total of 20 movements per minute is sufficient to designate a period as an “awake” state [30,33]. However, the present study could not take this information into account, because a relatively weighty supplementary processing of raw data would have been needed to obtain this information every 15 s; this will be undertaken shortly. Furthermore, heart rate does not remain the same throughout the various stages of sleep. Tassi et al. showed that noise from trains at night had significant effects on heart rate that were greater during stage 2 (light slow-wave sleep) and REM sleep (stage 4) than in deep slow-wave sleep (stage 3) [27]. However, the present study did not determine the internal sleep structure of the participants and was consequently unable to study the effects of aircraft noise on heart rate according to sleep stage. It would be very difficult and costly to carry out polysomnographic measurement at the homes of participants in order to determine the internal structure of their sleep.

One other limit of this study is that heart rate was assessed during one single night and it may be possible that this night was not representative of the ordinary nights of the participants.

However, it has been assumed that placing two electrodes on the subjects' thorax would not significantly the sleep of the subjects, as is usually the case when recording polysomnography in sleep laboratories, which is called the “first night effect”. The main strength of this study is that it was conducted at the participants' homes, whereas all studies on the subject were conducted in laboratories. Participants did not need to adhere to specific sleep times during the study period. They should behave as much as possible as usual in order to collect parameters that were representative of everyday life. Moreover, in the present study, we did not assess sleep but the impact of noise on heart rate during sleep. In addition, the autonomy and storage capacity of the Actiheart monitor did not allow us to record heart rate over several nights.

5. CONCLUSIONS

This study is one of the few in Europe to assess the association between the sound pressure level (SPL) of aircraft noise on heart rate during sleep at the dwellings of residents near airports. It showed that heart rate increased with increasing equivalent SPL of noise from all sources ($L_{Aeq,15s}$) and increasing SPL of noise exceeded for 90% of the measurement period ($L_{A90,15s}$). Our study found a significant positive association between the level of maximum noise associated with an aircraft overflight ($L_{Amax,1s}$) and the amplitude of the heart rate during this aircraft noise event. However, further studies carried out on a larger number of subjects and over several nights would be needed to confirm all of these results.

6. Author Contributions

Data curation, M.L.; Formal analysis, A.-M.N.; Funding acquisition, B.L. and A.-S.E.; Investigation, P.N., M.S., C.R., M.E., M.L. and A.-S.E.; Methodology, F.M., D.L., B.L. and A.-S.E.; Project administration, B.L. and A.-S.E.; Supervision, D.L., F.M., B.L. and A.-S.E.; Validation, M.L., M.S. and C.R.; Writing—original draft, A.-M.N. and A.-S.E.

7. Acknowledgments

The Airport Pollution Control Authority (Acnusa) requested the French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks (Ifsttar) to carry out this study. The authors would like to thank them for their confidence. The authors wish to express gratitude to all of the participants in the study. They also thank Paris Airports and the French Civil Aviation Authority for providing noise exposure maps. They are also grateful to Inès Khati for her help

in implementing the study, to Iain McGill for the translation of the manuscript from French into English, and to Lise Giorgis-Allemand for her skilful revision of the manuscript.

8. Funding

The present study was supported by funds from the French Ministry of Health, the French Ministry of Environment, and the French Civil Aviation Authority. We should like to thank them for their kind assistance.

9. Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

10. REFERENCES

1. WHO Night Noise Guidelines for Europe; World Health Organization Europe: Copenhagen, Denmark, 2009; ISBN 978-92-890-4173-7.
2. Perron, S.; Tetreault, L.F.; King, N.; Plante, C.; Smargiassi, A. Review of the effect of aircraft noise on sleep disturbance in adults. *Noise Health* **2012**, *14*, 58–67.
3. Basner, M.; Glatz, C.; Griefahn, B.; Penzel, T.; Samel, A. Aircraft noise: Effects on macro- and microstructure of sleep. *Sleep Med.* **2008**, *9*, 382–387.
4. Basner, M.; Samel, A. Effects of Nocturnal Aircraft Noise on Sleep Structure. *Somnologie* **2005**, *9*, 84–95.
5. Passchier-Vermeer, W.; Vos, H.; Steenbekkers, J.; van der Ploeg, F.; Groothuis-Oudshoorn, K. *Sleep Disturbance and Aircraft Noise Exposure: Exposure-Effect Relationships*; Division Public Health of TNO report: Leiden, The Netherlands, 2002.
6. Basner, M.; Müller, U.; Griefahn, B. Practical guidance for risk assessment of traffic noise effects on sleep. *Appl. Acoust.* **2010**, *71*, 518–522.
7. WHO Burden of Disease from Environmental Noise: Quantification of Healthy Life Years Lost in Europe; World Health Organization, Regional Office for Europe: Copenhagen, Denmark, 2011; ISBN 978-92-890-0229-5.
8. Muzet, A. Environmental noise, sleep and health. *Sleep Med. Rev.* **2007**, *11*, 135–142.
9. Griefahn, B.; Brode, P.; Marks, A.; Basner, M. Autonomic arousals related to traffic noise during sleep. *Sleep* **2008**, *31*, 569.
10. Schmidt, F.; Kolle, K.; Kreuder, K.; Schnorbus, B.; Wild, P.; Hechtner, M.; Binder, H.; Gori, T.; Munzel, T. Nighttime aircraft noise impairs endothelial function and increases blood pressure in patients with or at high risk for coronary artery disease. *Clin. Res. Cardiol.* **2015**, *104*, 23–30.
11. Schmidt, F.P.; Basner, M.; Kroger, G.; Weck, S.; Schnorbus, B.; Muttray, A.; Sariyar, M.; Binder, H.; Gori, T.; Warnholtz, A.; et al. Effect of nighttime aircraft noise exposure on endothelial function and stress hormone release in healthy adults. *Eur. Heart J.* **2013**, *34*, 3508–3514.
12. Munzel, T.; Gori, T.; Babisch, W.; Basner, M. Cardiovascular effects of environmental noise exposure. *Eur. Heart J.* **2014**, *35*, 829–836.
13. Nassur, A.-M.; Lefèvre, M.; Laumon, B.; Léger, D.; Evrard, A.-S. Aircraft Noise Exposure and Subjective Sleep Quality: The Results of the DEBATS Study in France. *Behav. Sleep Med.* **2017**, 1–12, doi:10.1080/15402002.2017.1409224.

14. Nassur, A.-M.; Léger, D.; Lefèvre, M.; Elbaz, M.; Mietlicki, F.; Nguyen, P.; Ribeiro, C.; Sineau, M.; Laumon, B.; Evrard, A.-S. The impact of aircraft noise exposure on objective parameters of sleep quality: Results of the DEBATS study in France. *Sleep Med.* **2019**, *54*, 70–77.
15. Croy, I.; Smith, M.G.; Waye, K.P. Effects of train noise and vibration on human heart rate during sleep: An experimental study. *BMJ Open* **2013**, *3*, e002655.
16. Guilleminault, C.; Poyares, D.; Rosa, A.; Huang, Y.-S. Heart rate variability, sympathetic and vagal balance and EEG arousals in upper airway resistance and mild obstructive sleep apnea syndromes. *Sleep Med.* **2005**, *6*, 451–457.
17. Cook, S.; Togni, M.; Schaub, M.C.; Wenaweser, P.; Hess, O.M. High heart rate: A cardiovascular risk factor? *Eur. Heart J.* **2006**, *27*, 2387–2393.
18. Fatisson, J.; Oswald, V.; Lalonde, F. Influence diagram of physiological and environmental factors affecting heart rate variability: An extended literature overview. *Heart Int.* **2016**, *11*, e32–e40.
19. Brink, M.; Omlin, S.; Muller, C.; Pieren, R.; Basner, M. An event-related analysis of awakening reactions due to nocturnal church bell noise. *Sci. Total Environ.* **2011**, *409*, 5210–5220.
20. Wilkinson, R.T.; Campbell, K.B. Effects of traffic noise on quality of sleep: Assessment by EEG, subjective report, or performance the next day. *J. Acoust. Soc. Am.* **1984**, *75*, 468–475.
21. Griefahn, B.; Gros, E. Noise and sleep at home, a field study on primary and after-effects. *J. Sound Vib.* **1986**, *105*, 373–383.
22. Tassi, P.; Saremi, M.; Schimchowitsch, S.; Eschenlauer, A.; Rohmer, O.; Muzet, A. Cardiovascular responses to railway noise during sleep in young and middle-aged adults. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2010**, *108*, 671–680.
23. Öhrström, E.; Bjorkman, M.; Rylander, R. Effects of noise during sleep with reference to noise sensitivity and habituation. *Environ. Int.* **1990**, *16*, 477–482.
24. Ohrstrom, E.; Bjorkman, M. Effects of noise-disturbed sleep—A laboratory study on habituation and subjective noise sensitivity. *J. Sound Vib.* **1988**, *122*, 277–290.
25. Haralabidis, A.S.; Dimakopoulou, K.; Vigna-Taglianti, F.; Giampaolo, M.; Borgini, A.; Dudley, M.L.; Pershagen, G.; Bluhm, G.; Houthuijs, D.; Babisch, W.; et al. Acute effects of night-time noise exposure on blood pressure in populations living near airports. *Eur. Heart J.* **2008**, *29*, 658–664.

26. Hofman, W.; Kumar, A.; Tulen, J. Cardiac reactivity to traffic noise during sleep in man. *J. Sound Vib.* **1995**, *179*, 577–589.
27. Tassi, P.; Rohmer, O.; Schimchowitsch, S.; Eschenlauer, A.; Bonnefond, A.; Margiocchi, F.; Poisson, F.; Muzet, A. Living alongside railway tracks: Long-term effects of nocturnal noise on sleep and cardiovascular reactivity as a function of age. *Environ. Int.* **2010**, *36*, 683–689.
28. Di Nisi, J.; Muzet, A.; Ehrhart, J.; Libert, J.P. Comparison of cardiovascular responses to noise during waking and sleeping in humans. *Sleep* **1990**, *13*, 108–120.
29. Muzet, A.; Ehrhart, J. Amplitude des modifications cardiovasculaires provoquées par le bruit au cours du sommeil. *Coeur Méd Interne* **1978**, *17*, 49–56.
30. Elbaz, M.; Yauy, K.; Metlaine, A.; Martoni, M.; Leger, D. Validation of a new actigraph motion watch versus polysomnography on 70 healthy and suspected sleepdisordered subjects. *J. Sleep Res.* **2012**, *21*, 218.
31. European Commission EU Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise (END). Available online: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0049&from=en> (accessed on 6 April 2017).
32. Lekaviciute Gadal, J.; Kephelopoulos, S.; Stansfeld, S.; Clark, C. *Final Report of the ENNAH (European Network on Noise and Health) Project*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, Luxembourg, 2013.
33. Someren, E.J.W.V. Improving actigraphic sleep estimates in insomnia and dementia: How many nights? *J. Sleep Res.* **2007**, *16*, 269–275.

PARTIE 4 : DISCUSSION GÉNÉRALE, CONCLUSION ET PERSPECTIVES

I. Discussion générale

Ce travail de thèse a pour objectif d'évaluer les effets de l'exposition au bruit des avions sur la qualité du sommeil des riverains des aéroports en France. Il s'inscrit dans le programme de recherche épidémiologique appelé DEBATS (Discussion sur les Effets du Bruit des Aéronefs Touchant la Santé) qui vise à mieux connaître et mieux quantifier les effets du bruit des avions sur la santé des populations riveraines des aéroports en France.

Les troubles du sommeil constituent la plus sérieuse conséquence du bruit environnemental en Europe occidentale avec 903 000 années de vie en bonne santé perdues [1]. Il est aujourd'hui bien établi par les différentes études menées en laboratoire et sur le terrain que l'exposition au bruit des transports, notamment celle au bruit des avions, perturbe le sommeil. Dans ce travail de thèse, les paramètres subjectifs et objectifs de la qualité du sommeil ont été évalués et leur association avec l'exposition au bruit des avions caractérisée par différents indicateurs acoustiques a été étudiée.

Le présent travail a montré que l'exposition au bruit des avions la nuit affecte non seulement la qualité subjective du sommeil, mais aussi la qualité objective de celui-ci. Nous avons montré une association entre l'exposition au bruit des avions et la dégradation de la qualité subjective du sommeil caractérisée par une augmentation du sentiment de fatigue le matin et une diminution de la durée de sommeil lorsque l'exposition au bruit des avions augmente. En revanche, aucune relation, statistiquement significative, n'a été observée pour le temps d'endormissement et les éveils nocturnes, la satisfaction de la qualité du sommeil et la prise de médicaments pour dormir, ces quatre paramètres ayant été rapportés par les participants eux-mêmes. Nous avons également montré que l'exposition au bruit des avions affecte les paramètres objectifs de la qualité du sommeil mesurés grâce à un actimètre, avec une augmentation du temps d'endormissement et de la durée des éveils intra-sommeil, une diminution de l'efficacité du sommeil mais aussi une augmentation du temps total de sommeil et du temps passé au lit. Nous avons enfin trouvé une augmentation de l'amplitude de la fréquence cardiaque pendant un événement sonore associé au passage d'un avion et le niveau maximum de bruit de cet événement (LA_{max}).

