Université Gustave Eiffel

univ-gustave-eiffel.fr

Bruit des avions et santé des riverains d'aéroport

L'étude nationale Debats

Discussion sur les **E**ffets du **B**ruit des **A**éronefs **T**ouchant la **S**anté

Résultats à l'inclusion

Auteurs :

Anne-Sophie Evrard[1], Marie Lefèvre[1,2], Clémence Baudin[1,3],
Ali-Mohamed Nassur[1,4], Liacine Bouaoun[5], Bruitparif[6],
Marie-Christine Carlier[7,8], Patricia Champelovier[9], Lise Giorgis-Allemand[1],
Aboud Kourieh[1], Jacques Lambert[8,9], Damien Léger[10] et Bernard Laumon[11]

Relectrice : Sylviane Lafont[1]

Octobre 2020

Affiliations des auteurs

[1] Université Gustave Eiffel, Ifsttar, Université Lyon 1, Umrestte, UMR-T9405, Bron, France

[2] Affiliation actuelle : Agence technique de l'information sur l'hospitalisation (ATIH), Lyon, France

[3] Affiliation actuelle : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), Fontenay-aux-Roses, France

[4] Affiliation actuelle : Action contre la faim, Paris, France

[5] Affiliation actuelle : Centre international de recherche sur le cancer, Lyon, France

[6] Centre d'évaluation technique de l'environnement sonore en Île-de-France, Saint-Denis, France

[7] Hospices civils de Lyon groupe hospitalier sud CBAPS, Laboratoire de biochimie, Pierre Bénite, France

[8] Actuellement retraité(e), France

[9] Université Gustave Eiffel, Ifsttar, département Aménagement, mobilités et environnement (AME), Équipe en émergence Dynamique des changements de mobilité (DCM)[1], Bron, France

[10] Université de Paris, Assistance publique hôpitaux de Paris, Hôtel-Dieu de Paris, Centre du sommeil et de la vigilance et EA7330 VIFASOM (Vigilance fatigue sommeil et santé publique), Paris, France

[11] Université Gustave Eiffel, Ifsttar, département Transport santé sécurité (TS2), Bron, France

Comment citer ce rapport ?

Evrard, A.-S., Lefèvre, M., Baudin, C., Nassur, A.-M., Bouaoun, L., Bruitparif, Carlier, M.-C., Champelovier, P., Giorgis-Allemand, L., Kourieh, A., Lambert, J., Léger, D., & Laumon, B. (2020). Bruit des avions et santé des riverains d'aéroport. L'étude nationale Debats: résultats à l'inclusion. *Université Gustave Eiffel*. https://doi.org/10.25578/M3JK-R022 (CC BY-NC-ND).

[1] Ancienne équipe "Perception, acceptabilité et comportements" (PAC) du Laboratoire Transports et Environnement (LTE).

Sommaire

Synthèse 4

Rapport 6

1. Contexte et objectifs 6
   1.1. Contexte 6
   1.2. Objectifs 7

2. Matériel et méthodes 8
   2.1. Définition de la zone d'étude 8
   2.2. Méthodologie 8
      2.2.1. Étude écologique 9
      2.2.2. Étude individuelle longitudinale 10
         2.2.2.1. Population d'étude 10
         2.2.2.2. Recueil de l'information et construction des variables 13
         2.2.2.3. Méthodologie d'analyse statistique 18
      2.2.3. Étude clinique « sommeil » 19
         2.2.3.1. Population d'étude 19
         2.2.3.2. Recueil de l'information et construction des variables 22
         2.2.3.3. Méthodologie d'analyse statistique 29

3. Résultats 30
   3.1. Étude écologique 30
   3.2. Étude individuelle longitudinale 31
      3.2.1. Bruit des avions et état de santé perçu 31
      3.2.2. Bruit des avions et troubles psychologiques 32
      3.2.3. Bruit des avions et gêne 33
      3.2.4. Bruit des avions et évaluation subjective du sommeil 34
      3.2.5. Bruit des avions et stress 35
      3.2.6. Bruit des avions et hypertension artérielle 36
   3.3. Étude clinique « sommeil » 37

4. Discussion, conclusions et perspectives 39
   4.1. Discussion 39
   4.2. Conclusions 41
   4.3. Originalités de Debats 41
   4.4. Perspectives 42

5. Références 43

Liste des principaux sigles et abréviations 45

Remerciements 46

Synthèse

Objectif général – Piloté par l'Acnusa[1] et confié à l'Université Gustave Eiffel, Debats est le premier programme de recherche d'ampleur, en France, dont l'objectif est d'évaluer les effets éventuels de l'exposition au bruit des avions sur la santé des riverains d'aéroports.

Matériel et méthodes – Ce programme est mis en place aux abords de trois aéroports français (Paris-Charles-de-Gaulle, Lyon-Saint-Exupéry et Toulouse-Blagnac). Il associe trois approches méthodologiques complémentaires (écologique[2], individuelle longitudinale et « clinique[3] »). Chacune prend en compte tous les facteurs de confusion[4] connus ou suspectés.

L'étude écologique met en relation le niveau moyen d'exposition au bruit des avions, dans chacune des 161 communes situées à proximité de ces aéroports, et leur mortalité, communiquée par le CépiDc[5], par maladie cardiovasculaire en général, par maladie cardiaque ischémique en particulier, notamment par infarctus du myocarde, et par accident vasculaire cérébral. L'exposition moyenne au bruit des avions est estimée à partir des cartes de bruit produites par AdP[6] pour Paris-Charles-de-Gaulle et par la DGAC[7] pour Lyon-Saint-Exupéry et Toulouse-Blagnac.

L'étude individuelle longitudinale inclut, en 2013, 1244 habitants représentatifs des habitants de ces mêmes communes[8]. Ils font l'objet d'un suivi deux et quatre ans après[9]. La passation d'un questionnaire en face à face permet de renseigner leurs caractéristiques démographiques et socioéconomiques, leur mode de vie et leur état de santé (état de santé perçu, troubles psychologiques, gêne ressentie, effets potentiels sur leur sommeil et leurs systèmes endocrinien et cardiovasculaire). L'exposition au bruit des avions au domicile des participants est estimée à partir des mêmes cartes que dans l'étude écologique.

L'étude clinique « sommeil » porte sur 112 individus sélectionnés parmi les participants à l'étude précédente. Ils font aussi l'objet d'un suivi deux et quatre ans après[10]. Des mesures actimétriques et du rythme cardiaque, analysées par le Centre du sommeil et de la vigilance de l'Hôtel-Dieu de Paris, permettent de déterminer les paramètres objectifs du sommeil de ces participants. Par ailleurs, afin de caractériser précisément leur exposition au bruit des avions, des mesures acoustiques sont concomitamment réalisées, par Bruitparif[11], pendant sept jours et sept nuits à l'extérieur et à l'intérieur de leur chambre à coucher.

Résultats

L'étude écologique suggère qu'une augmentation de l'exposition au bruit des avions de 10 dB(A)[12] est associée à un risque de mortalité plus élevé de 18 % pour l'ensemble des maladies cardiovasculaires, de 24 % pour les seules maladies cardiaques ischémiques et de 28 % pour les seuls infarctus du myocarde. En revanche, il n'a pas été mis en évidence d'association avec la mortalité par accident vasculaire cérébral.

---

[1] Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires.
[2] Étude épidémiologique dans laquelle les critères analysés concernent des agrégats d'individus plutôt que des individus eux-mêmes.
[3] « Clinique » est pris ici au sens d'une étude statistique d'ampleur limitée, comme peuvent l'être beaucoup d'essais cliniques.
[4] Facteurs qui peuvent entraîner des erreurs sur l'intensité de l'association entre exposition et événement étudié.
[5] Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès.
[6] Aéroports de Paris.
[7] Direction générale de l'aviation civile.
[8] Le pourcentage de personnes initialement sollicitées qui ont accepté de participer à l'étude, est de 30 %.
[9] Parmi les 1244 participants initiaux, respectivement 992 et 811 ont pu participer à ces suivis.
[10] Parmi les 112 participants initiaux, respectivement 79 et 62 ont pu participer à ces suivis.
[11] Centre d'évaluation technique de l'environnement sonore en Île-de-France.
[12] dB : unité de mesure (logarithmique) d'un niveau sonore ; dB(A) : mesure de ce niveau pondérée pour tenir compte de la sensibilité moyenne des personnes ayant une audition considérée comme normale, pour chaque bande de fréquences.

L'étude individuelle longitudinale suggère plusieurs associations avec une augmentation du niveau de bruit de 10 dB(A) :
- un risque de « dégradation de l'état de santé perçu » augmenté de 55 % chez les hommes, sans qu'aucune augmentation ne soit mise en évidence chez les femmes ;
- une « gêne » plus importante que ce que prévoit l'ancienne courbe de référence de l'Union Européenne (appelée courbe de Miedema), mais plus faible que ce que prévoit la nouvelle courbe de l'Union Européenne fournie par l'Organisation mondiale de la santé, en mars 2020[13][14] ;
- un risque de dormir moins de six heures par nuit augmenté de 60 %, et un risque de sentiment de fatigue le matin au réveil de 20 % ;
- un risque de stress chronique, objectivé par une perturbation du rythme circadien du cortisol (diminution de 15 % de la variation absolue horaire du cortisol, augmentation de 16 % du niveau de cortisol au coucher, mais sans variation significative au lever) ;
- un risque d'hypertension artérielle augmenté de 34 % chez les hommes, sans qu'aucune augmentation ne soit mise en évidence chez les femmes ;
- enfin, un risque de détresse psychologique augmenté de 80 % chez les participants légèrement gênés par le bruit des avions et multiplié par 4 chez ceux qui déclarent être fortement gênés[15], par rapport à ceux qui ne sont pas du tout gênés.

L'étude clinique « sommeil » suggère que l'exposition au bruit des avions dégrade les paramètres objectifs du sommeil. Ainsi :
- l'augmentation du niveau de bruit des avions de 10 dB(A) ou de 10 événements de bruits d'avions est associée à une probabilité, de dormir moins de six heures par nuit (court sommeil), 1,1 à 1,8 fois plus élevée ; et à une probabilité, de passer plus de neuf heures au lit, 1,1 à 1,6 fois plus élevée[16] ;
- l'augmentation du niveau de bruit des avions de 10 dB(A) est associée à la probabilité, d'une insomnie d'endormissement (ie une latence d'endormissement supérieure à trente minutes), 1,1 à 1,3 plus élevée ;
- l'augmentation de 10 événements de bruits d'avions est associée à une probabilité, d'une insomnie de maintien de sommeil (ie une durée totale des éveils intra-sommeil supérieure à trente minutes), 1,1 à 1,3 fois plus élevée ;
- enfin, l'augmentation de 10 dB(A) du niveau maximum de bruit d'un évènement associé au passage d'un avion ($L_{Amax,1s}$) est associée à une augmentation de l'amplitude de la fréquence cardiaque pendant cet événement (de 0,34 battement par minute).

Conclusion

L'étude écologique confirme les résultats d'autres études qui suggèrent qu'une augmentation de l'exposition au bruit des avions est associée à une mortalité plus élevée par maladie cardiovasculaire. Il est cependant imprudent d'extrapoler ces résultats au niveau individuel. C'est pourquoi deux études individuelles ont également été mises en place.

L'étude individuelle longitudinale et l'étude clinique « sommeil » confirment les résultats d'études antérieures réalisées à l'étranger. Ils suggèrent que l'exposition au bruit des avions, en France comme ailleurs, a des effets délétères sur l'état de santé perçu, la santé psychologique, la gêne, la quantité et la qualité du sommeil et les systèmes endocrinien et cardiovasculaire.

La validité de ces résultats est pour le moins renforcée par ceux de l'analyse longitudinale de l'ensemble des données recueillies en 2013, 2015 et 2017[17].

---

[13] Par exemple, à 60 dB(A), l'ancienne courbe de l'Union Européenne prévoit 17 % de personnes fortement gênées par le bruit des avions alors que les courbes basées sur les résultats de Debats en prévoient entre 22 et 27 %, et la nouvelle courbe de l'Union Européenne 36 %.
[14] Cette gêne importante est aussi associée à des facteurs non acoustiques tels que l'âge, la satisfaction du cadre de vie, les attentes concernant la qualité de vie dans le voisinage, la sensibilité au bruit, la peur d'un accident d'avion et les attitudes liées à la source et à l'autorité.
[15] Par ailleurs, l'exposition au bruit des avions ne semble pas directement associée aux troubles psychologiques. Cependant, la gêne due au bruit des avions et la sensibilité au bruit sont associées à la détresse psychologique.
[16] Cette augmentation pouvant être interprétée comme un mécanisme d'adaptation à la privation de sommeil.
[17] Sous embargo jusqu'à publication dans des revues scientifiques (et donc leur validation par nos pairs).

Rapport

1. Contexte et objectifs

1.1. Contexte

Les transports constituent une source majeure d'exposition à des nuisances environnementales pour la population (bruit et pollution de l'air notamment). Dans une enquête sur les nuisances environnementales des transports menée en 2005 sur tout le territoire français (Lambert and Philipps-Bertin 2009), près de 7 % de la population française se déclarait gênée par le bruit des avions. Cette exposition pourrait avoir des conséquences importantes pour la santé. Toutefois, celles-ci sont insuffisamment évaluées en France.

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 recommandait ainsi 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 en 2005, la mise en œuvre d'un programme de recherche épidémiologique appelé "**D**iscussion sur les **E**ffets du **B**ruit des **A**éronefs **T**ouchant la **S**anté" (Debats). En 2009, l'Acnusa, qui souhaitait promouvoir l'avancement de ce projet, a sollicité l'Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité[19] (Inrets), devenu aujourd'hui l'Université Gustave Eiffel, pour la mise en place de ce projet.

L'Unité mixte de recherche épidémiologique et de surveillance transport travail environnement (Umrestte) est une unité mixte associant l'Université Gustave Eiffel et l'Université Claude Bernard Lyon 1. L'une de ses missions est, par des études épidémiologiques, en particulier dans le domaine des transports, d'améliorer la connaissance et l'évaluation des effets des nuisances environnementales sur la santé. L'Umrestte est en charge de la coordination scientifique de Debats qui a été conduite en collaboration avec l'ancienne équipe "Perception, acceptabilité et comportements" (PAC) du Laboratoire Transports et Environnement[20] (LTE) de l'Université Gustave Eiffel. L'équipe PAC aborde les questions du bruit des transports dans ses dimensions psychologiques et sociales : perception, représentations, gêne, relations exposition-effets, revendications et attentes des riverains vis-à-vis des nuisances sonores, satisfaction vis-à-vis des solutions de réduction du bruit.

[19] Devenu Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar) le 1er janvier 2011, puis Université Gustave Eiffel le 1er janvier 2020.

[20] Devenue l'équipe en émergence Dynamique des changements de mobilité le 1er janvier 2019, suite à la dissolution du LTE.

1.2. Objectifs

L'objectif de Debats est de mieux connaître et quantifier les effets du bruit des avions sur la santé des populations riveraines des aéroports français. Il s'agit d'adopter une approche globale en caractérisant les relations entre l'exposition au bruit des avions et les états de santé de ces riverains à la fois sur le plan physique et mental, mais aussi en termes de gêne ressentie.

Les effets sur la santé auxquels Debats s'intéresse sont la dégradation de l'état de santé perçu, les troubles psychologiques, la gêne due au bruit des avions, les perturbations du sommeil, et les effets sur le système endocrinien (notamment la sécrétion de cortisol, marqueur de stress), et le système cardiovasculaire (hypertension et autres maladies cardiovasculaires).

2. Matériel et méthodes

2.1. Définition de la zone d'étude

Debats consiste en un programme de recherche national auprès des riverains de trois aéroports français majeurs : Paris-Charles-de-Gaulle, Lyon-Saint-Exupéry et Toulouse-Blagnac. En 2011, le trafic passager de ces aéroports était respectivement d'environ 61 millions, 8,5 millions et 7 millions de personnes (Direction du transport aérien 2012).

La zone d'étude comprend d'une part l'ensemble des communes intégrées dans les Courbes d'environnement sonore (CES) de Paris-Charles-de-Gaulle, et dans les Plans de gêne sonore (PGS) de Lyon-Saint-Exupéry et de Toulouse-Blagnac, d'autre part les communes limitrophes de ces communes. L'inclusion de ces communes limitrophes permet d'élargir la zone d'étude à des communes moins exposées (L_{den}<55 dB(A)) que celles intégrées dans les CES et les PGS (L_{den}>55 dB(A)).

Le L_{den} (L pour level, d pour day, e pour evening et n pour night) est un indicateur pour la période de 24 heures, défini dans la directive européenne 2002/49 relative à l'évaluation et à la gestion du bruit ambiant (European Commission 2002a) comme la moyenne pondérée des niveaux sonores pendant la journée (6h à 18h), le soir (18h à 22h), et la nuit (22h à 6h), où les niveaux de pression acoustique du soir et de la nuit ont reçu une majoration de 5 et 10 dB(A) respectivement pour refléter la sensibilité supplémentaire au bruit pendant la soirée et la nuit.

Ces cartes de bruit sont produites avec le logiciel INM (Integrated Noise Model) (He et al. 2007) par Aéroports de Paris (AdP) pour Paris-Charles-de-Gaulle et par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC) pour Lyon-Saint-Exupéry et Toulouse-Blagnac.

Ainsi, la zone d'étude de Debats comprend au total 161 communes : 108 communes pour Paris-Charles-de-Gaulle, 31 communes pour Lyon-Saint-Exupéry et 22 communes pour Toulouse-Blagnac (Figure 1).

2.2. Méthodologie

Debats comprend :

- Une **étude écologique** consistant à mettre en relation des indicateurs de santé agrégés à l'échelle de la commune (mortalité toutes causes et pour certaines causes spécifiques) avec le niveau moyen pondéré d'exposition au bruit des avions des communes concernées. Ce type d'étude permet de vérifier la vraisemblance d'une association entre des effets sur la santé et l'exposition au bruit des avions et d'élaborer ainsi des hypothèses. Mais il est en revanche impossible de faire des extrapolations individuelles à partir de ses résultats. C'est la raison pour laquelle une étude individuelle longitudinale a également été mise en place.
- Une **étude individuelle longitudinale** comptant 1244 participants à l'inclusion et ayant pour objectif d'évaluer les associations entre l'exposition au bruit des avions et des effets physiologiques et physiopathologiques. Lors de leur inclusion dans l'étude puis deux et quatre ans après, les informations concernant leur état de santé sont obtenues par des enquêteurs au domicile des participants, d'une part par l'administration d'un questionnaire (perception de l'état de santé, troubles psychologiques, gêne due au bruit

des avions et effets sur le sommeil et le système cardiovasculaire), d'autre part par des mesures de la pression artérielle, de la fréquence cardiaque et de la concentration de cortisol salivaire (marqueur des états de stress).

- Une étude clinique complémentaire appelée « **étude sommeil** » incluant 91 riverains de l'aéroport Paris-Charles-de-Gaulle et 21 riverains de l'aéroport de Toulouse-Blagnac qui ont participé à l'étude précédente. L'objectif est de caractériser de manière détaillée et spécifique les effets aigus du bruit des avions sur le sommeil, tout en affinant l'exposition au bruit des avions par des mesures individualisées.

2.2.1. Étude écologique

L'objectif de l'étude écologique est de mettre en relation des indicateurs de santé agrégés à l'échelle de la commune avec le niveau moyen pondéré d'exposition au bruit des avions des communes concernées. L'indicateur de santé étudié est la mortalité. Nous nous sommes intéressés à la relation entre l'exposition au bruit des avions et la mortalité par maladie cardiovasculaire en général, par maladie cardiaque ischémique en particulier, par infarctus du myocarde notamment, et par accident vasculaire cérébral.

La zone d'étude de cette étude écologique comprend 161 communes situées à proximité des aéroports Paris-Charles-de-Gaulle, Lyon-Saint-Exupéry et Toulouse-Blagnac (Cf. 2.1).

Les données de mortalité ont été transmises pour chaque commune, sur la période 2007-2010 par le Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès (CépiDc) de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm). Le CépiDc utilise la classification internationale des maladies 10ème révision (CIM-10) pour coder et classifier les données de mortalité à partir des certificats de décès. Cette étude s'intéresse à quatre causes de mortalité au sein du groupe des maladies de l'appareil circulatoire : les maladies cardiovasculaires (rassemblant les maladies codées I00 à I52), le sous-groupe des cardiopathies ischémiques (I20-I25), dans ce dernier, celui des infarctus du myocarde (I21-I22), et le groupe des accidents vasculaires cérébraux de nature hémorragique ou ischémique artériel (I60–I64, sauf I63.6) au sein des maladies cérébrovasculaires. Sur la période 2007-2010, le CépiDc a enregistré 7450 décès par maladie cardiovasculaire dans l'ensemble des communes de la zone d'étude.

L'exposition de chaque commune au bruit des avions est estimée à partir des cartes de bruit produites par AdP et la DGAC. Pour chaque aéroport, nous avons utilisé les cartes de bruit disponibles les plus récentes. Plus précisément, elles datent de 2008 pour Paris-Charles-de-Gaulle, 2003 pour Lyon-Saint-Exupéry, et 2004 pour Toulouse-Blagnac. Les niveaux de bruit estimés dans les cartes de bruit sont disponibles avec une résolution de 1 dB(A), à partir de 50 dB(A) pour la zone de Paris et 45 dB(A) pour les zones de Lyon et Toulouse. Pour chaque commune, le nombre d'habitants résidant dans chaque intervalle de 1 dB(A) est déterminé à partir du croisement produit en routine par la DGAC des données du recensement de la population et des cartes de bruit. Pour la zone de Paris, les cartes de bruit de 2008 sont croisées avec les données de population de 1999 (les seules disponibles au moment où la DGAC a fait le croisement). Pour la zone de Lyon, les cartes de bruit de 2003 sont croisées avec les données de population de 2007. Et enfin, pour la zone de Toulouse, les cartes de bruit de 2004 sont croisées avec les données de population de 2008. Un statisticien de l'Umrestte a ensuite agrégé ces niveaux de bruit de façon à obtenir une estimation du niveau d'exposition au bruit des avions pour chaque commune de la zone d'étude. Une moyenne pondérée sur la population, également appelée indice moyen d'exposition au bruit des avions (L_{den}IME) est ainsi calculée en

pondérant, pour une commune donnée, le L_{den} par le nombre d'habitants résidant dans chaque intervalle de 1 dB(A).