Les effets de l'exposition au bruit des avions sur la qualité subjective du sommeil sont bien documentés dans la littérature. De nombreuses études ont montré que l'exposition au bruit des avions affecte la qualité subjective du sommeil avec une augmentation des troubles de sommeil

auto-déclarés (réveils nocturnes [2],[3],[4] et sentiment de fatigue le matin [5], [6] notamment) et de la prise de médicaments pour dormir [2], [2], [16], [9]. En revanche, les résultats des études concernant le temps d'endormissement, la durée de sommeil et la satisfaction de la qualité du sommeil sont contrastés. Certaines études ont montré que l'exposition au bruit des avions diminuait significativement la durée de sommeil [10], détériorait la qualité du sommeil [10],[11], et augmentait significativement le temps d'endormissement [2], [12], alors que d'autres n'ont pas trouvé d'association significative pour le temps d'endormissement [10], la durée de sommeil [5], [13] et la satisfaction de la qualité du sommeil [2]. Ainsi, notre étude ne confirme qu'en partie les résultats observés dans la littérature.

Comme la majorité des études, le présent travail a montré que l'exposition au bruit des avions entraînait une augmentation du temps d'endormissement (SOL) et de la durée des éveils intra-sommeil (WASO) évalués objectivement [2], [13], [14], [15], [16], [17]. En revanche, contrairement à la plupart des études qui ont trouvé que l'exposition au bruit des transports entraînait une diminution du temps total de sommeil déterminé objectivement [18], [19], la présente étude a montré une augmentation de la durée totale de sommeil (TST) et du temps passé au lit (TB) mesurés avec un actimètre. Il pourrait s'agir d'un comportement d'adaptation à la privation de sommeil : la durée des éveils intra-sommeil (WASO) augmentant suite à l'exposition au bruit des avions, l'efficacité du sommeil (SE) n'est pas satisfaisante. Les individus resteraient ainsi plus longtemps au lit afin de dormir davantage et de récupérer. Cette hypothèse a également été avancée par d'autres auteurs qui trouvent une augmentation du temps total de sommeil après exposition au bruit des avions [15] et au bruit routier [20].

Comme la majorité des études, la présent travail a montré que l'amplitude de la fréquence cardiaque pendant un événement de bruit d'avions augmentait significativement avec le niveau maximal du bruit de cet événement (LA_{max,1s}) [21], [22], [23].

Les réponses aux questions permettant d'évaluer les paramètres subjectifs de la qualité du sommeil dépendent de la mention explicite ou non du bruit dans la question [24]. Une récente revue de la littérature a ainsi trouvé que les associations entre l'exposition au bruit des transports et les paramètres subjectifs de la qualité du sommeil sont significatives quand le bruit est mentionné dans les questions. Quand le bruit n'est pas mentionné, ces associations ne sont pas significatives [24]. Dans la présente étude, le bruit n'a pas été introduit dans les questions évaluant la qualité subjective du sommeil. Ainsi, les résultats sont cohérents avec ceux que l'on trouve de façon générale dans la littérature.

Les résultats obtenus à l'issue de ce travail de thèse confortent ceux trouvés dans la littérature [18], [25]–[27] et soutiennent l'hypothèse selon laquelle il existerait une habitude suite à l'exposition au bruit pour les paramètres subjectifs de la qualité sommeil, mais pas pour les paramètres objectifs de celle-ci. En effet, lorsque les analyses sont restreintes aux participants qui habitent dans leur logement actuel depuis au moins 5 ans, l'association entre l'exposition au bruit des avions et une durée de sommeil plus courte reste significative. En revanche, elle devient non significative pour le sentiment de fatigue le matin. Toutes les relations significatives observées entre l'exposition au bruit des avions et les paramètres objectifs de la qualité du sommeil (temps d'endormissement, durée des éveils intra-sommeil, durée totale de sommeil et du temps passé au lit, et amplitude de la fréquence cardiaque) restent elles significatives. Cette hypothèse pourrait également expliquer le fait que nous n'ayons pas trouvé d'association entre l'exposition au bruit des avions et les autres paramètres subjectifs de la qualité du sommeil rapportés par les participants eux-mêmes, comme le temps d'endormissement, les éveils nocturnes, la satisfaction de la qualité du sommeil et la prise de médicament pour dormir. Il est en effet peu vraisemblable que ce dernier résultat soit expliqué par un manque de puissance statistique car le nombre de participants dans DEBATS est relativement important comparativement à celui de certaines études [2], [10], [28] qui ont montré des associations significatives pour certains paramètres subjectifs de la qualité du sommeil.

Un biais de sélection ne peut pas être exclu dans les deux études sur lesquelles repose ce travail de thèse. Les participants à l'étude longitudinale ont un profil légèrement différent de celui des individus qui ont refusé de participer mais ont répondu à un court questionnaire de refus, notamment en termes d'âge et de catégorie socio-professionnelle. Mais ces non-participants ne sont eux-mêmes probablement pas représentatifs de l'ensemble des personnes qui ont refusé de participer. Par ailleurs, la question de la représentativité d'un échantillon de personnes sélectionnées à partir d'un annuaire téléphonique se pose mais ne peut pas être quantifiée dans cette étude. Il en est de même concernant celle de la population d'étude comparativement à l'ensemble des individus vivant à proximité d'un aéroport en France. Par ailleurs, les participants à l'étude sommeil ont été recrutés parmi les participants à l'étude longitudinale sur la base du volontariat. Il se pourrait donc qu'il s'agisse des personnes se sentant les plus concernées par les nuisances sonores et qui sont les plus gênées. Un biais de sélection ne peut donc vraisemblablement pas être exclu dans l'interprétation des résultats de cette étude sommeil.

Une autre forme de biais de sélection pourrait concerner l'estimation des prévalences. En effet, celles-ci pourraient être sous-estimées dans les zones les plus exposées au bruit des avions du fait que des personnes sujettes à des troubles du sommeil soient réticentes à habiter dans des zones bruyantes. Peu d'information est disponible dans DEBATS pour en juger. Cependant, si c'est le cas, ceci conduirait à sous-estimer l'association entre l'exposition au bruit des avions et la qualité du sommeil.

Dans l'étude longitudinale de DEBATS, l'exposition au bruit des avions a été estimée la nuit (L_{night}), la journée entière (L_{Aeq24h} et L_{den}) et la journée de 6h à 22h ($L_{Aeq,6h-22h}$), au domicile de chaque participant. Aucune information n'est disponible concernant le niveau d'exposition au bruit lorsque le sujet est à l'extérieur de son domicile, sur son lieu de travail en particulier. Or, l'exposition au bruit au cours de la journée peut perturber le sommeil [29] et réduire la durée de celui-ci [30]. Une mauvaise classification de l'exposition au bruit des avions pourrait donc survenir, en particulier pour l'exposition de jour, car les participants sont plus susceptibles d'être à l'extérieur de leur domicile pendant la journée que pendant la nuit. Mais si cette mauvaise classification existe, elle conduirait à sous-estimer l'association entre l'exposition au bruit des avions et la qualité du sommeil. Dans l'étude sommeil, les niveaux d'exposition au bruit des participants au cours de la journée ont été mesurés grâce à un dosimètre porté par les sujets pendant un jour au cours de la période d'instrumentation. La prise en compte de ce niveau d'exposition au bruit la journée n'a pas modifié les associations observées entre les indicateurs acoustiques associés au bruit des avions et la qualité objective du sommeil.

L'étude de la relation entre les perturbations du sommeil et l'exposition au bruit des avions est complexe. En effet, plusieurs facteurs exogènes et endogènes peuvent influencer la qualité du sommeil [31]. Nous avons ainsi inclus dans les modèles statistiques utilisés des facteurs de risque connus dans la littérature pour avoir une influence sur le sommeil. La prise en compte de ces facteurs n'a pas modifié les associations entre l'exposition au bruit des avions et les paramètres subjectifs ou objectifs du sommeil, à l'exception de la gêne due au bruit des avions. Lorsque la gêne est introduite dans les modèles, l'association entre l'exposition au bruit des avions et le sentiment de fatigue au réveil le matin devient non significative. Il se pourrait ainsi que la gêne due au bruit des avions joue un rôle de médiation entre l'exposition au bruit et la qualité subjective du sommeil, ce qui ne serait pas le cas pour la qualité objective du sommeil [32].

Un des points forts du présent travail est l'évaluation des paramètres objectifs de la qualité du sommeil grâce à un actimètre et un Actiheart portés par les participants à leur domicile, dans leurs conditions habituelles de sommeil. En effet, les paramètres objectifs de la qualité du sommeil sont rarement mesurés au domicile des sujets, ils le sont plus couramment en laboratoire. La polysomnographie et l'électrocardiogramme (ECG) sont les méthodes de référence pour évaluer ces paramètres. Mais leur coût élevé et les difficultés pratiques liées à leur mise en œuvre sur le terrain font que peu d'études menées au domicile des participants ont eu recours à ces méthodes. Les enregistrements actimétriques et ceux réalisés grâce à l'Actiheart ont été rarement utilisés dans les études épidémiologiques, même s'ils sont plus faciles à mettre en place auprès d'un grand nombre d'individus et qu'ils permettent de préserver les habitudes de sommeil des participants à leur domicile. En outre, il a été montré que l'actimétrie et la polysomnographie ambulatoire produisent des résultats similaires concernant l'évaluation de l'insomnie chronique [33] et une étude a montré que la fréquence cardiaque mesurée par un Actiheart est relativement similaire à celle mesurée par un ECG [34].

Un autre point fort de ce travail concerne la réalisation de mesures acoustiques au domicile des participants à l'étude sommeil. Tout d'abord, cela a permis de valider les niveaux de bruit d'avions estimés au domicile des 1244 participants à l'étude longitudinale à partir des cartes de bruit. En effet, les niveaux moyens de bruit des avions la nuit estimés grâce aux cartes de bruit à l'adresse des 112 participants de l'étude sommeil sont relativement similaires à ceux calculés à partir des mesures acoustiques réalisées en façade extérieure de la chambre à coucher de ces participants. Ensuite, la réalisation de mesures acoustiques a permis d'estimer des niveaux de bruit d'avions, non seulement à l'extérieur, mais aussi à l'intérieur de la chambre à coucher de ces individus, prenant ainsi en compte le bâtiment en termes d'isolation et la pratique d'ouverture/fermeture des fenêtres. La plupart des études sur le terrain ainsi que les réglementations françaises et européennes se basent, elles, sur l'exposition au bruit en façade des bâtiments. Une revue de la littérature sur les effets de l'exposition au bruit des avions sur la qualité du sommeil a d'ailleurs montré que les niveaux de bruit des avions mesurés à l'intérieur sont plus étroitement associés aux troubles du sommeil que les niveaux mesurés à l'extérieur des bâtiments [35]. Dans la majorité des études où des mesures acoustiques ont été effectuées à l'intérieur et à l'extérieur de l'habitat, les niveaux sonores extérieurs n'ont pas permis de prédire les troubles du sommeil [35]. Enfin, la réalisation de mesures acoustiques dans la présente étude a permis de déterminer des indicateurs énergétiques et des indicateurs événementiels pour caractériser l'exposition au bruit des avions des participants à l'étude

sommeil. La plupart des études épidémiologiques ont utilisé des indicateurs énergétiques. Les indicateurs énergétiques sont préconisés par la Directive Européenne de 2002 [36] relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement alors qu'actuellement et selon les recommandations de l'OMS [8], les indicateurs événementiels sont plutôt recommandés, car ils pourraient mieux caractériser les bruits des avions [37]. Dans ce travail, nous avons pu montrer que les indicateurs événementiels sont associés significativement à la quasi-totalité des paramètres objectifs de la qualité du sommeil étudiés, ce qui n'est pas le cas des indicateurs énergétiques.

II. Conclusion et perspectives

Le trafic aérien, en constante augmentation au cours de ces dernières décennies n'est pas sans impact sur l'environnement et la population. En particulier, le bruit émis par les avions constitue une nuisance majeure et un problème majeur de santé publique du fait non seulement de la gêne due au bruit ressentie par les populations riveraines, mais des perturbations du sommeil. La perturbation du sommeil est présentée comme étant la plainte majeure des personnes exposées au bruit en complément de la gêne exprimée. À travers le programme de recherche épidémiologique DEBATS, ce travail de thèse a permis d'évaluer les effets du bruit des avions sur la qualité du sommeil des riverains des aéroports en France.