Les facteurs de confusion potentiels que sont le sexe, l'âge, la densité de population, la défaveur sociale, la mortalité par cancer du poumon (ICD-10 code : C34) et la pollution de l'air sont pris en compte à l'échelle de la commune dans des modèles de régression de Poisson. Les variables sexe, âge et densité de population sont issues des données du recensement de l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee) de 2008. Concernant le sexe, nous utilisons la proportion de femmes dans chaque commune, et pour l'âge, l'âge moyen de la population dans la commune. Le logarithme de la densité de population est introduit dans les modèles à la place de la densité de population pour prendre en compte la grande variabilité de la densité de population d'une commune à l'autre. La mortalité par cancer du poumon est utilisée à l'échelle de la commune comme variable d'approximation de la consommation de tabac car en France, il n'existe ni données individuelles ni données de prévalence à l'échelle de la commune pour cette consommation. Cette variable provient des données du CépiDc pour la période 2007-2010. Un indice de défaveur sociale est aussi construit à l'échelle de la commune, à partir du revenu médian, du pourcentage de bacheliers dans la population de 15 ans et plus, de la proportion d'ouvriers dans la population active et du taux de chômage chez les 15-64 ans, et pris en compte dans les modèles de régression. Ces données socioéconomiques sont obtenues à partir du recensement de 2007 de l'Insee, année la plus récente pour laquelle ces variables sont disponibles au moment de l'étude.

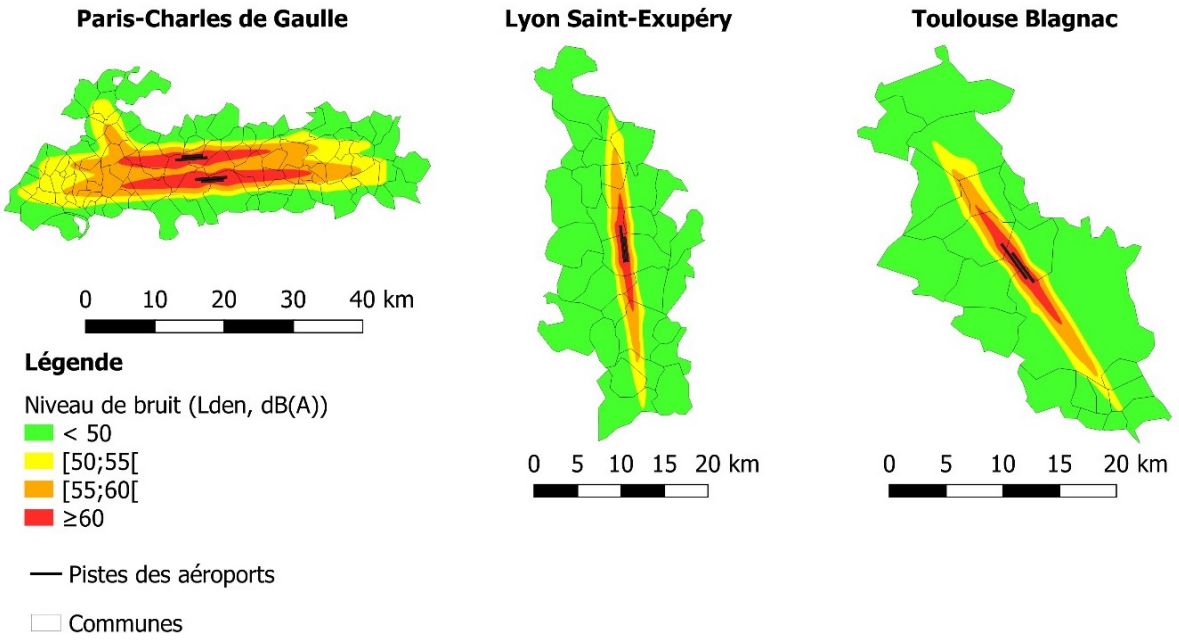
2.2.2. Étude individuelle longitudinale

2.2.2.1. Population d'étude

La population d'étude est constituée des riverains des trois aéroports suivants : Paris-Charles-de-Gaulle, Lyon-Saint-Exupéry et Toulouse-Blagnac. Les personnes recrutées sont âgées de 18 ans et plus, résident dans l'une des communes situées dans la zone d'étude (Cf. 2.1) et habitent dans leur logement (résidence principale) situé dans cette commune pendant au moins six mois dans l'année. Pour être éligible, les personnes devaient être disponibles pendant la durée de l'étude, comprendre et parler suffisamment le français pour répondre à un questionnaire (sans distinction de nationalité), et se prêter à différentes mesures physiologiques.

L'objectif était de recruter approximativement 300 riverains dans chacune des quatre zones de bruit définies à partir des cartes de bruit : <50 dB(A), 50-54 dB(A), 55-59 dB(A) et ≥60 dB(A) (Cf. 2.1, Figure 1). Un échantillon d'adresses situées dans les communes de la zone d'étude, stratifié sur ces quatre zones de bruit, a été tiré au sort, par l'institut de sondage GfK ISL, dans l'annuaire téléphonique universel. Le but était de s'assurer qu'un nombre suffisant de participants soient exposés à des niveaux élevés de bruit des avions, permettant ainsi d'optimiser la puissance statistique des analyses. La sélection du répondant a ensuite été effectuée par tirage au sort au sein des membres éligibles du foyer au moment du contact téléphonique. La personne sélectionnée, si elle acceptait de participer, signait alors un formulaire de consentement éclairé qu'elle retournait par courrier à GfK ISL. Au final, 1244 personnes sont incluses dans l'étude en 2013. Elles ont été interrogées en 2013, 2015 et 2017 par des enquêteurs de l'Université Gustave Eiffel.

Figure 1. Zones de bruit autour des trois aéroports pour le recrutement des participants à l'étude individuelle longitudinale



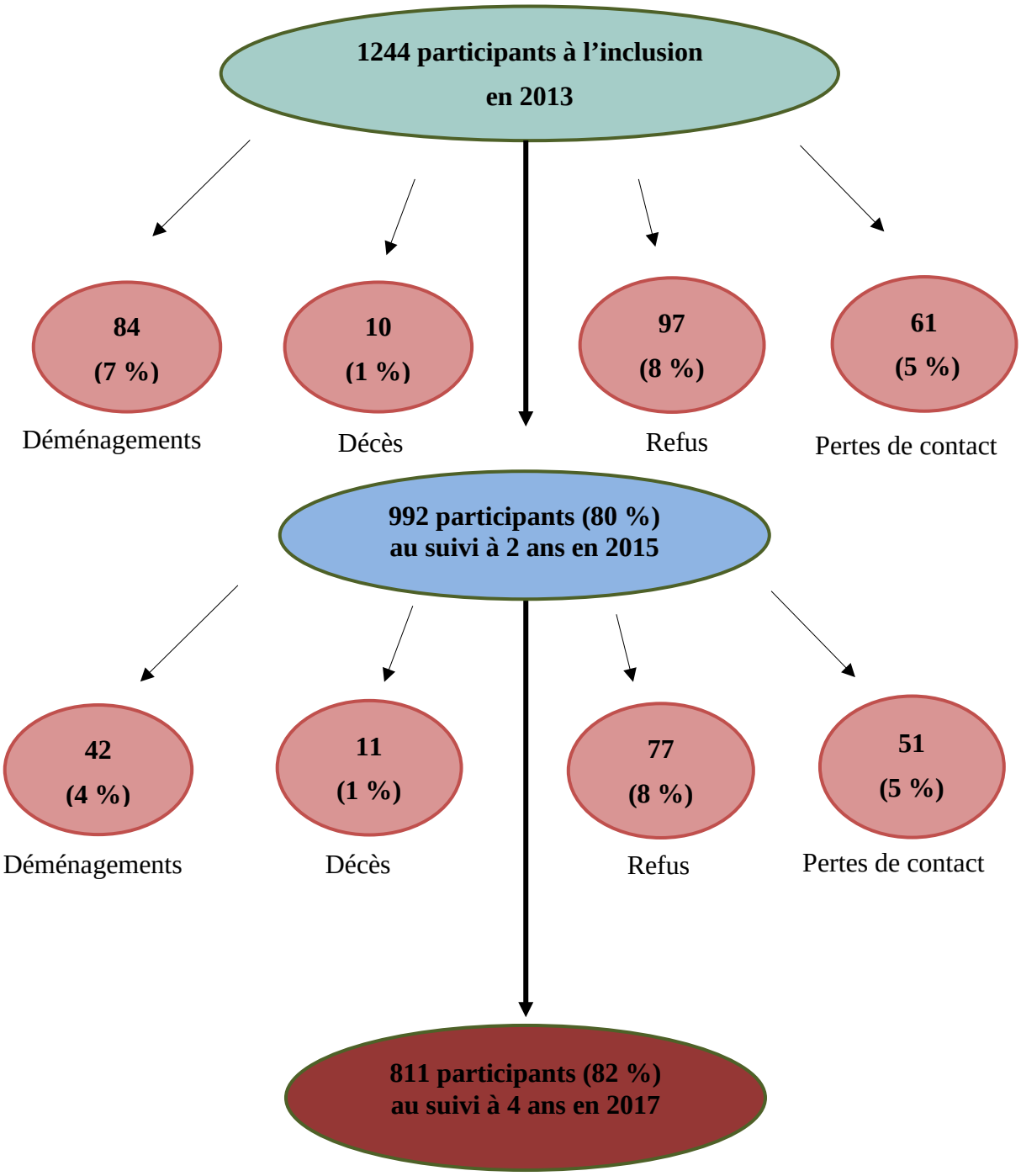
Le taux de participation s'élève à 30 % (1244 participants / 4202 personnes éligibles), mais diffère selon l'aéroport : 26 % à Paris-Charles-de-Gaulle, 39 % à Lyon-Saint-Exupéry et 34 % à Toulouse-Blagnac. En revanche, il est similaire dans les quatre zones de bruit.

Près de 40 % des personnes contactées ont refusé de participer à l'étude mais elles ont néanmoins accepté de répondre à un questionnaire renseignant leurs caractéristiques démographiques et socioéconomiques. Les profils démographiques et socioéconomiques des participants sont ainsi comparés à ceux des non-participants.

Sur les 1244 participants à l'inclusion en 2013, 992 (80 %) ont à nouveau participé au suivi à 2 ans, 84 (7 %) n'ont pas pu être maintenus dans l'étude suite à un déménagement en dehors de la zone d'étude, 10 personnes (1 %) sont décédées entre l'inclusion et le suivi à 2 ans, 97 (8 %) n'ont pas souhaité renouveler leur participation et 61 (5 %) ont été perdues de vue (adresses et/ou téléphones non valides) (Figure 2).

Sur les 992 participants au suivi à 2 ans en 2015, 811 (82 %) ont à nouveau participé au suivi à 4 ans en 2017, 42 (4 %) n'ont pas pu être maintenus dans l'étude suite à un déménagement en dehors de la zone d'étude, 11 personnes (1 %) sont décédées entre le suivi à 2 ans et le suivi à 4 ans, 77 (8 %) n'ont pas souhaité renouveler leur participation et 51 (5 %) ont été perdues de vue (adresses et/ou téléphones non valides) (Figure 2).

Figure 2. Participation aux différents entretiens



Le profil démographique et socioéconomique des participants au suivi à 4 ans reste similaire au profil des participants à l'inclusion et au suivi à 2 ans (Tableau 1).