Au voisinage des aéroports français, l'exposition au bruit des avions affecte la qualité subjective du sommeil avec une diminution du temps de sommeil déclaré et une augmentation du sentiment de fatigue au réveil. L'association entre l'exposition au bruit des avions et le sentiment de fatigue le matin semble être médiée par la gêne. Le présent travail a montré que l'exposition au bruit des avions affecte également les paramètres objectifs de la qualité du sommeil avec une augmentation du temps d'endormissement et de la durée des éveils intra-sommeil, une diminution de l'efficacité du sommeil mais aussi une augmentation du temps total de sommeil et du temps passé au lit, ce dernier résultat pouvant être interprété comme un mécanisme d'adaptation à la privation de sommeil. L'exposition au bruit des avions, caractérisée par le niveau de bruit maximum associé au passage d'un avion, affecte l'amplitude de la fréquence cardiaque des riverains d'aéroport pendant leur sommeil. Si une forme d'habituation suite à l'exposition au bruit a été observée pour les paramètres subjectifs de la qualité du sommeil, il n'en est rien pour les paramètres objectifs de celle-ci.

Les indicateurs acoustiques mesurés à l'extérieur ont été trouvés associés aux troubles du sommeil tout comme les indicateurs acoustiques mesurés à l'intérieur de la chambre à coucher. Par ailleurs, les résultats de ce travail contribuent à soutenir l'hypothèse selon laquelle les indicateurs acoustiques événementiels pourraient mieux caractériser les effets du bruit des avions sur le sommeil que les indicateurs énergétiques plus largement utilisés.

Les perspectives de recherche à l'issue de ce travail sont nombreuses :

Paramètres subjectifs de la qualité du sommeil

- Confirmer les résultats obtenus pour la qualité subjective du sommeil des riverains des aéroports français en analysant de manière transversale les données recueillies deux et quatre ans après l'inclusion et en comparant les résultats des trois périodes d'enquête.
- Analyser les données recueillies à l'inclusion, puis deux et quatre ans après l'inclusion de manière longitudinale pour évaluer l'évolution des effets dans le temps.

Paramètres objectifs de la qualité du sommeil

- Réaliser des analyses événementielles des variables actimétriques comme cela a été fait pour la fréquence cardiaque, afin d'étudier l'effet d'un événement de bruit d'avions sur les éveils nocturnes, la motilité et les mouvements du corps. Cela permettra d'estimer les effets instantanés et à court terme de l'exposition au bruit des avions sur le sommeil.
- Stratifier les analyses des effets de l'exposition au bruit des avions sur la fréquence cardiaque selon que le sujet est réveillé ou non par l'événement acoustique associé au passage d'un avion. En effet, les réponses de la fréquence cardiaque au bruit des transports peuvent être différentes selon que le sujet est réveillé ou pas par l'événement de bruit.

III. Références

- [1] WHO, *Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe*. Copenhagen: World Health Organization, Regional Office for Europe, 2011.
- [2] W. Passchier-Vermeer, H. Vos, J. Steenbekkers, F. van der Ploeg, and K. Groothuis-Oudshoorn, 'Sleep disturbance and aircraft noise exposure : Exposure-effect relationships', Division Public Health, The Netherlands, TNO report 2002.027, Jun. 2002.
- [3] B. Jakovljevic, G. Belojevic, K. Paunovic, and V. Stojanov, 'Road traffic noise and sleep disturbances in an urban population: cross-sectional study', *Croat Med J*, vol. 47, no. 1, pp. 125–33, Feb. 2006.
- [4] E. M. Elmenhorst *et al.*, 'Examining nocturnal railway noise and aircraft noise in the field: sleep, psychomotor performance, and annoyance', *Sci Total Env.*, vol. 424, pp. 48–56, May 2012.
- [5] B. Griefahn, A. Marks, and S. Robens, 'Noise emitted from road, rail and air traffic and their effects on sleep', *J. Sound Vib.*, vol. 295, no. 1–2, pp. 129–140, 2006.
- [6] K. Jones and D. P. Rhodes, 'Aircraft noise, sleep disturbance and health effects: a review', Stationery Office, 2013.
- [7] S. Perron, L. F. Tetreault, N. King, C. Plante, and A. Smargiassi, 'Review of the effect of aircraft noise on sleep disturbance in adults', *Noise Health*, vol. 14, no. 57, pp. 58–67, Mar. 2012.
- [8] WHO, *Night noise guidelines for Europe*. Copenhagen, Denmark: World Health Organization Europe, 2009.
- [9] E. A. Franssen, C. M. van Wiechen, N. J. Nagelkerke, and E. Lebrecht, 'Aircraft noise around a large international airport and its impact on general health and medication use', *Occup Env. Med*, vol. 61, no. 5, pp. 405–13, May 2004.
- [10] S. J. Kim *et al.*, 'Exposure-Response Relationship Between Aircraft Noise and Sleep Quality: A Community-based Cross-sectional Study', *Osong Public Health Res Perspect*, vol. 5, no. 2, pp. 108–14, Apr. 2014.
- [11] S. A. Janssen, M. R. Centen, H. Vos, and I. van Kamp, 'The effect of the number of aircraft noise events on sleep quality', *Appl. Acoust.*, vol. 84, pp. 9–16, 2014.
- [12] A. Marks and B. Griefahn, 'Associations between noise sensitivity and sleep, subjectively evaluated sleep quality, annoyance, and performance after exposure to nocturnal traffic noise', *Noise Health*, vol. 9, no. 34, pp. 1–7, Jan. 2007.

- [13] M. Basner, C. Glatz, B. Griefahn, T. Penzel, and A. Samel, 'Aircraft noise: effects on macro- and microstructure of sleep', *Sleep Med*, vol. 9, no. 4, pp. 382–7, May 2008.
- [14] M. Basner, A. Samel, and U. Isermann, 'Aircraft noise effects on sleep: application of the results of a large polysomnographic field study', *J Acoust Soc Am*, vol. 119, no. 5 Pt 1, pp. 2772–84, May 2006.
- [15] M. Basner and A. Samel, 'Effects of Nocturnal Aircraft Noise on Sleep Structure', *Somnologie*, vol. 9, pp. 84–95, 2005.
- [16] S. Fidell, K. Pearsons, B. G. Tabachnick, and R. Howe, 'Effects on sleep disturbance of changes in aircraft noise near three airports', *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 107, no. 5, pp. 2535–2547, May 2000.
- [17] S. Fidell, K. Pearsons, B. Tabachnick, R. Howe, L. Silvati, and D. S. Barber, 'Field study of noise-induced sleep disturbance', *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 98, no. 2, pp. 1025–1033, Aug. 1995.
- [18] A. Muzet, 'Environmental noise, sleep and health', *Sleep Med Rev*, vol. 11, no. 2, pp. 135–42, Apr. 2007.
- [19] S. Pirrera, E. De Valck, and R. Cluydts, 'Nocturnal road traffic noise: A review on its assessment and consequences on sleep and health', *Env. Int*, vol. 36, no. 5, pp. 492–8, Jul. 2010.
- [20] E. Öhrström and A. Skånberg, 'Longitudinal surveys on effects of road traffic noise: substudy on sleep assessed by wrist actigraphs and sleep logs', *J. Sound Vib.*, vol. 272, no. 3–5, pp. 1097–1109, 2004.
- [21] P. Tassi, M. Saremi, S. Schimchowitsch, A. Eschenlauer, O. Rohmer, and A. Muzet, 'Cardiovascular responses to railway noise during sleep in young and middle-aged adults', *Eur J Appl Physiol*, vol. 108, no. 4, pp. 671–80, Mar. 2010.
- [22] P. Tassi *et al.*, 'Living alongside railway tracks: Long-term effects of nocturnal noise on sleep and cardiovascular reactivity as a function of age', *Env. Int*, vol. 36, no. 7, pp. 683–9, Oct. 2010.
- [23] D. N. J, M. A, E. J, and L. Jp, 'Comparison of cardiovascular responses to noise during waking and sleeping in humans.', *Sleep*, vol. 13, no. 2, pp. 108–120, 1990.
- [24] M. Basner and S. McGuire, 'WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Effects on Sleep', *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 15, no. 3, p. 519, Mar. 2018.
- [25] P. Xin, T. Kawada, S. Yosiaki, and S. Suzuki, 'Habituation of Sleep to Road Traffic Noise Assessed by Polygraphy and Rating Scale', *J Occup Health*, vol. 42, pp. 20–26, 2000.

- [26] T. Kawada, P. Xin, M. Kuroiwa, Y. Sasazawa, S. Suzuki, and Y. Tamura, 'Habituation of Sleep to Road Traffic Noise as Determined by Polysomnography and an Accelerometer', *J. Sound Vib.*, vol. 242, no. 1, pp. 169–178, 2001.
- [27] M. Kuroiwa, P. Xin, S. Suzuki, Y. Sasazawa, T. Kawada, and Y. Tamura, 'Habituation of Sleep to Road Traffic Noise Observed Not by Polygraphy but by Perception', *J. Sound Vib.*, vol. 250, no. 1, pp. 101–106, 2002.
- [28] E. Lainey, S. Nerome, J. P. Enjalbert, S. Bouee, and C. Deschaseaux-Voinet, 'INSOMNIA Impact des Nuisances SONores (Maladies et INSomnie) à proximité des Aéroports', Hôpital Européen Georges Pompidou (CEMKA-EVAL), May 2004.
- [29] B. Fruhstorfer, H. Fruhstorfer, and P. Grass, 'Daytime noise and subsequent night sleep in man', *Eur. J. Appl. Physiol.*, vol. 53, no. 2, pp. 159–163, Oct. 1984.
- [30] R. Blois, G. Debilly, and J. Mouret, 'Daytime noise and its subsequent sleep effects', presented at the Proceedings, 3rd International Congress of Noise as a Public Health Problem, Washington, DC, 1980.
- [31] B. Griefahn and G. Jansen, 'EEG-responses caused by environmental noise during sleep their relationships to exogenic and endogenic influences', *Sci Total Env.*, vol. 10, no. 2, pp. 187–99, Sep. 1978.
- [32] P. Frei, E. Mohler, and M. Roosli, 'Effect of nocturnal road traffic noise exposure and annoyance on objective and subjective sleep quality', *fyhri*, vol. 217, no. 2–3, pp. 188–95, Mar. 2014.
- [33] M. Martoni, V. Bayon, M. Elbaz, and D. Léger, 'Using actigraphy versus polysomnography in the clinical assessment of chronic insomnia (retrospective analysis of 27 patients)', *Presse Médicale*, vol. 41, no. 3, pp. e95–e100, 2012.
- [34] T. Barreira†, M. Kang‡, J. Caputo‡, R. Farley‡, and M. Renfrow†, 'Validation of the Actiheart Monitor for the Measurement of Physical Activity', *Int. J. Exerc. Sci.*, vol. 2, no. 1, Jan. 2009.
- [35] D. S. Michaud, S. Fidell, K. Pearsons, K. C. Campbell, and S. E. Keith, 'Review of field studies of aircraft noise-induced sleep disturbance', *J Acoust Soc Am*, vol. 121, no. 1, pp. 32–41, Jan. 2007.
- [36] European Commission, 'EU Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise (END)', *The European parliament and the Council of the European Union*, 2002. [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0049&from=en>. [Accessed: 06-Apr-2017].

- [37] J. Lekaviciute Gadai, S. Kephalopoulos, S. Stansfeld, and C. Clark, 'Final Report of the ENNAH (European Network on Noise and Health) project', Publications Office of the European Union, EUR - Scientific and Technical Research Reports, 2013.

ANNEXES

Annexe 1 - Tableau récapitulatif des articles issus de la revue de la littérature

Année	Auteur	Titre	Revue	Labo ou in situ	Objectif	Nb sujets	Pays	Source de bruit	Mesures versus modélisation de l'exposition au bruit	Indicateurs acoustiques utilisés	Comment est mesurée la qualité du sommeil ?	Résultats marquants et conclusion
1979	M. Vernet,	Effect of train noise on sleep for people living in houses bordering the railway line	Journal of Sound and Vibration	In situ	Etudier les effets du bruit routier et ferroviaire sur le sommeil	10	France	Route et train	Mesure des niveaux de bruit	LAeq, Lamax, émergence, durée d'un événement	Polysomnographie	Avec le même LAeq, le bruit du trafic routier induit un plus grand nombre total d'interruptions du sommeil (changement des stades, éveils nocturnes) que le bruit ferroviaire, probablement en raison d'un nombre plus élevé d'événements de bruit routier. Pas de corrélation entre durée d'un événement et troubles du sommeil. Corrélation entre LAmix et troubles du sommeil
1981	B. Saletu and J. Grunberger,	Traffic noise-induced sleep disturbances and their correction by an anxiolytic sedative, OX-373	Neuropsychobiology	Laboratoire	Etudier les effets du bruit de la circulation nocturne et des médicaments (benzodiazepine, OX-373) prisent avant de se coucher sur la qualité objective et subjective du sommeil	10	Autriche	Route	Enregistrement du bruit routier	Niveau de pression acoustique	Polygraphique et questionnaire	Augmentation des éveils intermittents, du stade 1, du nombre d'éveils nocturnes et diminution du REM. Diminution du sommeil profond et augmentation du sommeil léger et de l'insomnie moyenne. Humeur détériorée au réveil le matin.
1982	E. Ohrstrom and R. Rylander,	SLEEP DISTURBANCE EFFECTS OF TRAFFIC NOISE A LABORATORY STUDY ON AFTER EFFECTS	Journal of Sound and Vibration	Laboratoire	Développer une méthodologie pour étudier les effets secondaires du sommeil perturbé par le bruit.	18	Suède	Route		LAeq et LAmix	Questionnaire et accéléromètre	Une bonne relation dose-réponse a été obtenue entre le bruit intermittent et la qualité subjective du sommeil : à savoir, plus le niveau de bruit est fort, plus la qualité du sommeil est mauvaise. Une relation dose-réponse similaire a été trouvée pour les mouvements du corps immédiatement après les pics de bruit pendant les nuits avec un bruit intermittent. Comparé au bruit intermittent, le bruit continu a eu un effet nettement plus faible sur la qualité du sommeil. Les résultats suggèrent que plus d'attention devrait être accordée à un pic des niveaux de bruit lorsque les normes pour le bruit nocturne sont fixées.
1983	G. J. Thiessen and A. C. Lapointe,	Effect of continuous traffic noise on percentage of deep sleep, waking, and sleep latency	The Journal of the Acoustical Society of America	Laboratoire	Etudier les effets du bruit continu du trafic routier sur le sommeil profond, l'éveil et l'endormissement	26	Canada	Route		LAeq	EEG	A 47 dBA, une augmentation de la fraction du sommeil profond de 2,5% et 4,6% pour 60 dBA. Augmentation du nombre d'éveils "effet laboratoire" pour l'endormissement et le réveil qui prennent du temps à disparaître
1984	R. T. Wilkinson and K. B. Campbell,	Effects of traffic noise on quality of sleep: assessment by EEG, subjective report, or performance the next day	J Acoust Soc Am	In situ	Evaluer les effets du bruit du trafic sur le sommeil objectif et subjectif	12	Royaume-Uni	Route		LAeq	EEG,EOG, ECG et questionnaire	La plupart des mesures physiologiques ne sont pas affectées par la réduction du bruit, mais le stade 4 du sommeil et le sommeil profond ont augmenté. La tendance d'augmentation du stade 4 pendant la période calme était plus élevée chez les femmes que chez les hommes. La durée du sommeil pendant la période calme augmentait plus chez les personnes âgées que chez les sujets jeunes. Pdt la période calme, les sujets ont répondu dormir mieux que la moyenne des deux semaines de bruit.
1986	B. Griefahn and E. Gros,	NOISE AND SLEEP AT HOME, A FIELD STUDY ON PRIMARY AND AFTER-EFFECTS	Journal of Sound and Vibration	In situ	Déterminer l'influence du trafic routier sur le sommeil, sur l'évaluation subjective et les performances psychomotrices	20	Allemagne	route	niveau de bruit mesuré	LAeq	EEG,EOG et questionnaire	En comparaison avec d'autres variables (âge, sexe, personnalité) le bruit influence légèrement le sommeil Des faibles effets négatifs ont été trouvés pour certains paramètres physiologiques, subjectifs, et pour les données de performance indiquant qu'il n'y a pas d'accoutumance complète à l'environnement acoustique ordinaire. Les résultats ont démontré que les paramètres physiologiques, l'évaluation subjective, et les performances sont tout d'abord influencés par des facteurs personnels (âge, sexe, temps de logement, etc.), par la personnalité, mais seulement légèrement par des facteurs exogènes tels que le bruit de la circulation.

Année	Auteur	Titre	Revue	Labo ou in situ	Objectif	Nb sujets	Pays	Source de bruit	Mesures versus modélisation de l'exposition au bruit	Indicateurs acoustiques utilisés	Comment est mesurée la qualité du sommeil ?	Résultats marquants et conclusion
1986	B. Griefahn,	A critical load for nocturnal high-density road traffic noise	Am J Ind Med	Laboratoire	Déterminer la relation entre le bruit de la circulation routière à haute densité et les troubles du sommeil, déterminer s'il y a des différences liées au sexe et définir une charge critique pour l'exposition au bruit nocturne	36	Allemagne	Route		L _{Aeq} et L _{amax}	EEG, EOG et questionnaire	Sentiment de mal dormir, apparition du sommeil de plus en plus retardée. Augmentation du temps total d'éveil, du nombre de réveils souvenu et le degré de fatigue. Stade REM modifié. Le nombre d'épisodes de sommeil paradoxal brusquement réduit dès que L _{Aeq} a dépassé 44 dBA à l'intérieur. Les perturbations du sommeil dues au bruit ne sont pas liées au sexe. Le niveau de pression acoustique équivalente mesuré pour le trafic routier à haute densité semble être un prédicteur utile pour les troubles du sommeil subjectif aussi longtemps que les niveaux maximums ne les dépassent pas de plus de 8-10 dBA. Un niveau de bruit équivalent de 40 dBA à l'intérieur a été définie comme un seuil critique, au-dessus duquel le bruit nocturne ne peut être tolérée plus longtemps.
1987	J. L. Eberhardt and K. R. Akselsson,	The disturbance by road traffic noise of the sleep of young male adults as recorded in the home	Journal of Sound and Vibration	In situ	Etablir si le bruit de la circulation ordinaire affecte le sommeil des personnes vivant dans un environnement bruyant et étudier les effets des mesures d'isolation phonique	7	Suède	Route	Mesure des niveaux de bruit	L _{Aeq} , nombre d'événements	Polysomnographie et questionnaire	Sujets non habitués au bruit même après un an d'exposition. La réduction du bruit a provoqué un début précoce et une durée prolongée du SWS. Difficulté à s'endormir, dormir mal, sentiment de fatigue, plus d'éveils après une nuit bruyante. Le L _{Aeq} n'a pas donné la description la plus adéquate de la dose de bruit. De meilleures caractérisations de l'exposition au bruit ont été trouvées avec le nombre de voitures par nuit, produisant des niveaux de pression acoustique maximum dépassant 50 ou 55 dB (A) dans la chambre à coucher.
1987	J. L. Eberhardt et al.	The influence of continuous and intermittent traffic noise on sleep	Journal of Sound and Vibration	Laboratoire	Comparer les effets du bruit intermittent et du bruit continu. Montrer si L _{Aeq} est un indicateur adapté pour les troubles du sommeil. L'utilité des bouchons d'oreilles. Et connaître le niveau de bruit maximum tolérable dans une chambre à coucher	9	Suède	Route		L _{Aeq} et L _{Amx}	Polysomnographie et questionnaire	Le bruit intermittent de L _{pmax} = 45 dBA a provoqué des transitions vers le sommeil léger, alors que 55 dB (A) était nécessaire pour induire des effets d'éveil. La probabilité de réactions d'éveil dépend de l'émergence de bruit plutôt que du niveau absolu de crête de bruit. Un bruit continu de 45 dBA a provoqué des déficits de sommeil paradoxal, alors qu'un bruit intermittent de L _{pmax} = 45 dBA a causé des déficits de stade III + IV. Après les nuits avec des déficits de sommeil paradoxal, la qualité subjective du sommeil a été notée plus basse et l'humeur a été influencée négativement. Leq seul n'est pas un descripteur adéquat de la dose de bruit relatif aux troubles du sommeil. La recommandation de l'OMS de Leq = 35 dBA est adéquate, mais devrait être complétée par un niveau de bruit maximum, exprimé par exemple en L _{pmax} ou L _i , qui ne devrait pas être dépassé. La nuit avec des bouchons d'oreille était pratiquement non perturbée.
1988	E. Ohrstrom and M. Bjorkman,	EFFECTS OF NOISE-DISTURBED SLEEP-A LABORATORY STUDY ON HABITUATION AND SUBJECTIVE NOISE SENSITIVITY	Journal of Sound and Vibration	Laboratoire	Etudier les effets de l'exposition au bruit pendant le sommeil sur les mouvements du corps et le rythme cardiaque ainsi que sur la qualité subjective du sommeil, de l'humeur et de la performance. Aussi, élucider l'importance de l'accoutumance et de la sensibilité subjective au bruit	24	Suède	Route		L _{Amx}	Accéléromètre (mvmt corps), Apex Sternum (rythme cardi.) et Questionnaire	Le temps de sommeil total est le même entre la maison et les nuits calmes en laboratoire (7,5H). Les personnes sensibles dormaient mal dans le labo, avec plus de temps d'endormissements (5 min) et plus d'éveils la nuit (0.7/nuit). Le nombre total de mouvements du corps et la fréquence cardiaque moyenne pendant la durée totale du sommeil se sont avérés être non affecté par l'exposition au bruit. Pendant l'observation des périodes immédiates après des événements de bruit et la même période au cours des nuits calmes il y a eu une augmentation des mouvements du corps et du rythme cardiaque. Pour le gpe sensible une augmentation de 1,8 bat/min et 1,1/min pour les non sensibles. Qualité de sommeil et mouvement du corps sont significatives seulement chez les sensibles avec plus de mouvement et une mauvaise QS après une nuit bruyante. En résumé, les effets physiologiques (mvmt du corps et la fréquence cardiaque) ne sont pas affectés pendant la nuit dans son ensemble.

Année	Auteur	Titre	Revue	Labo ou in situ	Objectif	Nb sujets	Pays	Source de bruit	Mesures versus modélisation de l'exposition au bruit	Indicateurs acoustiques utilisés	Comment est mesurée la qualité du sommeil ?	Résultats marquants et conclusion
												Aucune habitude n'est observée après 2 semaines d'expérimentation. A l'inverse, à la fin de l'expérience, on a observé une augmentation de la fatigue.
1990	Di Nisi et al.	Comparison of cardiovascular responses to noise during waking and sleeping in humans.	Sleep	Laboratoire	Comparer les réponses cardiaques au bruit durant le sommeil et l'éveil	80	France	Avion, Train, camion, moto et téléphone		LAeq et Lamax	Electroencéphalographie, électrocardiogramme, polygraphe	Différence des réponses cardiaques selon la sensibilité au bruit et non selon le bruit. Pas d'association significative entre le bruit et les paramètres du sommeil
1990	E. Öhrström and R. Rylander,	Sleep disturbance by road traffic noise—A laboratory study on number of noise events	Journal of sound and vibration	Laboratoire	Evaluer l'importance du nombre d'événements de bruit avec un niveau de bruit maximum élevé pour les effets des troubles du sommeil	28	Suède	Véhicule lourd		Nombre d'événements de bruit et Lamax	Questionnaire et accéléromètre	Important de considérer les indicateurs événementiels. Plus le nombre d'événements augmente, plus la qualité du sommeil se dégrade : difficulté d'endormissement, augmentation du temps d'endormissement et des éveils nocturnes ; le nombre de mouvements du corps par minute pendant un événement de bruit est significativement élevé par rapport à l'absence de bruit
1990	E. Öhrström et al.	Effects of noise during sleep with reference to noise sensitivity and habituation	Environment International	Laboratoire et in situ	Etudier les effets de l'exposition au bruit pendant le sommeil sur le rythme cardiaque, les mouvements corporels, la qualité du sommeil, l'humeur et les performances et élucider s'il y a une diminution des effets après une exposition prolongée. Etudier si les individus sont affectés différemment selon leur sensibilité au bruit. Evaluer les effets du bruit après exposition à différents niveaux d'événements avec des niveaux plus élevés. Evaluer les effets à long terme du trafic routier	Etude labo : 24 Etude in situ : 106	Suède	Route		nombre d'événements de bruit, LAeq et Lamax	Questionnaire, accéléromètre et des électrodes	Augmentation du nombre de mouvement de corps et des fréquences cardiaques (pas d'habitude pour ces paramètres). Augmentation de difficulté d'endormissement et du nombre de réveil, diminution de la qualité du sommeil et augmentation de la fatigue le matin et la journée. Seuil pour les effets sur la qualité du sommeil: pour 60 dBA = 10 événements et pour 50 dBA = 64 événements
1993	C. Maschke et al.	The influence of nocturnal aircraft noise on sleep and on catecholamine secretion	Schriftenr Ver Wasser Boden Lufthyg	Laboratoire	Etudier les effets du bruit nocturne sur les réactions électrobiologiques et sur la sécrétion des catécholamines	8	Allemagne	Avion		LAeq	EEG, EOG, EMG Analyse urine	Sécrétions d'adrénaline 2 fois plus importantes pdt les nuits bruyantes (données originales); Pour les données ajustées, une différences significatives est trouvée pour les 2 hormones entre les nuits bruyantes et calmes. La sécrétion de catécholamines varient avec le niveau de son du vol. Les valeurs individuels d'adrénalines peuvent être prédits de façon significative par une combinaison linéaire comprenant le temps passé dans les différentes phases du sommeil, les mouvements et les traits de personnalité.
1995	E. Öhrström,	Effects of low levels of road traffic noise during the night: a laboratory study on number of events, maximum noise levels and noise sensitivity	Journal of Sound and Vibration	Laboratoire	Expliquer l'importance du nombre d'événements sonores d'un niveau maximum de bruit relativement faible sur les effets des troubles du sommeil	12	Suède	Route		Lamax et nombre d'événements	Questionnaire et accéléromètre	Diminution significative de la qualité du sommeil à partir de 32 événements de bruit / nuit. A 64 événements : augmentation du temps d'endormissement de 12 minutes pendant les nuits bruyantes comparé aux nuits calmes. Le nombre de mouvements corporels était 3 fois plus élevé pdt les périodes bruyantes de la nuit par rapport aux périodes calmes, ce qui indique des effets sonores aigus. Indépendamment du nombre d'événements de bruit, une augmentation significative de la fatigue au cours de la journée a été constatée après des nuits d'exposition au bruit
												Les niveaux des intrusions sonores ont été bcp plus étroitement associés aux