Tableau 1. Profils des participants à l'inclusion, au suivi à 2 ans et au suivi à 4 ans

	Participants à l'inclusion (1244)	Participants au suivi à 2 ans (992)	Participants au suivi à 4 ans (811)
Sexe			
Masculin	44 %	45 %	46 %
Féminin	56 %	55 %	54 %
Age			
18-25 ans	7 %	3 %	2 %
26-34 ans	12 %	9 %	6 %
35-44 ans	19 %	18 %	15 %
45-54 ans	21 %	22 %	25 %
55-64 ans	21 %	22 %	22 %
65-74 ans	15 %	18 %	21 %
75 ans et plus	6 %	7 %	9 %
Statut marital			
Célibataire	20 %	18 %	16 %
Marié(e)/Vivant maritalement	63 %	66 %	68 %
Veuf/Veuve	6 %	6 %	7 %
Divorcé(e)/Séparé(e)	11 %	9 %	9 %
Catégorie socioprofessionnelle			
Agriculteurs exploitants	0 %	0 %	0 %
Artisans, commerçants, chefs d'entreprise	2 %	2 %	3 %
Cadres et professions intellectuelles sup	18 %	18 %	17 %
Professions intermédiaires	18 %	18 %	17 %
Employés	22 %	19 %	18 %
Ouvriers	6 %	6 %	5 %
Retraités	27 %	32 %	36 %
Inactifs	7 %	5 %	3 %

La proportion de participants âgés de 65 et plus augmente au cours des suivis (respectivement 21, 25 et 30 %), au détriment des participants de moins de 35 ans (respectivement 19, 12 et 8 %). La proportion de participants retraités est par conséquent un peu plus élevée au cours des suivis (respectivement 27, 32 et 36 %). La proportion de participants célibataires connaît une légère diminution (respectivement 20, 18 et 16 %) au profit des participants vivant maritalement (respectivement 63, 66 et 68 %).

2.2.2.2. Recueil de l'information et construction des variables

Les participants à l'étude individuelle longitudinale ont répondu à un questionnaire lors d'un entretien en face-à-face à leur domicile avec un enquêteur de l'Université Gustave Eiffel.

État de santé perçu

L'état de santé perçu est une auto-évaluation de sa propre santé (Statistique Canada 2019). Cette mesure subjective peut être considérée comme un indicateur de qualité de vie, de

morbidité et de mortalité (Idler and Benyamini 1997). Elle est fortement et systématiquement associée à des problèmes de santé physique ou mentale (Bacak and Olafsdottir 2017).

L'état de santé perçu est évalué grâce à la première question du questionnaire SF-36 "Dans l'ensemble, pensez-vous que votre santé est excellente, bonne, médiocre, mauvaise ?". Pour les analyses statistiques, les réponses à cette question sont dichotomisées de la façon suivante : santé "excellente" ou "bonne" versus "médiocre" ou "mauvaise".

Troubles psychologiques

La présence de troubles psychologiques est objectivée grâce à la version en douze questions du General Health Questionnaire (GHQ-12) (Goldberg and Williams 1988). Chacune des questions comporte une réponse en quatre points : "pas du tout", "pas plus que d'habitude", "plutôt plus que d'habitude", et "beaucoup plus que d'habitude" (modalités habituellement regroupées de manière bimodale et donc respectivement codées 0, 0, 1, 1). Un score total compris entre 0 et 12 est calculé en additionnant les résultats obtenus pour chaque question. Les participants ayant un score total de 3 ou plus sont considérés comme ayant une détresse psychologique (McDowell 2006).

Gêne due au bruit des avions

La gêne due au bruit des avions est évaluée à l'aide d'une question normalisée avec une réponse verbale en cinq points recommandée par l'International commission on the biological effects of noise (ICBEN) (Fields et al. 2001) : "En pensant aux 12 derniers mois, lorsque vous êtes ici chez vous, dans quelle mesure le bruit des avions vous gêne-t-il ?" : "extrêmement", "beaucoup", "moyennement", "légèrement" ou "pas du tout" (ISO 2003). Comme le recommande la Commission européenne, la gêne dans la population étudiée est décrite en utilisant le pourcentage de personnes fortement gênées (%HA) défini par la proportion de personnes déclarant être « beaucoup » ou « extrêmement » gênées par le bruit des avions (Fields et al. 2001).

Évaluation subjective du sommeil à partir du questionnaire

La durée totale de sommeil est évaluée par la différence entre l'heure à laquelle les participants déclarent éteindre la lumière pour dormir et l'heure à laquelle ils déclarent se lever[21]. Elle est ensuite dichotomisée : "courte" (≤ 6 heures) versus "normale ou longue" (> 6 heures). En effet, chez les adultes, le fait de dormir moins de 6 heures par nuit pendant les jours de la semaine est généralement associé à des comorbidités potentielles (surpoids, obésité, diabète de type 2, hypertension, maladies cardiovasculaires, accidents de la route) (Léger et al. 2019).

Dans le questionnaire, les participants décrivent également comment ils se sentent le matin au réveil après une nuit de sommeil habituelle : "bien reposé", "plutôt reposé", "plutôt fatigué" ou "très fatigué". Cette variable est dichotomisée de la façon suivante : "bien ou plutôt reposé" versus "plutôt ou très fatigué".

Les participants estiment également leur temps d'endormissement en répondant à la question « Habituellement, combien de temps vous faut-il pour vous endormir ? Moins de 5 minutes, entre 5 et 15 minutes, entre 15 et 30 minutes, entre 30 minutes et 1 heure, plus d'1

[21] Cette durée totale de sommeil estimée correspond en fait au temps passé au lit car elle inclut la durée des éveils intra-sommeil.

heure ? » Cette variable est dichotomisée : "30 minutes et plus" (insomnie d'endormissement) versus "moins de 30 minutes".

Ils sont aussi interrogés sur leurs éveils nocturnes avec la question « Vous arrive-t-il de vous réveiller pendant la nuit ? Toutes les nuits, régulièrement, occasionnellement, rarement, jamais ? » Cette variable est dichotomisée : "toutes les nuits ou régulièrement" versus "occasionnellement, rarement ou jamais".

Les participants évaluent par ailleurs leur satisfaction vis-à-vis de la qualité de leur sommeil : « Êtes-vous satisfait(e) de la qualité de votre sommeil ? Très satisfait, plutôt satisfait, plutôt insatisfait, très insatisfait ? » Cette variable est dichotomisée : "plutôt ou très insatisfait" versus "plutôt ou très satisfait".

Enfin, ils répondent à la question « Prenez-vous des médicaments pour dormir ? Tous les soirs, régulièrement, occasionnellement, rarement, jamais ? » Cette variable est également dichotomisée : "tous les soirs ou régulièrement" versus "occasionnellement, rarement ou jamais".

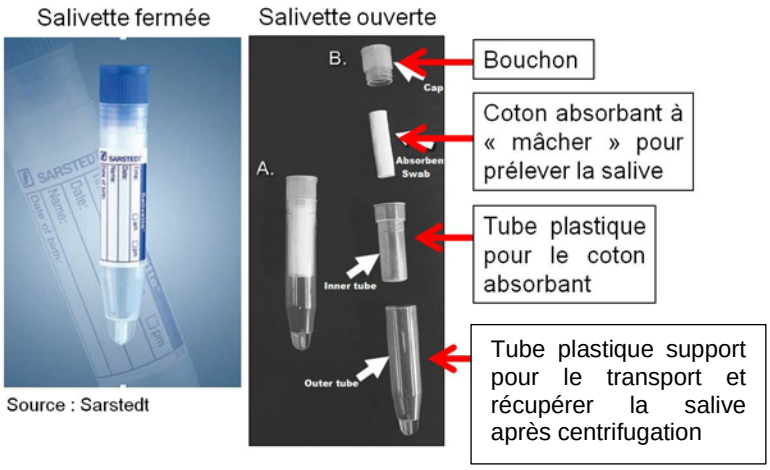
Niveau de stress mesuré à partir de la sécrétion de cortisol

Le cortisol est un marqueur du stress, notamment celui éventuellement induit par l'exposition au bruit. Cette hormone joue un rôle déterminant dans la presque totalité des systèmes physiologiques, intervenant notamment dans la régulation de la fonction cardiovasculaire (McEwen and Seeman 1999). Le cortisol pourrait ainsi se positionner comme un facteur intermédiaire dans la relation entre l'exposition au bruit des transports et la survenue de pathologies cardiovasculaires. Cependant, les effets d'une exposition prolongée au bruit des transports sur la sécrétion de cortisol ne sont pas clairs (Babisch 2003).

À l'issue de la passation du questionnaire, l'enquêteur expliquait au participant comment utiliser un kit de prélèvement de salive (salivette® Sarstedt - version neutre pour recueil et analyse de la salive, Figure 3) pour que ce dernier prélève deux fois sa salive : une fois le matin, immédiatement après le lever (moment où la concentration de cortisol salivaire est généralement la plus élevée) et une seconde fois le soir, juste avant le coucher (moment où la concentration de cortisol salivaire est généralement à son niveau le plus bas). L'enquêteur revenait au domicile du participant pour récupérer ces deux prélèvements et les envoyer au Laboratoire de biochimie du Centre de biologie sud situé sur le groupement hospitalier Lyon-Sud qui les analysait grâce à une technique immuno-enzymatique Elisa (Enzyme Linked ImmunoSorbent Assay, IBL international, Hamburg, Allemagne), afin de déterminer la concentration de cortisol.

La variation absolue de cortisol est définie comme la différence absolue entre les niveaux au lever et au coucher. La variation absolue horaire de cortisol est ensuite obtenue en divisant la variation absolue de cortisol par le nombre d'heures écoulées entre les deux prélèvements de salive.

Figure 3. Salivette



Hypertension artérielle (HTA)

Au cours de l'entretien, l'enquêteur a réalisé trois mesures de la pression artérielle et de la fréquence cardiaque du participant en suivant un protocole bien défini, inspiré de l'étude européenne Hyena (Jarup et al. 2008). Deux mesures ont été prises à une minute d'intervalle au début du questionnaire et une dernière mesure, environ une heure plus tard, en fin de questionnaire, le résultat principal s'appuyant ensuite sur la moyenne des deux premières mesures (Figure 4). La troisième mesure est utilisée comme contrôle de validité : dans les analyses de sensibilité, la moyenne des deux dernières mesures est utilisée à la place de la moyenne des deux premières : les résultats restent inchangés. L'enquêteur a également procédé à la mesure du poids, de la taille et du tour de ceinture des participants.

Figure 4. Mesure de la pression artérielle et de la fréquence cardiaque

Un individu est classé comme hypertendu si la moyenne des deux premières mesures de sa pression artérielle systolique (PAS) est supérieure à 140 mm Hg, ou si la moyenne des deux premières mesures de sa pression artérielle diastolique (PAD) est supérieure à 90 mm Hg (définition de l'HTA par l'Organisation mondiale de la santé - OMS), ou s'il déclare dans le questionnaire qu'un médecin lui a diagnostiqué une HTA au cours des douze derniers mois en conjonction avec la prise d'un médicament à action anti-hypertensive.

Exposition au bruit des avions

Les niveaux de bruit des avions sont estimés avec une résolution de 1 dB(A) à partir des cartes de bruit (Cf. 2.1, Figure 1). L'exposition au bruit des avions au domicile de chaque participant est ensuite évaluée en reliant ces niveaux de bruit aux adresses des participants grâce à un système d'information géographique (SIG).

Pour les analyses statistiques, quatre indicateurs acoustiques sont utilisés : le L_{den} (indicateur correspondant au niveau de bruit moyen pondéré sur une journée entière de 24 heures), le L_{Aeq24h} (indicateur correspondant au niveau de bruit moyen non pondéré sur une journée entière de 24 heures), le $L_{Aeq6h\text{-}22h}$ (indicateur correspondant au niveau de bruit moyen sur la période de jour 6h-22h) et le L_{night} (indicateur correspondant au niveau de bruit moyen pendant la nuit de 22h à 6h).

Les résultats présentés ici concernent le L_{den} pour l'état de santé perçu, la gêne due au bruit des avions et le niveau de stress (évalué à partir de la sécrétion de cortisol). Ils le sont pour le L_{night} pour les perturbations du sommeil et l'hypertension.