Année	Auteur	Titre	Revue	Labo ou in situ	Objectif	Nb sujets	Pays	Source de bruit	Mesures versus modélisation de l'exposition au bruit	Indicateurs acoustiques utilisés	Comment est mesurée la qualité du sommeil ?	Résultats marquants et conclusion
1995	S. Fidell et al.	Field study of noise-induced sleep disturbance	J. Acoust. Soc. Am.	In situ	Etudier les effets d'intrusions sonores de niveau relativement élevé sur le sommeil dans des milieux résidentiels adaptés	82	Etats-Unis	Avion	Mesure des niveaux de bruit	LAEq et nombre d'événement	Questionnaire et bouton d'éveil	éveils que les niveaux d'exposition à long terme. Une augmentation de 10 dB(A) de niveau d'exposition sonore était associée à une augmentation de 1,6% du pourcentage de personnes éveillées. Les week-ends, les personnes n'étaient pas éveillées par le bruit des avions car une réduction des activités a été constatée
1999	T. Kawada and S. Suzuki,	Change in Rapid Eye Movement (REM) Sleep in Response to Exposure to All-Night Noise and Transient Noise	Archives of Environmental Health: An International Journal	Laboratoire et in situ	Démontrer la suppression du sommeil paradoxal en réponse à l'exposition au bruit toute la nuit, ainsi que la stabilité du sommeil, lorsque l'exposition à des stimuli sonores externes pendant le sommeil paradoxal	41	Japon	Route		LAEq et LAmx	Polysomnographie	L'exposition continue et toute la nuit au bruit a d'abord diminué le pourcentage du sommeil paradoxal à partir de 45dB(A). En revanche, le seuil de changement du sommeil paradoxal en réponse au bruit intermittent était plus élevé (60 dB(A) que les seuils observés pour le sommeil lent ou le sommeil de stade 2 (45 dB(A)). Conclusion : un environnement silencieux est requis pour maintenir la durée du sommeil paradoxal, même s'il est stable et n'est pas facilement influencable par le bruit.
2000	P. Xin et al.	Habituation of Sleep to Road Traffic Noise Assessed by Polygraphy and Rating Scale	J Occup Health	Laboratoire	Evaluer les effets du bruit de la circulation routière sur le sommeil ainsi que l'accoutumance du sommeil au bruit du trafic routier	7	Japon	Route		LAEq, LAmx et LAE	Polysomnographie et questionnaire	Somnolence, maintien du sommeil, inquiétude et sentiment de sommeil intégré, lesquels sont évalués subjectivement, ont empiré et le temps de réaction après avoir dormi a augmenté en raison de l'exposition au bruit. Une augmentation significative du stade 1 et une baisse du sommeil paradoxal ont été observés. L'accoutumance au bruit du trafic routier pendant le sommeil a été clairement observée dans les mesures subjectives. En revanche, les paramètres polygraphiques ont montré peu d'accoutumance au bruit avec des variations individuelles considérables
2000	S. Fidell et al.	Effects on sleep disturbance of changes in aircraft noise near three airports	J. Acoust. Soc. Am.	In situ	Etudier les changements potentiels des troubles du sommeil associés aux changements des niveaux de bruit des avions	Etude 1 : 28 Etude 2 : 25	Etats-Unis	Avion	Mesure des niveaux de bruit	nombre d'événement	Actimètre	La motilité et les éveils ont été peu affectés par les changements dans les opérations de vol des avions nocturnes. Le sommeil des résidents à proximité des aéroports n'est pas très sensible aux perturbations nocturnes causées par le bruit des avions. Les résultats indiquent que relativement peu d'intrusions nocturnes perturbent le sommeil et que les populations résidentielles près des aéroports semblent bien adaptées aux intrusions nocturnes.
2001	T. Kawada et al.	Habituation of Sleep to Road Traffic Noise as Determined by Polysomnography and an Accelerometer	Journal of Sound and Vibration	Laboratoire	Etudier l'accoutumance au sommeil dans un environnement bruyant	11	Japon	Route		LAEq et LAmx	Polysomnographie, actimètre et questionnaire	Une habitude au bruit est trouvée avec une évaluation subjective du sommeil, contrairement avec des mesures objectives, aucune habitude au bruit n'est trouvée. A partir de l'association entre le mouvement du corps enregistrée par l'accéléromètre du poignet et de l'activité du muscle, Actiwatch semble être un moyen simple et fiable pour évaluer les effets du bruit sur le sommeil. La fiabilité de l'évaluation de sommeil/éveil avec Actiwatch a été signalé comme étant satisfaisante. Dans cette étude, l'activité du poignet distingue correctement sommeil de l'état de veille à 88,4% du temps.
2002	M. Kuroiwa et al.	Habituation of Sleep to Road Traffic Noise Observed Not by Polygraphy but by Perception	Journal of Sound and Vibration	Laboratoire	Etudier l'habitude du sommeil au bruit du trafic routier	9	Japon	Route	Enregistrement du bruit routier nocturne	LAEq et LAmx	Polysomnographie et questionnaire	Les résultats de cette expérience ont montré que l'habitude du sommeil au bruit du trafic routier est clairement observée dans l'ensemble des paramètres du sommeil subjectif du questionnaire. Par contre, tous les paramètres de l'enregistrement polygraphique ont montré peu ou pas de preuves d'accoutumance. Ceci suggère que l'accoutumance au bruit a deux aspects : sensation (sommeil polygraphique) et perception (questionnaire).
					Comparer les effets de quatre types d'événements sonores (atterrissage d'avions civils,							Fréquence cardiaque sensible au niveau de bruit mais pas au type de bruit. La pression artérielle a augmenté principalement aux sons d'apparition soudaine. L'éveil induit par le bruit et les réponses alpha EEG étaient liées à

Année	Auteur	Titre	Revue	Labo ou in situ	Objectif	Nb sujets	Pays	Source de bruit	Mesures versus modélisation de l'exposition au bruit	Indicateurs acoustiques utilisés	Comment est mesurée la qualité du sommeil ?	Résultats marquants et conclusion
2002	N. Carter et al.	Cardiovascular and autonomic response to environmental noise during sleep in night shift workers	Sleep	Laboratoire	passages de camions, sonneries, et aéronefs militaires volant à basse altitude) sur le sommeil à partir de la tension artérielle, la fréquence cardiaque et le tonus nerveux sympathique et parasympathique chez les travailleurs de nuit	9	Australie	Avion, camions et sons		Lamax et Evenement de bruit	Polysomnographie, enregistrement pression artérielle et fréquence cardiaque	l'augmentation de la pression artérielle. L'augmentation de la fréquence cardiaque était maximale lorsque les sujets étaient réveillés par le bruit ou déjà éveillés. L'analyse spectrale de la variabilité de la pression artérielle indique une augmentation du tonus vasculaire sympathique due au bruit. Aucune accoutumance au bruit n'était apparente au cours de trois séances de sommeil consécutives.
2004	E. A. Franssen et al.	Aircraft noise around a large international airport and its impact on general health and medication use	Occup Environ Med	In situ	Evaluer la prévalence de l'état général de santé, l'utilisation de médicaments pour le sommeil (somnifère), et l'utilisation de médicaments pour les maladies cardiovasculaires. Aussi, étudier leur relation avec l'exposition au bruit des avions.	11 812	Pays-Bas	Avion	Estimation des niveaux de bruit	Lden, LAeqnight, LAeq22h23h	Questionnaire	L'exposition au bruit des avions au cours de la fin de soirée est associée à la prise de médicaments du sommeil non-prescrits ou sédatifs avec un OR de 1,72. Cela laisse penser que l'exposition au bruit des avions à des moments que les gens vont au lit stimule l'utilisation de médicaments de sommeil ou de sédatifs.
2004	E. Lainey et al.	INSOMNIA Impact des Nuisances SONORES (Maladies et INSomnie) à proximité des Aéroports		In situ	Comparer les problèmes de santé en rapport avec des troubles du sommeil et leurs répercussions : anxiété et dépression liés aux nuisances sonores	1 000	France	Avion			Questionnaire	Tous les scores du sommeil issus du MOS-sleep sont détériorés chez les sujets du groupe exposé comparé au groupe non exposé
2004	E. Öhrström and A. Skånberg,	Longitudinal surveys on effects of road traffic noise: substudy on sleep assessed by wrist actigraphs and sleep logs	Journal of Sound and Vibration	In situ	Evaluer les effets du bruit routier sur le sommeil avant et après changement d'expositions au bruit et analyser les différences de résultats entre actimètre et questionnaire	24	Suède	Route	Estimation des niveaux de bruit	LAeq24h	Actimètre et questionnaire	Diminution du temps passé au lit après réduction du trafic routier (58 min). Diminution du nombre de longue période d'éveils (éveil dépassant 5 min) de 12 à 4 périodes. Diminution du temps de sommeil en min (81min). Moins de de sentiment de fatigue le matin. Corrélation négative entre le temps de sommeil en min et la qualité du sommeil déclarée: plus le temps de sommeil est long, plus la qualité du sommeil est mauvaise. Les résultats montrent qu'il existe entre l'actimètre et le questionnaire plusieurs relations significatives entre les paramètres du sommeil mesurées avec les deux méthodes.
2004	E. Öhrström and A. Skånberg,	Sleep disturbances from road traffic and ventilation noise—laboratory and field experiments	Journal of Sound and Vibration	Laboratoire et in situ	Evaluer les effets des différents types d'exposition au bruit (de la circulation routière, de la ventilation et combinaison bruit routier et ventilation) sur le sommeil et comparer ces effets à la fois en laboratoire et sur le terrain	18	Suède	Route et ventilation		LAmay, LAeq23h07h	Actimètre et questionnaire	Pas de différence entre les effets du bruit routier sur le sommeil en laboratoire et in situ. Qualité de sommeil jugée mauvaise
2004	M. Basner et al.	Aircraft noise effects on sleep: final results of DLR laboratory and field studies of 2240 polysomnographically recorded subject nights	Inter Noise	Laboratoire et in situ	Etudier les effets du bruit des avions sur le sommeil en laboratoire et in situ afin de développer des critères scientifiquement valables pour le fonctionnement et la restriction du trafic aérien nocturne	Laboratoire : 128 In situ : 64	Allemagne	Avion	Mesure des niveaux de bruit	LAeq et Lamax	Polysomnographie et actimètre	Relation dose-reponse entre Lamax et la probabilité d'éveil avec une différence entre laboratoire et in situ. In situ, les réactions ont été bcp moins fréquentes. Labo : probabilité d'éveil 13,3% à 45 dBA et 71,5% à 80 dBA in situ : probabilité d'éveil 7,7% à 27,1 dBA et 18,4% à 73,2 dBA Temps de sommeil total marginalement influencé par le bruit des avions en labo.
2005	A. Marks and B. Griefahn,	Railway Noise – Its Effects on Sleep, Mood, Subjective Sleep Quality, and	Somnologie	Laboratoire	Tester l'hypothèse selon laquelle le bruit ferroviaire affecte le sommeil, la qualité subjective du	32	Allemagne	Train		LAeq	Polysomnographie et questionnaire	Plus d'éveils, mauvaise qualité du sommeil, plus de fatigue et de mauvaise humeur diminution de l'efficacité du sommeil et SWS, augmentation stade 1.

Année	Auteur	Titre	Revue	Labo ou in situ	Objectif	Nb sujets	Pays	Source de bruit	Mesures versus modélisation de l'exposition au bruit	Indicateurs acoustiques utilisés	Comment est mesurée la qualité du sommeil ?	Résultats marquants et conclusion
		Performance			sommeil et la performance							Niveau de bruit admissible LAeq entre 32 et 40 dBA
2005	M. Basner and A. Samel,	Effects of Nocturnal Aircraft Noise on Sleep Structure	Somnologie	Laboratoire	Etudier l'influence de l'exposition au bruit nocturne des avions sur la structure du sommeil	128	Allemagne	Avion		Nombre d'événements de bruit Niveau de pression acoustique maximum	Polysomnographie et actimètre	Augmentation du nombre d'éveils et du stade 1, et du temps total de sommeil. Diminution du sommeil à ondes lentes et du temps d'endormissement
2006	A. Skånberg and E. Öhrström,	Sleep disturbances from road traffic noise: A comparison between laboratory and field settings	Journal of Sound and Vibration	Laboratoire et in situ	Comparer les effets du bruit routier sur le sommeil entre laboratoire et in situ	14	Suède	Route	Nordic Prediction Method	Lamax, LAeq	Actimètre et questionnaire	Aucune différence significative dans la qualité du sommeil entre in situ et en laboratoire. Les expériences en laboratoire n'exagèrent pas sur les effets du bruit de la circulation routière sur le sommeil, à condition que le sommeil soit étudié avec les mêmes méthodes et qu'un environnement familial soit créé dans le laboratoire.
2006	B. Griefahn et al.	Noise emitted from road, rail and air traffic and their effects on sleep	Journal of sound and vibration	Laboratoire	Comparer les effets du bruit routier, ferroviaire et aérien sur le sommeil et tester l'application du niveau de bruit équivalent pour l'évaluation des perturbations du sommeil.	32	Allemagne	routier, ferroviaire et aérien		LAeqnight et LAmx	Polysomnographie et questionnaire	Diminution du TST, SWS, REM-sleep et l'efficacité du sommeil. Augmentation du WASO. Qualité du sommeil jugée mauvaise et déclaration de plus de fatigue Effets similaires entre le bruit aérien, routier et ferroviaire. Paramètres physiologiques du sommeil plus touchés par le bruit ferroviaire. LAeq bon prédicteur pour la qualité du sommeil subjective et non pour la qualité objective.
2006	B. Jakovljevic et al.	Road traffic noise and sleep disturbances in an urban population: cross-sectional study	Croat Med J.	In situ	Explorer la relation entre les troubles du sommeil causés par le bruit de la circulation et les traits de personnalité tel que introversion-extraversion, le névrosisme et la sensibilité sonore subjective.	310	Serbie	routier	Bruit mesuré sur 12 sites (3 fois la journée et 2 fois la nuit)	LAeq, L1 et L99	Questionnaire	Zone bruyante: plus de difficulté d'endormissement, plus de réveil la nuit et plus de difficulté de se rendormir, mauvaise qualité du sommeil et plus de plainte de fatigue au réveil Les troubles du sommeil ont été significativement et positivement associées à des traits de personnalité de la névrose, la sensibilité au bruit subjectif, et la gêne sonore. Correlation entre la gêne avec toutes les variables subjectives du sommeil excepté la durée du sommeil et la prise de médicament pour dormir
2006	E. Öhrström et al.	Effects of road traffic noise on sleep: Studies on children and adults	Journal of Environmental Psychology	In situ	Evaluer les relations exposition-effet entre le bruit de la circulation routière et la qualité du sommeil et de comparer le sommeil évaluée par les journaux du sommeil et de l'actimètre pour les enfants et les parents.	Etude principale : 160 Etude "profonde" : 80	Suède	Route	Nordic Prediction Method	LAeq24h, Lnight et Lden	Questionnaire et actimètre	Avec LAeq24h : enfants : baisse de la QS et augmentation de pb de somnolence la journée; parents : plus le niveau de bruit est élevé plus ils gardent rarement les fenêtres des chambres ouvertes, et Le nombre de réveils tend à augmenter avec le niveau de bruit. Avec Lnight : enfants : même résultat que LAeq24h; parents : augmentation de l'interférence du bruit sur le sommeil, ils gardent les fenêtres fermées la nuit, augmentation signifi des éveils et une baisse de la QS. Pour l'étude profonde : les résultats des enfants sur la QS et la vigilance le matin n'ont pas dévié signifi de leur sommeil comme indiqué dans le questionnaire général; pour les parents, une QS moyenne et une vigilance moyenne signifi plus faibles dans les journaux de sommeil que dans le questionnaire général. Conclusion : les enfants ont une meilleure perception de la qualité du sommeil et ont un nombre inférieur d'éveils que les parents, alors qu'il n'y a aucune preuve de différence en termes de difficultés d'endormissement et de vigilance le matin entre les enfants et les parents .
					Expliquer les méthodes et							

Année	Auteur	Titre	Revue	Labo ou in situ	Objectif	Nb sujets	Pays	Source de bruit	Mesures versus modélisation de l'exposition au bruit	Indicateurs acoustiques utilisés	Comment est mesurée la qualité du sommeil ?	Résultats marquants et conclusion
2006	M. Basner et al.	Aircraft noise effects on sleep: application of the results of a large polysomnographic field study	J Acoust Soc Am	In situ	Résultats de l'étude sur les effets du bruit des avions sur le sommeil du DLR et montrer que les mesures de protection contre le bruit utilisées à partir de cette étude pour approuver l'extension de l'aéroport de Leipzig ne sont pas appropriés pour une description adéquate des effets du bruit des avions nocturnes sur le sommeil	61	Allemagne	Avion	Mesure des niveaux de bruit	LAeq et LAmax	Polysomnographie	La probabilité d'éveil augmente avec LAmax, avec le niveau de bruit de fond. Le stade 2 constitue le stade de sommeil le plus vulnérable pour les réveils induits par le bruit. Les éveils induits par LAmax ≤ 65 dB sont de courte durée. En revanche ≥ 70 dBA sont de longue durée et se distinguent des éveils spontanés
2007	A. Marks and B. Griefahn,	Associations between noise sensitivity and sleep, subjectively evaluated sleep quality, annoyance, and performance after exposure to nocturnal traffic noise	noise and health	Laboratoire	Déterminer l'influence de la sensibilité au bruit sur le sommeil, la qualité subjective du sommeil, la gêne, et la performance après l'exposition nocturne au bruit du trafic	24		route, ferroviaire et aérien		LAeq	Polysomnographie et questionnaire	Augmentation du WASO, Stade 1 Diminution TST, efficacité du sommeil, REM, SWS. Le sommeil subjectif a été évalué pire par les personnes sensibles au bruit. La sensibilité au bruit semble être un prédicteur adapté pour évaluer subjectivement le sommeil, mais pas pour les modifications physiologiques du sommeil.
2007	H. M. Miedema and H. Vos,	Associations between self-reported sleep disturbance and environmental noise based on reanalyses of pooled data from 24 studies	Behavioral sleep medicine	In situ	Établir une fonction qui spécifie les troubles du sommeil autodéclarés en relation avec le bruit nocturne des transports en réanalysant des données regroupées issues de 24 études antérieures	23 000		Route, train et avion		LAeq,night	Questionnaire	Les fonctions montrent qu'au même niveau d'exposition au bruit la nuit, le bruit des avions est associé à plus de perturbations du sommeil autodéclarées que le trafic routier, et le bruit de la circulation routière est associé à plus de perturbations du sommeil que les chemins de fer.
2007	Y. Aydin and M. Kaltenbach,	Noise perception, heart rate and blood pressure in relation to aircraft noise in the vicinity of the Frankfurt airport	Clin Res Cardiol	In situ	Évaluer la perception subjective du bruit et ses effets sur la tension artérielle et les fréquences cardiaques autour de l'aéroport de Francfort	53	Allemagne	Avion	Carte de bruit	LAeq,night	Questionnaire, prise de la tension et de la fréquence cardiaque le matin et le soir	La pression artérielle moyenne était significativement plus élevée dans le groupe Ouest avec une exposition au bruit plus élevée. La pression artérielle systolique du matin était de 10 mmHg et la pression diastolique de 8 mmHg plus élevée dans le groupe ouest. Une population exposée à un niveau de bruit équivalent à Leq = 50 dBA pendant trois quarts de temps à une tension artérielle moyenne supérieure à celle d'une population exposée au même niveau de bruit d'énergie égale pour seulement un quart du temps
2008	A. Marks et al.	Event-related awakenings caused by nocturnal transportation noise	Noise Control Engineering Journal	Laboratoire	Étude sur les éveils causés par les bruits nocturnes des avions, des véhicules routiers et ferroviaires	24	Allemagne	route, ferroviaire et aérien		LAFmax, une pente de montée, la durée et Noise-free interval (the time between the emergence of the momentary noise event from the background and the fading of the previous noise event into the background)	Polysomnographie	La probabilité d'éveil augmente avec LAmax, la pente, la durée et noise-free interval. Le genre, l'âge et la sensibilité n'influencent pas la probabilité d'éveil. La réduction du LAmax, la pente et le volume du trafic réduit le nombre d'éveils causés par le bruit. Le bruit ferroviaire a causé un taux plus élevé d'éveils et des altérations plus prolongées de la structure du sommeil que les autres sources de bruit. Suivi par bruit aérien et en fin bruit routier.
2008	A. S. Haralabidis et al.,	Acute effects of night-time noise exposure on blood pressure in populations living near airports	Eur Heart J	In situ	Étudier les effets du bruit environnemental sur la pression artérielle et la fréquence cardiaque pendant le sommeil des personnes vivant à proximité de quatre grands aéroports européens	140	Europe	Bruit environnemental	niveau de bruit mesuré	LAmax, LAeq, L90	Mobilograph, Non-invasive 24h ABPM	Une augmentation de la pression artérielle dans les 15min après un événement aérien ; une augmentation non significative pour la fréquence cardiaque