Facteurs de confusion

Les facteurs de confusion potentiels sont inclus dans les modèles multivariés finaux. Ils peuvent varier d'une analyse à l'autre, en fonction de leur association avec les événements de santé en analyse univariée. Ainsi :

- pour l'analyse de l'état de santé perçu, sont retenus : l'âge, le pays de naissance, la consommation de tabac, le nombre de personnes habitant dans le logement et le revenu ;
- pour l'analyse de la détresse psychologique : le sexe, l'âge, le pays de naissance, le niveau d'éducation, l'exercice d'une activité professionnelle, le statut marital, la consommation de tabac et d'alcool, les événements importants de la vie, le revenu, la durée moyenne de sommeil par nuit, la consommation d'antidépresseurs, une anxiété déclarée, une dépression déclarée et la sensibilité au bruit ;
- pour l'analyse du sommeil : le sexe, l'âge, le niveau d'éducation, le statut matrimonial, l'indice de masse corporelle (IMC), la consommation de tabac et d'alcool, la pratique d'une activité physique, l'état de santé perçu, une anxiété déclarée ;
- pour l'analyse du niveau de stress (évalué à partir de la sécrétion de cortisol) : l'âge, le sexe, l'IMC, la pratique régulière d'une activité physique, la consommation de tabac et d'alcool, le revenu, le jour des prélèvements, l'état psychique, la gêne due au bruit des avions et la durée moyenne de sommeil par nuit ; les modèles de régression portant sur les valeurs de cortisol au lever et au coucher sont également ajustés sur les heures de prélèvement afin de tenir compte de la forte variabilité du cortisol au cours de la journée ;
- pour l'analyse de l'hypertension : l'âge, l'IMC, la pratique régulière d'une activité physique, l'exercice d'une activité professionnelle et la consommation d'alcool.

2.2.2.3. Méthodologie d'analyse statistique

Des modèles de régression logistique sont utilisés pour évaluer les associations entre l'exposition au bruit des avions d'une part, la dégradation de l'état de santé perçu, les troubles psychologiques, la gêne due au bruit des avions, les perturbations du sommeil et le risque d'hypertension, d'autre part. Des modèles de régression linéaire, avec le logarithme de la variation absolue horaire du cortisol ou des niveaux de cortisol le matin et le soir comme variables à expliquer, sont appliqués pour évaluer l'association entre l'exposition au bruit des avions et le niveau de stress. Des modèles de régression linéaire sont également retenus pour estimer l'association entre cette exposition et les niveaux de la pression artérielle, systolique et diastolique.

Les analyses portant sur le risque d'hypertension et sur la dégradation de l'état de santé perçu sont réalisées séparément pour les hommes et les femmes. En effet, les rares études séparant les hommes et les femmes trouvent des associations entre l'exposition au bruit et le risque d'hypertension chez les hommes mais pas chez les femmes (Eriksson et al. 2010; Jarup et al. 2008). Par ailleurs, en France, les femmes ont tendance à juger leur santé plus sévèrement que les hommes (Goldberg et al. 2001; Montaut 2010). Concernant les autres effets étudiés sur la santé, comme il n'existe pas d'hypothèse a priori sur une différence entre les hommes et les femmes, les analyses sont réalisées sur l'échantillon total, hommes et femmes regroupés (le sexe est alors introduit dans les modèles comme facteur de confusion potentiel).

L'ensemble des analyses est réalisé avec le logiciel SAS 9.3 et 9.4.

2.2.3. Étude clinique « sommeil »

2.2.3.1. Population d'étude

À la fin de l'entretien mené dans le cadre de l'étude individuelle longitudinale, l'enquêteur demandait uniquement aux riverains de l'aéroport Paris-Charles-de-Gaulle s'ils acceptaient de participer à l'étude clinique « sommeil ». Le choix initial a été fait de limiter cette étude « sommeil » à l'aéroport Paris-Charles-de-Gaulle, car il s'agit du seul aéroport parmi les trois qui présente une proportion suffisamment importante de la population exposée à des niveaux de bruit d'avion supérieurs à 60 dB(A) en L_{den}.

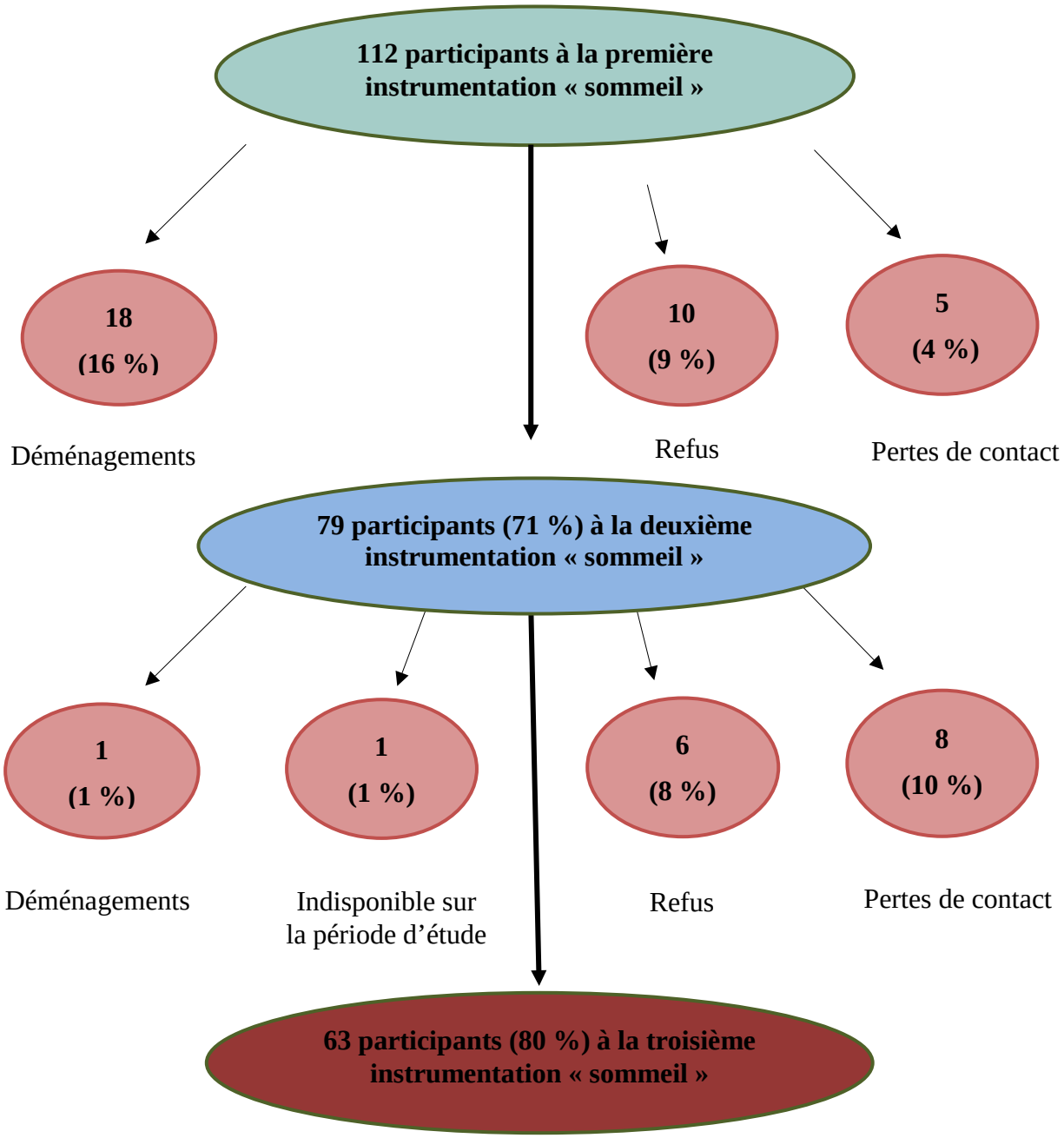
Sont exclues les personnes qui déclarent elles-mêmes ronfler ou partager leur chambre à coucher avec un ronfleur, ainsi que les personnes habitant dans un logement situé en rez-de-chaussée et donnant sur la voie publique. En effet, il est très difficile de déterminer l'impact acoustique des survols d'aéronefs dans la chambre à coucher des participants qui ronflent ou qui partagent leur chambre à coucher avec un ronfleur. Par ailleurs, Bruitparif ne pouvait pas installer un appareil de mesure acoustique sur la façade de la chambre à coucher des participants si ces derniers habitaient dans un logement situé en rez-de-chaussée et donnant sur la voie publique. Comme seulement 91 participants, riverains de Paris-Charles-de-Gaulle ont accepté de participer à l'étude clinique « sommeil » et remplissaient ces critères, il a été proposé à une quarantaine de riverains de Toulouse-Blagnac de participer. Au total, 21 d'entre eux remplissaient ces critères et ont accepté de participer à l'étude clinique « sommeil ».

Une indemnisation financière d'un montant de 150 euros a été versée à la fin de chacune des trois instrumentations de l'étude « sommeil » aux participants. Cet argument n'a pas été utilisé pour convaincre les personnes de participer afin de ne pas introduire de biais de sélection lié à cette incitation.

Finalement, 112 personnes ont donc accepté de participer à la première instrumentation de l'étude « sommeil ». Parmi elles, 79 (71 %) ont à nouveau participé à la deuxième instrumentation deux ans plus tard, 18 (16 %) n'ont pas pu participer en raison d'un déménagement en dehors de la zone d'étude, 10 (9 %) n'ont pas souhaité renouveler leur participation et 5 (4 %) ont été perdues de vue (adresses et/ou téléphones non valides) (Figure 5).

Sur les 79 participants à la deuxième instrumentation, 63 (80 %) ont à nouveau participé à la troisième et dernière instrumentation, une personne (1 %) n'a pas pu participer dans l'étude en raison d'un déménagement en dehors de la zone d'étude, une autre (1 %) n'était pas disponible pendant la période de l'instrumentation, 6 (8 %) n'ont pas souhaité renouveler leur participation et 8 (10 %) ont été perdues de vue (adresses et/ou téléphones non valides) (Figure 5).

Figure 5. Participation aux trois instrumentations de l'étude sommeil



Le profil démographique et socioéconomique des participants aux trois instrumentations de l'étude « sommeil » reste relativement similaire en termes de statut marital et de catégorie socioprofessionnelle (Tableau 2). En revanche au cours des instrumentations, la proportion de femmes augmente (respectivement 58, 62 et 66 %), de même celle de participants âgés de 65 et plus (respectivement 15, 23 et 26 %), au détriment des participants de moins de 35 ans (respectivement 29, 14 et 11 %). La proportion de participants retraités est par conséquent un peu plus élevée au cours des instrumentations (respectivement 21, 24 et 28 %). La proportion de participants célibataires connaît une légère diminution au cours des instrumentations (respectivement 35, 34 et 30 %) au profit des participants vivant maritalement (respectivement 47, 45 et 56 %).

Tableau 2. Profils des participants à chacune des trois instrumentations de l'étude sommeil

	Participants à la 1ère instrumentation (112)	Participants à la 2ème instrumentation (79)	Participants à la 3ème instrumentation (63)
Sexe			
Masculin	42 %	38 %	34 %
Féminin	58 %	62 %	66 %
Age			
18-25 ans	12 %	5 %	3 %
26-34 ans	17 %	9 %	8 %
35-44 ans	17 %	20 %	23 %
45-54 ans	24 %	31 %	23 %
55-64 ans	15 %	11 %	16 %
65-74 ans	8 %	11 %	15 %
75 ans et plus	7 %	12 %	11 %
Statut marital			
Célibataire	35 %	34 %	30 %
Marié(e)/Vivant maritalement	47 %	45 %	56 %
Veuf/Veuve	4 %	5 %	3 %
Divorcé(e)/Séparé(e)	14 %	16 %	11 %
Catégorie socioprofessionnelle			
Agriculteurs exploitants	0 %	0 %	0 %
Artisans, commerçants, chefs d'entreprise	3 %	3 %	2 %
Cadres et professions intellectuelles sup	15 %	18 %	18 %
Professions intermédiaires	17 %	18 %	13 %
Employés	28 %	24 %	30 %
Ouvriers	10 %	9 %	8 %
Retraités	21 %	24 %	28 %
Inactifs	6 %	4 %	2 %

2.2.3.2. Recueil de l'information et construction des variables

En complément des données recueillies dans le cadre de l'étude individuelle longitudinale, trois types de mesures objectives ont été réalisées au domicile des participants ayant accepté de participer à l'étude « sommeil » :

- des mesures acoustiques à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre à coucher (pendant sept jours consécutifs) ;
- des mesures actimétriques pendant les sept nuits de cette même semaine, et des enregistrements du rythme cardiaque pendant une nuit ;
- une mesure acoustique d'exposition individuelle en continu sur une durée de 24 heures, un jour ouvrable.

Mesures acoustiques à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre à coucher

Afin de disposer de données précises quant à l'impact acoustique des survols d'aéronefs dans la chambre à coucher des participants, un dispositif de mesure constitué de deux sonomètres (Figure 6) a été mis en œuvre sur une durée d'une semaine complète au domicile de chaque participant par Bruitparif. Il était nécessaire de réaliser la mesure sur une période de sept jours afin d'augmenter la probabilité de disposer de mesures de bruit pour les différents régimes d'activité des plateformes aéroportuaires (configurations de vol face à l'est ou face à l'ouest par exemple).

Figure 6 : Sonomètre

Source Bruitparif

Il était nécessaire de disposer de deux sonomètres (l'un pour la mesure intérieure, l'autre pour la mesure extérieure) afin de pouvoir déterminer de manière fiable la contribution des survols d'aéronefs dans le bruit mesuré à l'intérieur de la chambre à coucher. En effet, l'évaluation de la contribution du bruit des aéronefs au bruit global mesuré nécessitait d'identifier l'origine des nuisances. Pour cela, il était indispensable, dans un premier temps, d'identifier les événements acoustiques associés aux survols aériens, puis dans un second temps d'estimer l'impact de ces événements sur l'environnement sonore à l'intérieur de la chambre du participant. La détection des événements acoustiques associés au bruit aérien était assurée par une mesure de bruit à l'aide d'un sonomètre situé en façade à l'extérieur de la chambre à coucher. Un autre sonomètre était dédié à la mesure de l'environnement sonore à l'intérieur de la chambre (Figure 7).

Figure 7 : Sonomètre situé en façade à l'extérieur de la chambre à coucher et sonomètre situé à l'intérieur de la chambre

Source Bruitparif

La comparaison des deux mesures réalisées à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment a permis de séparer, sur les mesures réalisées à l'intérieur des logements, les bruits provenant de l'extérieur (aéronefs, trafic routier, ferroviaire, bruit de la ville, etc.), des bruits provenant de l'intérieur (ronflements, réveils, animaux domestiques, etc.), puis de déterminer la contribution propre du bruit lié au trafic aérien dans la mesure réalisée à l'intérieur. Cette séparation a été opérée lorsque les mesures ont été effectuées fenêtres fermées. Dans le cas où le participant laissait les fenêtres ouvertes, les bruits d'aéronefs ont pu être facilement détectés et isolés via une analyse automatique des signaux temporels et à leur corrélation avec les traces radar fournies par la DGAC. L'ensemble des données de mesure et des événements détectés automatiquement a, en outre, été vérifié manuellement par Bruitparif afin d'exclure les périodes atypiques et significativement perturbées.

La méthode d'identification du bruit d'origine aéronefs à l'intérieur de la chambre à coucher a été mise au point et validée dans le cadre d'une étude préalable réalisée en 2010. Cette méthode repose sur quatre étapes :

1. Détermination des événements acoustiques associés aux survols d'aéronefs, sur le signal mesuré à l'extérieur, en façade du bâtiment : cette détermination est faite sur la base de la correspondance entre trajectoires radar et émergences acoustiques observées. Les données de trajectographie des aéronefs ont été mises à disposition de Bruitparif par la DGAC sur le secteur géographique étudié et sur la totalité de la durée des mesures.
2. Détermination sur le signal mesuré à l'intérieur des périodes influencées par le bruit des aéronefs, par corrélation temporelle avec les événements acoustiques identifiés comme aéronefs sur le signal mesuré à l'extérieur.
3. Estimation d'une fonction de tranfert extérieur / intérieur. Cette fonction permet d'estimer le signal sonore, dû exclusivement au bruit extérieur dans la chambre à coucher. Elle a été déterminée à partir de l'analyse croisée des mesures intérieures et extérieures, sur la base d'indicateurs statistiques.
4. Analyse statistique des évolutions temporelles simultanées des niveaux sonores à l'extérieur et à l'intérieur et filtrage des événements acoustiques d'origine intérieure qui sont intervenus pendant le passage d'un avion. 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'aéronefs (niveaux L_{Amax}, NA_{62}…). 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) avec le signal mesuré à l'intérieur. Une différence significative entre les deux signaux correspond à la présence d'un bruit intérieur provenant d'une autre source.

Sur la base des données brutes collectées ($L_{Aeq,1s}$ et $L_{eq,1s}$ par bandes de tiers d'octaves) pour les mesures à l'intérieur et à l'extérieur, Bruitparif s'est chargé de traiter les données afin de produire un certain nombre d'indicateurs acoustiques, notamment sur la période de sommeil, c'est-à-dire sur la période allant de l'endormissement au réveil (informations fournies par le Centre du sommeil et de la vigilance de l'Hôtel Dieu de Paris[22] à l'issue des mesures actimétriques et de l'analyse d'agendas du sommeil renseignés quotidiennement par les participants). On distingue les indicateurs énergétiques (relatifs à des moyennes énergétiques de bruit sur des périodes données) et les indicateurs événementiels (caractéristiques et nombre d'événements ayant dépassé un niveau sonore donné). Les principaux indicateurs acoustiques produits sont les suivants :

- L_{Aeq} (ext) : niveau de pression acoustique continu équivalent (toutes sources confondues) en façade, à l'extérieur de la chambre à coucher ;
- L_{Aeq} (aero) ext : niveau de pression acoustique continu équivalent (exclusivement dû aux aéronefs) en façade, à l'extérieur de la chambre à coucher ;
- L_{A90} (ext) : niveau de bruit atteint ou dépassé pendant 90 % du temps, en façade, à l'extérieur de la chambre à coucher ;
- L_{Aeq} (int) : niveau de pression acoustique continu équivalent (toutes sources confondues) à l'intérieur de la chambre à coucher ;
- $L_{Aeq\ aero}$ (int) : niveau de pression acoustique continu équivalent (exclusivement dû aux aéronefs) à l'intérieur de la chambre à coucher ;
- L_{A90} (int) : niveau de bruit atteint ou dépassé pendant 90 % du temps, à l'intérieur de la chambre à coucher ;
- N aero (ext) : nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs en façade, à l'extérieur de la chambre à coucher ;
- NA_{62} aero (ext) : nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 62 dB(A) en $L_{Amax,1s}$ en façade, à l'extérieur de la chambre à coucher ;
- NA_{65} aero (ext) : nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 65 dB(A) en $L_{Amax,1s}$ en façade, à l'extérieur de la chambre à coucher ;
- NA_{70} aero (ext) : nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 70 dB(A) en $L_{Amax,1s}$ en façade, à l'extérieur de la chambre à coucher ;
- N aero (int) : nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs à l'intérieur de la chambre à coucher ;
- NA_{30} à NA_{45} aero (int) : nombre d'événements sonores attribué aux survols des aéronefs dépassant 30, 31, … 45 dB(A) en $L_{Amax,1s}$ à l'intérieur de la chambre à coucher ;
- date de début d'un événement acoustique associé à un bruit d'aéronef en façade, à l'extérieur de la chambre à coucher ;
- date de fin d'un événement acoustique associé à un bruit d'aéronef en façade, à l'extérieur de la chambre à coucher ;
- durée d'un événement acoustique associé à un bruit d'aéronef en façade, à l'extérieur de la chambre à coucher ;
- date associée au $L_{Amax,1s}$ en façade, à l'extérieur de la chambre à coucher ;

[22] Université de Paris, Équipe 7330 VIFASOM (Vigilance fatigue sommeil et santé publique) et APHP.

- $L_{Amax,1s}$ en façade, à l'extérieur de la chambre à coucher ;
- SEL : niveau d'exposition sonore de l'ensemble des événements acoustiques associés aux aéronefs et correspondant à leur moyenne sonore énergétique ramenée sur une seconde, en façade, à l'extérieur de la chambre à coucher ;
- niveau du bruit de fond dans les 10 minutes précédant l'événement acoustique associé à un bruit d'aéronef en façade, à l'extérieur de la chambre à coucher ;
- date de début d'un événement acoustique associé à un bruit d'aéronef à l'intérieur de la chambre à coucher ;
- date de fin d'un événement acoustique associé à un bruit d'aéronef à l'intérieur de la chambre à coucher ;
- durée d'un événement acoustique associé à un bruit d'aéronef à l'intérieur de la chambre à coucher ;
- date associée au $L_{Amax,1s}$ à l'intérieur de la chambre à coucher ;
- $L_{Amax,1s}$ à l'intérieur de la chambre à coucher ;
- SEL : niveau d'exposition sonore de l'ensemble des événements acoustiques associés aux aéronefs et correspondant à leur moyenne sonore énergétique ramenée sur une seconde, à l'intérieur de la chambre à coucher ;
- niveau du bruit de fond dans les 10 minutes précédant l'événement acoustique associé à un bruit d'aéronef à l'intérieur de la chambre à coucher.

Mesure d'exposition individuelle

Afin de déterminer l'exposition moyenne au bruit du participant lorsqu'il n'est pas dans sa chambre à coucher, celui-ci devait porter un dosimètre de bruit sur une durée de 24 heures correspondant à une journée ouvrable qu'il devait choisir pour être la plus représentative de son activité habituelle.

Les dosimètres utilisés étaient des dosimètres WED de marque 01dB (Figure 8). Ils sont de classe métrologique 2. Le dosimètre permet l'acquisition et le stockage du niveau de bruit équivalent pondéré A au pas d'une seconde ($L_{Aeq,1s}$) reçu par le participant. Les données stockées permettent de retracer le profil temporel moyen de l'exposition sonore de chaque participant tout au long de sa journée. Elles permettent d'évaluer son exposition moyenne, les périodes « de pointe » au cours desquelles le niveau est le maximum au cours de la journée et au contraire les périodes les plus calmes.