Année	Auteur	Titre	Revue	Labo ou in situ	Objectif	Nb sujets	Pays	Source de bruit	Mesures versus modélisation de l'exposition au bruit	Indicateurs acoustiques utilisés	Comment est mesurée la qualité du sommeil ?	Résultats marquants et conclusion
2008	B. Griefahn et al.	Autonomic arousals related to traffic noise during sleep	sleep	Laboratoire	Etudier les effets du bruit du trafic sur la fréquence cardiaque pendant le sommeil	24	Allemagne	routier, ferroviaire et aérien		LAFmax, une pente de montée, la durée et Noise-free interval (the time between the emergence of the momentary noise event from the background and the fading of the previous noise event into the background)	Polysomnographie et électrocardiographie	Même à des intensités sonores relativement faibles, une augmentation significative de la fréquence cardiaque a été observée après exposition au bruit de différentes sources de transport (avion, train, route). Les paramètres acoustiques (mode de circulation, niveau maximal, vitesse de montée) influençaient nettement les modifications cardiaques. Les réponses cardiaques étaient aussi déterminées par la présence ou l'absence de réveil ainsi que par le stade de sommeil pendant lequel le bruit survient. Dans le sommeil paradoxal, l'élévation maximale des réactions cardiaques est plus grande alors qu'elle est plus basse dans le sommeil profond après exposition au bruit
2008	G. M. Aasvang et al.	Self-reported sleep disturbances due to railway noise: exposure-response relationships for nighttime equivalent and maximum noise levels	J Acoust Soc Am	In situ	Etudier les troubles du sommeil auto-déclarés causés par le bruit ferroviaire par rapport au LAeqnight et LAmaz.	1 349	Norvège	Train	Nordic Prediction Method	LAeqnight, LAmaz	Questionnaire	LAeqnight et LAmaz étaient significativement corrélées, et la proportion de problèmes de sommeil induites par le bruit rapportés a augmenté en même temps que l'augmentation du LAeqnight et du LAmaz. Plus de difficulté à s'endormir et plus d'éveils la nuit. La sensibilité au bruit, le type de fenêtre de la chambre, et la fréquence de passage du train sont les facteurs importants affectant les troubles du sommeil induites par le bruit, en plus du niveau d'exposition au bruit. Les résultats des analyses de régression ont confirmé l'importance de prendre en compte le nombre d'événements sonores nocturnes lors de l'utilisation LAmaz comme prédicteur.
2008	M. Basner et al.	Aircraft noise: effects on macro- and microstructure of sleep	Sleep medicine	Laboratoire	Effets du bruit des avions sur la macro et micro structure du sommeil	10	Allemagne	Avion		64 événements de bruit avec niveau de pression acoustique maximum de 45 et 65	Polysomnographie	Augmentation de la probabilité de perturbation du sommeil Augmentation des éveils, de stade 1, des changements à des stades plus légers
2008	M. Brink et al.	Influence of slope of rise and event order of aircraft noise events on high resolution actimetry parameters	Somnologie	In situ	Quantifier les effets du bruit des avions sur les réactions corporelles avant le réveil le matin	60	Suisse	Avion		Lamax, nombre d'événements	Actimètre	Les réactions de motilité aux premiers événements de bruit des avions le matin étaient plus fortes que les suivantes, suggérant que le nombre de survols précédemment expérimentés a un effet systématique, surtout si les événements se produisent à de courts intervalles. Les réactions de motilité ont également été jugées dépendantes de la pente de montée des événements, avec des hausses plus rapides - typiques des survols proches de l'atterrissage des avions - provoquant des réactions plus fortes
2008	M. Saremi et al.	Effects of nocturnal railway noise on sleep fragmentation in young and middle-aged subjects as a function of type of train and sound level	Int J Psychophysiol	Laboratoire	Comparer les effets du bruit des différents types de trains sur la fragmentation du sommeil chez les jeunes et ceux d'âge moyen	38	France	Train	Enregistrement du bruit ferroviaire	LAeq23h07h	Polysomnographie et questionnaire	Les éveils augmentent avec le niveau sonore. Il était le plus élevé dans S2 et le plus bas dans le sommeil paradoxal. Les micro-éveils (3-10 s) se sont produits à un taux de 25-30%, quel que soit le type de train. Les éveils (> 10 s) ont été produits plus souvent avec les trains de marchandises que par les trains d'automobiles et de passagers. Les changements normaux liés à l'âge dans le sommeil ont été observés, mais ils ne se sont pas aggravés par le bruit ferroviaire, remettant en question donc de savoir si les personnes âgées sont moins sensibles au bruit pendant le sommeil. Les éveils liés à l'événement agissent indépendamment de l'âge. Plus le niveau de bruit augmente, plus la qualité du sommeil est jugée mauvaise.
					Etudier les relations entre le bruit routier et ferroviaire avec la							L'exposition au bruit de la circulation à l'intérieure était négativement liée à la arythmie sinusale respiratoire moyenne pendant la période de sommeil, en

Année	Auteur	Titre	Revue	Labo ou in situ	Objectif	Nb sujets	Pays	Source de bruit	Mesures versus modélisation de l'exposition au bruit	Indicateurs acoustiques utilisés	Comment est mesurée la qualité du sommeil ?	Résultats marquants et conclusion
2009	J. M. Graham et al.	Habitual traffic noise at home reduces cardiac parasympathetic tone during sleep	Int J Psychophysiol	In situ	période de pré-éjection et l'arythmie sinusale respiratoire pendant le sommeil comme indices du tonus sympathique et parasympathique du système nerveux .	36	Pays-Bas	Route	Mesure des niveaux de bruit	LAeq pendant la période du sommeil	ICG et ECG	particulier pendant la seconde moitié de la période de sommeil. Aucune relation significative n'a été observée pour la période pré-éjection. Des niveaux d'exposition au bruit plus élevés peuvent entraîner un retrait du tonus parasympathique pendant le sommeil, en particulier pendant la seconde moitié de la période de sommeil. Aucun effet du bruit de la circulation sur le tonus sympathique cardiaque.
2009	L. Stosic et al.	Effects of traffic noise on sleep in an urban population	Arh Hig Rada Toksikol	In situ	Evaluer les effets du bruit urbain sur le sommeil et la relation entre la sensibilité auto-estimée au bruit et les perturbations du sommeil.	911	Serbie	Route	Mesure des niveaux de bruit sur 6 lieux de la ville	LAeq,night	Questionnaire	Le bruit de la circulation nocturne a considérablement détérioré la qualité subjective du sommeil: plus de difficulté à s'endormir, plus d'éveils, mauvaise qualité du sommeil, fatigue au réveil, et plus de consommation de médicament pour dormir. La sensibilité au bruit est un facteur de confusion important à prendre en considération.
2009	Y. de Kluizenaar et al.	Long-term road traffic noise exposure is associated with an increase in morning tiredness	J Acoust Soc Am	In situ	Etudier l'association entre l'exposition au bruit du trafic routier la nuit et les problèmes de sommeil auto-déclarés	18 000	Pays-Bas	Route		LAeq,night	Questionnaire	Association significative entre l'exposition au bruit et le risque de se lever fatigué le matin. Bien que la prévalence de la consommation de médicaments fût plus élevée à des niveaux de bruit plus élevés par rapport à la catégorie de référence (Ln < 35 dB), après ajustement des covariables, cette association n'a pas été significative.
2010	A. Fyhri and G. M. Aasvang,	Noise, sleep and poor health: Modeling the relationship between road traffic noise and cardiovascular problems	Science of the Total Environment	In situ	Etudier la relation entre bruit, troubles de sommeil et problème de santé	5 390	Norvège	routier	Carte de bruit	Lp,A,eq,night	Questionnaire	La gêne due au bruit nocturne est un bon prédicteur de troubles du sommeil
2010	P. Lercher et al.,	The effects of railway noise on sleep medication intake: results from the ALPNAP-study	Noise Health	In situ	Etudier la relation entre le bruit ferroviaire et la prise de médicaments du sommeil et l'impact des événements du bruit ferroviaire sur les paramètres de la motilité pendant la nuit.	16438 pour l'étude actimétrique	Autriche	Train	Estimation et mesure des niveaux de bruit	Lden et Lmax	Questionnaire et actimètre	Les modèles (sans ajustement, ajusté selon l'âge) montrent 2 fois plus de probabilités de prise de médicaments à tout niveau d'exposition au bruit ferroviaire. Le point critique de la déflexion dans tous les modèles commence entre 60 et 70 dB (A). Ici, l'augmentation du rapport de cotes atteint la signification statistique et augmente encore entre 65 et 75 dBA. Dans l'étude actimétrique, la pente de montée des événements de bruit de train s'est avéré être un prédicteur presque aussi important pour les réactions de la motilité comme cela a été pour le Lmax. Utiliser un bonus pour le bruit de chemin de fer va sous-estimer l'impact du bruit d'environ 10 dBA. Le bruit ferroviaire peut avoir un impact significatif sur la prise de médicaments du sommeil et sur la réaction de la motilité dans des conditions qui ressemblent à celles de la vallée de l'Inn en Autriche
2010	P. Tassi et al.,	Living alongside railway tracks: Long-term effects of nocturnal noise on sleep and cardiovascular reactivity as a function of age	Environ Int	Laboratoire	Comparer les effets du bruit ferroviaire sur la structure du sommeil et les réponses cardiaques chez les jeunes et ceux d'âge moyen des personnes vivant depuis plusieurs années au voisinage des chemins de fer ou dans des lieux silencieux	40	France	Train	Enregistrement du bruit	LAeq8h et Lmax	Polysomnographie	Les indices de fragmentation du sommeil étaient plus faibles chez les sujets en zone bruyante comparé en zone calme, quelque soit l'âge. Augmentation significative du nombre d'éveils après exposition au bruit ferroviaire. En réponse au bruit, il y avait un taux de réponse cardiovasculaire plus élevé au bruit chez les juniors et un taux plus faible chez les personnes âgées en zone bruyante par rapport à leurs homologues en zone calme. L'exposition permanente au bruit des chemins de fer nocturnes entraîne une diminution de la fragmentation du sommeil et une accoutumance cardiovasculaire
		Cardiovascular responses to railway			Etudier les effets du bruit							Le niveau de bruit ferroviaire produisait des effets dose-dépendante sur tous les indices cardiovasculaires (réponse de la fréquence cardiaque, amplitude de la réponse cardiaque, latence de la réponse cardiaque, réponse d'impulsion de doigt, amplitude d'impulsion de doigt, et latence d'impulsion de doigt), avec des réponses cardiaques plus élevées pour les trains de

Année	Auteur	Titre	Revue	Labo ou in situ	Objectif	Nb sujets	Pays	Source de bruit	Mesures versus modélisation de l'exposition au bruit	Indicateurs acoustiques utilisés	Comment est mesurée la qualité du sommeil ?	Résultats marquants et conclusion
2010	P. Tassi et al.,	noise during sleep in young and middle-aged adults	Eur J Appl Physiol	Laboratoire	ferroviaire sur les réactions cardiaques chez les jeunes et ceux d'âge moyen pendant le sommeil	38	France	Train	Enregistrement du bruit	LAeq8h	Polysomnographie	marchandises. Les réponses vasculaires étaient similaires quel que soit le type de train. Une différence de réaction a été observée entre les jeunes (26 ans de moyenne d'âge) et les adultes (52 ans de moyenne d'âge). Les jeunes présentaient une fréquence et une amplitude de la réponse cardiaque plus élevées que les personnes âgées. La latence d'impulsion de doigt était plus courte chez les personnes âgées et aucune différence n'était remarquée pour la vasoconstriction
2010	J. Hong et al.	The effects of long-term exposure to railway and road traffic noise on subjective sleep disturbance	J Acoust Soc Am	In situ	Déterminer les effets à long terme du bruit sur le sommeil et de comparer les relations exposition-réponse de différentes sources de bruit avec celles d'autres études	1 160	Korea	Route et Train	Mesure des niveaux de bruit sur certains lieux	LAeq22h07h	Questionnaire	Le bruit des chemins de fer affecte plus le sommeil subjectif que le bruit du trafic routier
2011	G. M. Aasvang et al.	A field study of effects of road traffic and railway noise on polysomnographic sleep parameters	J Acoust Soc Am	In situ	Explorer et comparer les effets du bruit de la circulation routière et des trains sur le sommeil des sujets habituellement exposés au bruit nocturne.	40	Norvège	Route et Train	Mesure des niveaux de bruit	LAeqnight, LAFmax, LAF5night	Polysomnographie	L'Amx ferroviaire a un impact négatif sur le sommeil paradoxal alors qu'il est négligeable avec L'Amx routier. L'exposition au bruit du trafic routier était faiblement associée aux paramètres du sommeil. Les associations les plus fortes qui ont été obtenues sont pour LAFmax,night dans le groupe exposé au bruit ferroviaire. Pour le bruit ferroviaire, LAFmax,night est en corrélation significative avec WASO ($r = 0,57$, $P < 0,01$) et le temps passé dans le sommeil paradoxal ($r = -0,71$, $P < 0,01$). Association significative entre LAeq,night ferroviaire et le temps passé dans le sommeil paradoxal. Le nombre d'événements de bruit de chemin de fer n'a pas été significativement associée à l'un des paramètres du sommeil. Le sommeil paradoxal était plus court dans le groupe exposé au bruit ferroviaire avec des niveaux maximaux de bruit supérieur à 50 dB à l'intérieur de la chambre à coucher.
2011	M. Basner et al.	Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation	Sleep	Laboratoire	Etudier les effets simples et combinés du bruit aérien, routier, et ferroviaire sur le sommeil et la récupération.	72	Allemagne	Route, train, Avion		LAeq, LAmx et nombre d'événements	Polysomnographie, actimètre et questionnaire	Route, train, avion affectent différemment les évaluations objectives et subjectives du sommeil. Les différences dans le degré du bruit induisant la fragmentation du sommeil entre les modes de circulation ont été expliqués selon la composition spectrale et temporelle spécifique des événements de bruit. L'exposition au bruit a affecté de façon significative les évaluations subjectives de la qualité du sommeil. Le bruit de la circulation routière a entraîné les changements les plus forts dans la structure du sommeil et de la continuité, alors que les évaluations subjectives de sommeil étaient pires après des nuits avec l'exposition au bruit des avions et du trafic ferroviaire. Les réponses cardiaques étaient significativement plus faibles pour le bruit des avions que pour la route et le bruit de la circulation ferroviaire. Les effets sont plus importants avec une combinaison de 3 ou 2 sources de bruit qu'une source unique de bruit
2011	S. Floud et al.,	Medication use in relation to noise from aircraft and road traffic in six European countries: results of the HYENA study	Occup Environ Med	In situ	Evaluer l'usage de médicament par rapport au bruit des avions et au bruit routier	4 861	Europe	Route et Avion	Estimation des niveaux de bruit	LAeq16h (7h23h ou 6h22h), Lnight (23h7h ou 22h6h), LAeq24h	Questionnaire	Augmentation de l'exposition-réponse dans l'utilisation des médicaments anxiolytiques en relation au bruit des avions. L'utilisation d'hypnotiques n'a pas été trouvée être associée à des niveaux de bruit.
2012	E. M. Elmenhorst et	Examining nocturnal railway noise and aircraft noise in the field: sleep, psychomotor performance, and	Sci Total Environ	In situ	Déterminer les réveils induits par le bruit ferroviaire pendant le sommeil, la gêne nocturne et l'impact sur la performance le	33 (61 pour étude	Allemagne	Train (avion)	Mesure des niveaux de bruit	LAeq et LAmx	Polysomnographie et questionnaire	La probabilité de changements de phase de sommeil pour s'éveiller/S1 due au bruit ferroviaire a considérablement augmenté, passant de 6,5% à 35 dB (A) à 20,5% à 80 dB (A) LAFmax. Le temps de montée d'un événement sonore a eu un impact significatif sur la probabilité d'être éveillé. Le bruit ferroviaire la nuit a conduit à des probabilités d'éveils significativement plus élevés que le bruit des avions, en partie expliqué par