Figure 8 : Dosimètre

Source Bruitparif

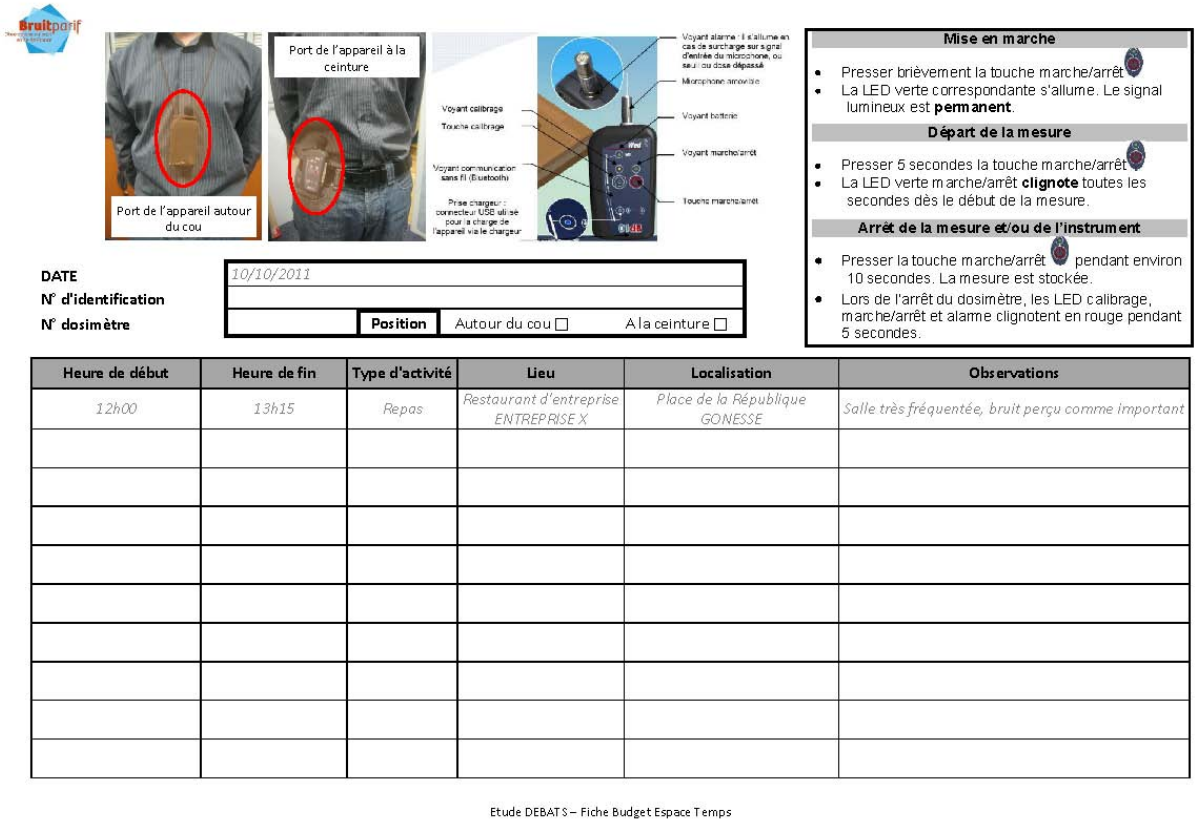
Le dosimètre était porté à la ceinture durant la journée et devait être posé sur la table de chevet, durant la nuit. Le protocole n'avait pas pour objectif de respecter les recommandations de la norme NF S 31-084 relative aux méthodes de mesurage des niveaux d'exposition au bruit en milieu de travail, seul document proposant un protocole de mesure sur une problématique proche.

En parallèle du port du dosimètre, le participant devait remplir une fiche de budget espace-temps (Figure 9) fournie par Bruitparif, permettant de retracer les types de lieux fréquentés et d'activités menées au cours de la journée.

Bruitparif remettait le dosimètre et son mode d'emploi ainsi que la fiche de budget espace-temps à chaque participant lors de l'installation des sonomètres. Le dosimètre a fait préalablement l'objet d'un test en laboratoire et d'un calibrage. Bruitparif le récupérait lorsqu'il venait désinstaller le matériel. À noter que les dosimètres ne sont pas capables de mesurer des niveaux de bruit inférieurs à 40 dB(A). Il fallait donc s'attendre à avoir des manques de données la nuit. Les niveaux de bruit la nuit ont donc été évalués par les mesures effectuées à l'aide du sonomètre.

Bruitparif a remis à l'Umrestte les données brutes collectées par le dosimètre (L_{Aeq},1s) pour chaque participant ainsi que son profil d'exposition sonore au cours de la journée (en identifiant les phases principales à partir sa fiche budget espace-temps). Les niveaux moyens (L_{Aeq} période) ont été calculés pour chaque heure de la journée, ainsi que pour chacune des grandes périodes : 6-18h, 18-22h, 22-6h.

Figure 9 : Fiche budget espace-temps



Évaluation objective du sommeil à partir des enregistrements actimétriques

Parallèlement aux mesures acoustiques réalisées dans leur chambre à coucher pendant une semaine, il a été demandé aux participants de porter, pendant les sept nuits correspondantes un actimètre, et de remplir un agenda du sommeil. L'actimétrie permet la détermination objective des paramètres horaires du sommeil : début, fin, durée, et l'évaluation de l'activité motrice au cours du sommeil. Cette méthode, couplée avec l'analyse de l'agenda du sommeil, permet donc d'identifier objectivement la quantité et la qualité du sommeil des participants.

L'actimètre (Figure 10) se présente sous la forme d'une petite montre que l'on porte au poignet non dominant, sans fil et sans connecteur. Il enregistre le rythme activité-repos qui est superposable au rythme veille-sommeil. Il se compose d'un capteur qui permet de détecter les accélérations liées aux mouvements. En effet, un quartz piézo-électrique mesure les accélérations du poignet qui génèrent une tension variable lors de chaque mouvement de la personne. Les accélérations, supérieures à un seuil donné, sont comptées et stockées sur un intervalle de temps d'une minute. Une interface avec un ordinateur permet de paramétrer l'enregistreur, de relire et d'analyser les données.

Les données ont été stockées, puis lues manuellement, par un chercheur du Centre du sommeil et de la vigilance de l'Hôtel Dieu de Paris[23] conjointement à l'analyse de l'agenda du sommeil que les participants devaient compléter chaque matin et qui permet l'appréciation qualitative du participant sur son sommeil, nuit après nuit, ainsi que sur les événements et médicaments qui auraient pu l'influencer (Figure 11). La classification en périodes d'activité ou de sommeil dépend du niveau de sensibilité de l'algorithme. En utilisant la sensibilité dite « medium » de l'actimètre avec un comptage par minute, un total de 40 mouvements est suffisant pour désigner l'époque par l'état « éveillé ».

Figure 10 : Actimètre

Source Sleeptech

Les mesures actimétriques ont permis d'évaluer objectivement les paramètres du sommeil suivants :

- le temps passé au lit : temps passé entre l'extinction des lampes et le lever final ;
- le temps de sommeil total (TST) : temps passé entre l'endormissement et le dernier réveil, durée totale des éveils intra-sommeil déduite (un TST inférieur à six heures est considéré comme un sommeil trop court) ;
- la latence d'endormissement (LE) : temps entre l'extinction des lampes et l'endormissement (une LE supérieure à trente minutes est un signe d'insomnie d'endormissement) ;

[23] Université de Paris, Équipe 7330 VIFASOM (Vigilance fatigue sommeil et santé publique) et APHP.

- le temps d'éveil intra-sommeil (TEIS) : somme des différents temps d'éveil au cours de la nuit (un TEIS supérieur à trente minutes est un signe d'insomnie de maintien du sommeil) ;
- l'efficacité du sommeil : rapport entre le temps de sommeil total (TST) et le temps passé au lit ;
- l'index de fragmentation : rapport entre le nombre de phases de mouvements et le nombre de phases d'immobilité par unité de temps ; cet index représente une valeur prédictive de la dégradation d'une nuit de sommeil due par exemple à des nuisances sonores.

Figure 11: Agenda du sommeil

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

N° D'IDENTIFICATION DEBATS |__|__|__|__|__| N° ACTIMÈTRE ..... SEXE ..... ÂGE .....

	Jour 1	*Jour 2*	*Jour 3*	*Jour 4*	*Jour 5*	*Jour 6*	*Jour 7*
Jour de la semaine							
Date							
Hier, 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'hier.							
Des évènements particuliers (activité physique, voyage, réunion, stress...) sont-ils survenus hier pendant la journée ? Si oui, veuillez les indiquer.							
Hier, avez-vous pris des médicaments pour dormir ? Si oui, veuillez indiquer le nom, la quantité et l'heure.							
Hier, à quelle heure vous êtes-vous couché(e) ?	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Hier, à quelle heure avez-vous éteint la lumière pour dormir ?	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Hier, 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.							

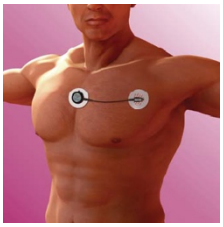
Enregistrements du rythme cardiaque

Pendant une nuit, les participants ont également porté un enregistreur du rythme cardiaque appelé actiheart. Pour des raisons d'autonomie de l'actiheart, la nuit en question était la première ou la seconde suivant la visite de Bruitparif : le jour de l'installation du matériel a été choisi de telle sorte que la plateforme aéroportuaire soit dans une configuration de vol (face à l'est ou face à l'ouest) garantissant une exposition « suffisante » du participant au bruit des avions.

L'actiheart (Figure 12) est un appareil qui se fixe à l'aide de deux électrodes placées de part et d'autre du cœur. Il permet d'enregistrer la fréquence cardiaque et ses variations. Une interface reliée à un ordinateur permet de configurer l'actiheart et de récupérer les données enregistrées qui sont ensuite analysées grâce à un logiciel par un chercheur du Centre du sommeil et de la

vigilance de l'Hôtel Dieu de Paris[24]. Un algorithme a été utilisé pour déterminer et comptabiliser les éveils à partir des enregistrements du rythme cardiaque (Basner et al. 2007).

Figure 12 : Enregistreur du rythme cardiaque



2.2.3.3. Méthodologie d'analyse statistique

Des modèles de régression logistique ainsi que des modèles de régression linéaire prenant en compte le fait qu'il y ait plusieurs nuits de mesures pour un même individu sont mis en œuvre pour évaluer les effets de l'exposition au bruit des avions sur les paramètres objectifs du sommeil mesurés par l'actimètre. Les modèles sont réalisés séparément pour chaque indicateur acoustique. Les facteurs de risque connus dans la littérature pour avoir une influence sur le sommeil, tels que le sexe, l'âge, le statut marital, le niveau d'études et l'IMC, sont inclus dans les analyses multivariées.

Pour étudier les changements de la fréquence cardiaque pendant le sommeil, l'amplitude de la fréquence cardiaque pendant un événement acoustique impliquant le bruit des avions est calculée comme la différence entre la fréquence cardiaque maximale et minimale lors d'un événement acoustique, en battements par minute. Des modèles linéaires mixtes sont utilisés afin d'évaluer les effets des événements liés au bruit des avions, caractérisés par le $L_{Amax,1s}$, sur l'amplitude de la fréquence cardiaque pendant le sommeil. Ces modèles multivariés sont ajustés sur les facteurs de risque connus dans la littérature pour avoir une influence sur la fréquence cardiaque, tels que le sexe, l'âge, l'IMC, la pratique d'exercice physique, la consommation de tabac et d'alcool, la présence de problèmes cardiovasculaires ou d'hypertension, le temps écoulé depuis le début du sommeil, et le niveau du bruit de fond dix minutes avant le début de l'événement acoustique.

L'ensemble des analyses est réalisé avec le logiciel SAS 9.4.

[24] Université de Paris, Équipe 7330 VIFASOM (Vigilance fatigue sommeil et santé publique) et APHP.

3. Résultats

3.1. Étude écologique

Question (Q) : L'exposition au bruit des avions augmente-t-elle la mortalité par maladie cardiovasculaire dans les communes riveraines des aéroports en France ?