Année	Auteur	Titre	Revue	Labo ou in situ	Objectif	Nb sujets	Pays	Source de bruit	Mesures versus modélisation de l'exposition au bruit	Indicateurs acoustiques utilisés	Comment est mesurée la qualité du sommeil ?	Résultats marquants et conclusion
	al.,	annoyance			lendemain. Comparer les résultats avec une étude sur le bruit des avions.	(avions)						les différences du temps de montée, alors que l'ordre a été inversé pour la gêne. Le bruit des trains de marchandises a plus d'impact sur la probabilité d'éveil comparé au bruit des trains de voyageurs.
2012	J. I. Halonen et al.,	Associations between nighttime traffic noise and sleep: the Finnish public sector study	Environ Health Perspect	In situ	Etudier la relation entre les niveaux de bruit de la circulation la nuit et les troubles du sommeil et identifier les groupes vulnérables de la population.	7 019	Finlande	Route	Nordic Prediction Method	LAeq,night	Questionnaire	LAeq,night > 50 dB à l'extérieur a été associée à des symptômes de l'insomnie chez les personnes ayant des scores élevés pour l'anxiété. Pour la population totale de l'étude, le Lnight extérieur > 55 dB était positivement associée à "quelconque symptôme".
2012	S. Pennig et al.,	Annoyance and self-reported sleep disturbance due to night-time railway noise examined in the field	J Acoust Soc Am	In situ	Etablir des relations exposition-réponse entre l'exposition au bruit ferroviaire nocturne et la gêne et examiner les perturbations autodéclarées comme des réactions à court terme au bruit.	33	Allemagne	Train	Mesure des niveaux de bruit	LAeq et nombre d'événement	Questionnaire	Une augmentation significative des fréquences d'éveil est trouvée avec une hausse du nombre totale de train. Une tendance peut être trouvée pour la relation fréquence d'éveil et LAeq
2013	F. P. Schmidt et al.,	Effect of nighttime aircraft noise exposure on endothelial function and stress hormone release in healthy adults	European Heart Journal	In situ	Etudier la relation entre l'exposition au bruit des avions nocturne et le dysfonctionnement endothélial	75	Allemagne	Avion	Enregistrement du bruit	Leq	Polygraphie et questionnaire	Le bruit a détérioré la qualité du sommeil. Augmentation de la concentration d'adrénaline le matin. Chez les adultes en bonne santé, l'exposition aiguë au bruit nocturne des avions nuit à la fonction endothéliale et stimule la libération d'adrénaline.
2014	P. Frei et al.	Effect of nocturnal road traffic noise exposure and annoyance on objective and subjective sleep quality	Int J Hyg Environ Health	In situ (longitudinal)	Effect du bruit routier sur le sommeil objectif et subjectif	Etude principale 1 375 Etude approfondie : 119	Suisse	route (bruit tramway pris en compte si sa voie suit celle des voitures)	Carte de bruit	Leq	Questionnaire Actimètre et agenda sommeil	Réduction de l'efficacité du sommeil Association significative avec sommeil objectif et non significative avec sommeil subjectif
2014	S. A. Janssen et al.	The effect of the number of aircraft noise events on sleep quality	Applied Acoustics	In situ	Etudier le lien entre la qualité du sommeil et le nombre d'événements de bruit aériens. Le premier objectif est de déterminer si le nombre d'événements est suffisamment représenté dans Lnight, dans le but de prédire la qualité du sommeil mesurée par la motilité. Le deuxième objectif est de déterminer si, Lnight déterminé, le nombre d'événements a une valeur prédictive supplémentaire. Il est en outre cherché à savoir si, pour la prédiction de la qualité du sommeil, les événements dépassant un certain niveau sonore doivent être pris en compte plutôt que le nombre total d'événements.	418	Pays-Bas	Avion	Mesure des niveaux de bruit	LAeq, Lmax et nombre d'événements	Questionnaire et actimètre	Compte tenu d'un certain niveau de bruit équivalent, des informations supplémentaires sur le nombre total d'événements n'améliorent pas la prédiction de la qualité du sommeil. Cependant, le nombre d'événements Lmax au-dessus de 60 dB a été lié à une augmentation de la motilité moyenne, ce qui indique une baisse de la qualité du sommeil. Aucun effet du nombre d'événements n'a été trouvé sur la qualité du sommeil auto-déclarée. Cette étude suggère donc que le nombre d'événements est plus ou moins adéquatement représentés dans Lnight et que le nombre d'événements de niveau de bruit élevé peut avoir des effets supplémentaires sur la qualité du sommeil, telle que mesurée par la motilité. Cela peut être donc considéré comme une indication auquel, en plus du Lnight, le nombre d'événements avec un Lmax relativement élevé pourrait être utilisé comme une base pour la protection contre les troubles du sommeil due au bruit.
		Exposure-Response Relationship			Déterminer la qualité du sommeil des résidents à proximité d'un							

Année	Auteur	Titre	Revue	Labo ou in situ	Objectif	Nb sujets	Pays	Source de bruit	Mesures versus modélisation de l'exposition au bruit	Indicateurs acoustiques utilisés	Comment est mesurée la qualité du sommeil ?	Résultats marquants et conclusion
2014	S. J. Kim et al.,	Between Aircraft Noise and Sleep Quality: A Community-based Cross-sectional Study	Osong Public Health Res Perspect	In situ	aérodrome et évaluer la relation entre les niveaux de bruit des aéronefs et la qualité du sommeil.	1 005	Korea	Avion	Bruit mesuré sur 4 lieux	Lamax et WECPNL	Questionnaire	La prévalence des troubles du sommeil augmente avec le niveau de bruit des avions.
2014	S. Pirrera et al.	Field study on the impact of nocturnal road traffic noise on sleep: the importance of in- and outdoor noise assessment, the bedroom location and nighttime noise disturbances	Sci Total Environ	In situ	Mieux comprendre comment le bruit de la circulation nocturne affecte le sommeil des habitants des régions bruyantes.	45	Belgique	Route	Mesure des niveaux de bruit	LAeq22h08h, Lamax et nombre d'événement	Questionnaire et actimètre	Les sujets du groupe bruyant passent moins de temps au lit par rapport au groupe calme (journal de sommeil). Plus d'éveils et plus de difficulté d'endormissement dans le groupe bruyant. Pour les paramètres actimétriques, aucune différence significative entre les 2 groupes. Les sujets qui vivent et dorment dans les régions bruyantes perçoivent correctement leur environnement en termes d'exposition au bruit et ont signalé un inconfort général à cause du bruit de la circulation.
2015	F. Schmidt et al.,	Nighttime aircraft noise impairs endothelial function and increases blood pressure in patients with or at high risk for coronary artery disease	Clin Res Cardiol	In situ	Etudier les effets du bruit nocturne des avions sur la fonction endothéliale chez les patients ou les individus présentant un risque élevé de maladie de l'artère coronaire.	60	Allemagne	Avion	Enregistrement du bruit	LAeq	Polygraphie et questionnaire	La qualité subjective du sommeil est significativement détériorée après exposition au bruit des avions. Augmentation de la pression artérielle systolique.
2015	G. Hajak et al.	Impact of overnight traffic noise on sleep quality, sleepiness, and vigilant attention in long-haul truck drivers: Results of a pilot study	Noise Health	Laboratoire	Évaluer l'impact du bruit de la circulation le long de l'autoroute sur la qualité du sommeil, la somnolence, et la vigilance chez les chauffeurs de camions long-courriers.	10	Allemagne	Route		LAeq	Polysomnographie, pupillographie et questionnaire	Dans les nuits silencieuses les sujets avaient un temps de sommeil total moyen plus long, une efficacité du sommeil supérieure, un temps plus court pour les mouvements oculaires rapides (REM) du sommeil, moins d'éveils et de changements de phases de sommeil, un temps d'éveil plus court après l'apparition du sommeil, et une qualité de sommeil subjective mieux notée. Bien qu'aucune de ces différences n'était réellement significative, une plus grande latence au sommeil paradoxal, un plus grand pourcentage de la phase de sommeil 1, et une meilleure estimation subjective du sommeil atteint les valeurs $P < 0,1$.

Annexe 2 - Tableau récapitulatif des revues de la littérature

Année	Auteur	Titre	Revue
1978	B. Griefahn et G. Jansen	EEG-responses caused by environmental noise during sleep their relationships to exogenic and endogenic influences	Sci Total Environ
1978	B. Griefahn et A. Muzet	Noise-induced sleep disturbances and their effects on health	Journal of Sound and Vibration
1980	D. Gloag	Noise and health: public and private responsibility	Br Med J
1982	M. Vallet	[Sleep disturbance caused by noise]	Soz Praventivmed
1993	M. Vallet et I. Vallet	Night aircraft noise index and sleep research results	Schriftenr Ver Wasser Boden Lufthyg
1993	R.G. de Jong	Review: extraaural health effects of aircraft noise	Schriftenr Ver Wasser Boden Lufthyg
1995	T. Kawada,	Effects of traffic noise on sleep: a review	Nihon Eiseigaku Zasshi
1996	N.L. Carter	Transportation noise, sleep, and possible after-effects	Environment International
1997	S. Morrell S et al.	A review of health effects of aircraft noise	Aust N Z J Public Health
2000	E. Ohrstrom	Sleep disturbances caused by road traffic noise - studies in laboratory and field	Noise Health
2002	B. Griefahn,	Sleep disturbances related to environmental noise	noise and health
2003	K. Scheuch et al.	Evaluation criteria for aircraft noise	Rev Environ Health
2004	C. Maschke et al.	Nocturnal awakenings due to aircraft noise. Do wake-up reactions begin at sound level 60 dB(A)?	Noise Health
2004	M. Basner and A. Samel,	Nocturnal aircraft noise effects	Noise Health
2004	B. Griefahn et M. Spreng	Disturbed sleep patterns and limitation of noise	Noise Health
2004	K. Persson Waye	Effects of low frequency noise on sleep	Noise Health
2004	H. Ising H et B. Kruppa	Health effects caused by noise: evidence in the literature from the past 25 years	Noise Health
2004	B. Griefahn et al.	Protection goals for residents in the vicinity of civil airports	Noise Health
2004	H. Wende et J. Ortscheid	Requirements for the protection against aircraft noise	Noise Health
2007	A. Muzet,	Environmental noise, sleep and health	Sleep Medicine Reviews

Année	Auteur	Titre	Revue
2007	D.S. Michaud et al.	Review of field studies of aircraft noise-induced sleep disturbance	J Acoust Soc Am
2010	M. Basner et al.	Aircraft noise effects on sleep: mechanisms, mitigation and research needs	Noise Health
2010	S. Pirrera S et al.	Nocturnal road traffic noise: A review on its assessment and consequences on sleep and health	Environ Int
2010	L.S. Finegold	Sleep disturbance due to aircraft noise exposure	Noise Health
2011	K.I. Hume	Noise pollution: a ubiquitous unrecognized disruptor of sleep?	Sleep
2012	S. Perron et al.	Review of the effect of aircraft noise on sleep disturbance in adults	Noise Health
2012	K.I. Hume et al.	Effects of environmental noise on sleep	Noise Health
2014	D. Halperin	Environmental noise and sleep disturbances: A threat to health?	Sleep Sci
2015	M. Basner et al.	ICBEN review of research on the biological effects of noise 2011-2014	Noise Health