Réponse (R) : Une augmentation de l'exposition au bruit des avions de 10 dB(A) est associée à un risque de mortalité plus élevé :

- par maladie cardiovasculaire, en général : +18 % ;
- par maladie cardiaque ischémique, en particulier : +24 % ;
- et par infarctus du myocarde, notamment : +28 % ;

Il n'est pas mis en évidence d'association avec la mortalité par accident vasculaire cérébral.

Cela signifie que la mortalité par maladie cardiovasculaire, en particulier par maladie cardiaque ischémique, notamment par infarctus du myocarde, est plus élevée dans les communes les plus exposées au bruit des avions.

Ces associations ne sont pas atténuées lorsque la pollution de l'air est prise en compte.

Ces résultats ont fait l'objet de deux articles :

- Evrard AS, Bouaoun L, Champelovier P, Lambert J, Laumon B.
  Does exposure to aircraft noise increase the mortality from cardiovascular disease in the population living in the vicinity of airports? Results of an ecological study in France. *Noise Health* 2015; 17: 328-36.
- Evrard AS, Bouaoun L, Champelovier P, Lambert J, Laumon B.
  L'exposition au bruit des avions augmente-t-elle la mortalité par maladie cardiovasculaire dans les communes riveraines des aéroports en France ? *Environnement, Risques et Santé* 2016; 15: 506-514.

3.2. Étude individuelle longitudinale

Seuls les résultats des analyses menées à partir des données recueillies à l'inclusion en 2013 sont présentés dans le présent rapport. En effet, les résultats complémentaires issus des analyses longitudinales de l'ensemble des données recueillies au cours des trois suivis en 2013, 2015 et 2017 sont en cours de publication dans des revues internationales à comité de lecture. Ils sont pour l'instant confidentiels et ne pourront être rendus publics qu'après publication dans ces revues, étant alors validés par nos pairs.

Il peut toutefois être indiqué dès maintenant que tous les résultats issus des analyses longitudinales de l'ensemble des données, recueillies au cours des trois suivis en 2013, 2015 et 2017, confirment, pour le moins, ceux présentés ici. Ces derniers ont fait l'objet d'un article :

- Evrard AS, Lefèvre M, Baudin C, Carlier MC, Champelovier P, Giorgis-Allemand L, Lambert J, Léger D, Nassur AM, Laumon B, Bruitparif.
  Effets de l'exposition au bruit des avions sur la santé : résultats, à l'inclusion, de l'étude DEBATS.
  Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire 2020 (in Press).

3.2.1. Bruit des avions et état de santé perçu

Q : L'exposition au bruit des avions est-elle associée à une dégradation de l'état de santé perçu par les riverains des aéroports français ?

R : Près de 15 % des participants considèrent que leur état de santé général est médiocre ou mauvais (16 % des femmes et 15 % des hommes).

Une augmentation du niveau d'exposition au bruit des avions de 10 dB(A) est associée à un risque de dégradation de l'état de santé perçu 1,55 fois plus élevé chez les hommes (ie risque augmenté de 55 %).

Cette association est plus élevée chez les hommes très sensibles au bruit, avec un risque de dégradation de l'état de santé perçu 3,3 fois plus élevé lorsque le niveau d'exposition au bruit des avions augmente de 10 dB(A).

Aucune association n'est mise en évidence chez les femmes.

Ces résultats ont fait l'objet d'un article :

- Baudin C, Lefèvre M, Champelovier P, Lambert J, Laumon B, Evrard AS.
  Self-rated health status in relation to aircraft noise exposure, noise annoyance or noise sensitivity: the results of a cross-sectional study in France.
  BMC Public Health : soumis le 29 juin 2020, réponses aux commentaires des reviewers envoyées le 22 octobre 2020.

3.2.2. Bruit des avions et troubles psychologiques

Q : L'exposition au bruit des avions est-elle associée à une augmentation des troubles psychologiques chez les riverains des aéroports français ?

R : Près de 22 % des participants sont considérés comme souffrant de détresse psychologique (25 % des femmes et 17 % des hommes).

Aucune association n'est trouvée entre l'exposition au bruit des avions et la détresse psychologique.

Cependant, la gêne due au bruit des avions et la sensibilité au bruit sont toutes les deux associées positivement à la détresse psychologique. Un gradient est même mis en évidence entre la gêne et la détresse psychologique : le risque de détresse psychologique est 1,8 fois plus élevé (ie augmenté de 80 %) chez les participants légèrement gênés par le bruit des avions, par rapport à ceux qui ne sont pas du tout gênés ; il est multiplié par 4 chez ceux qui déclarent être fortement gênés, par rapport à ceux qui ne sont pas du tout gênés.

Ces résultats ont fait l'objet d'un article :

- Baudin C, Lefèvre M, Champelovier P, Lambert J, Laumon B, Evrard AS.
  Aircraft noise exposure and psychological ill-health: the results of a cross-sectional study in France.
  International Journal of Environmental Research and Public Health 2018, 15(8), 1642.

3.2.3. Bruit des avions et gêne

Q : L'exposition au bruit des avions est-elle associée à une augmentation de la gêne due au bruit des avions chez les riverains des aéroports français ?

R : Près de 18 % des participants déclarent être fortement gênés par le bruit des avions.

La gêne est plus importante dans Debats que ce que prévoit l'ancienne courbe de référence de l'Union Européenne (appelée courbe de Miedema) (Miedema and Oudshoorn 2001), mais plus faible que ce que prévoit la nouvelle courbe de l'Union Européenne fournie par l'OMS en mars 2020 (Guski et al. 2017). Par exemple, à 60 dB(A), l'ancienne courbe de l'Union Européenne prévoit 17 % de personnes fortement gênées par le bruit des avions, alors que les courbes basées sur Debats en prévoient entre 22 et 27 % et la nouvelle courbe de l'Union Européenne 36 %.

Une gêne importante due au bruit des avions est associée, non seulement à l'augmentation des niveaux de bruit des avions, mais aussi à des facteurs non acoustiques tels que :

- l'âge : plus les participants sont âgés, plus ils sont fortement gênés par le bruit des avions ;
- la satisfaction du cadre de vie : plus les participants sont satisfaits de leur cadre de vie, moins ils déclarent être fortement gênés par le bruit des avions ;
- les attentes concernant la qualité de vie dans le voisinage : les personnes qui sont pessimistes quant à l'évolution de la pollution atmosphérique et du bruit dans l'avenir dans leur quartier, et qui sont également extrêmement gênées par la pollution de l'air, sont beaucoup plus susceptibles de rapporter une gêne importante due au bruit des avions, que ceux qui sont optimistes quant à la pollution de l'air et les évolutions du bruit ;
- la sensibilité au bruit : les participants qui déclarent être beaucoup plus sensibles au bruit que les autres sont plus enclins à déclarer une gêne importante due au bruit des avions ;
- la peur d'un accident d'avion : les personnes qui ont peur ou très peur d'un accident d'avion déclarent plus souvent être fortement gênées que les personnes qui n'en ont pas peur ;
- et les attitudes liées à la source et à l'autorité : les personnes qui participent moins aux actions de protestation contre le bruit des avions déclarent être moins gênées que celles qui y participent.

Ces résultats ont fait l'objet d'un article :

- Lefèvre M, Chaumond A, Champelovier P, Giorgis-Allemand L, Lambert J, Laumon B, Evrard AS.
  Understanding the relationship between air traffic noise exposure and annoyance in populations living near airports in France.
  Environment International 2020;144.

3.2.4. Bruit des avions et évaluation subjective du sommeil

Q : L'exposition au bruit des avions est-elle associée à une dégradation de la quantité et de la qualité du sommeil mesurées de façon subjective chez les riverains des aéroports français ?

R : Deux paramètres de dégradation du sommeil sont associés au bruit des avions :

- Une durée de sommeil inférieure ou égale à six heures par nuit [25]

Près de 9 % des participants déclarent une telle durée de sommeil (11 % des hommes et 7 % des femmes).

Une augmentation du niveau d'exposition au bruit des avions est associée à un risque de dormir moins de six heures par nuit 1,6 fois plus élevé pour une augmentation de 10 dB(A) (ie risque augmenté de 60 %).

Les hommes, les personnes célibataires, les fumeurs quotidiens, les personnes anxieuses et les travailleurs de nuit ou en horaires variables, présentent aussi des risques plus élevés.

- Le sentiment de fatigue le matin au réveil

Près d'un participant sur trois déclare être plutôt ou très fatigué le matin au réveil (22 % des hommes et 35 % des femmes).

Une augmentation du niveau d'exposition au bruit des avions est également associée à un risque de sentiment de fatigue le matin au réveil 1,2 fois plus élevé pour une augmentation de 10 dB(A) (ie risque augmenté de 20 %).

Les femmes, les participants avec un niveau d'études inférieur au baccalauréat, les personnes jeunes, les participants qui rapportent un état de santé perçu mauvais ou médiocre, ceux qui se disent sensibles au bruit, les personnes anxieuses et celles qui rapportent une fatigue physique ou nerveuse ont aussi un risque plus élevé de se sentir fatigués le matin au réveil.

Nous n'avons pas pu mettre en évidence d'association entre l'exposition au bruit des avions et les autres paramètres de la quantité et de la qualité du sommeil rapportés par les personnes elles-mêmes, tels que le temps d'endormissement, les éveils nocturnes, la satisfaction de la qualité du sommeil et la prise de médicaments pour dormir.

Ces résultats ont fait l'objet d'un article :

- Nassur AM, Lefèvre M, Laumon B, Léger D, Evrard AS.
  Aircraft noise exposure and subjective sleep quality: the results of the Debats study in France.
  Behavioral Sleep Medicine 2019; 17(4): 502-513.

[25] Pour rappel, cette durée totale de sommeil estimée correspond en fait au temps passé au lit car elle inclut la durée des éveils intra-sommeil.

3.2.5. Bruit des avions et stress

Q : L'exposition au bruit des avions a-t-elle un impact sur le niveau de stress mesuré par la modification de la sécrétion du cortisol des riverains des aéroports français ?

R : La variation de la sécrétion de cortisol est associée au jour du prélèvement, à l'exercice ou non d'une activité physique régulière et à la durée moyenne de sommeil par nuit.

Une augmentation du niveau d'exposition au bruit des avions est associée à une diminution de la variation absolue horaire du cortisol (de 15 % pour une augmentation de 10 dB(A)).

Le niveau de bruit des avions ne semble pas avoir d'effet sur les valeurs de cortisol au lever. En revanche, une augmentation du niveau d'exposition au bruit des avions est associée à une augmentation du niveau de cortisol au coucher (de 16 % pour une augmentation de 10 dB(A)).

Les individus les plus exposés auraient donc tendance à moins réguler leur sécrétion de cortisol. Cette exposition serait ainsi génératrice d'un stress chronique induisant une perturbation du rythme circadien du cortisol.

Ces résultats ont fait l'objet de deux articles :

- Lefèvre M, Carlier MC, Champelovier P, Lambert J, Laumon B, Evrard AS. Effects of aircraft noise exposure on saliva cortisol near airports in France. *Occupational and Environmental Medicine* 2017; 74(8): 612-618.
- Lefèvre M, Carlier MC, Champelovier P, Lambert J, Laumon B, Evrard AS. Bruit des avions et cortisol salivaire chez les riverains des aéroports en France. *Environnement, Risques et Santé* 2019; 18: 401-410.

3.2.6. Bruit des avions et hypertension artérielle

Q : L'exposition au bruit des avions augmente-t-elle le risque d'hypertension chez les riverains des aéroports français ?

R : La prévalence de l'hypertension artérielle, standardisée sur l'âge et le sexe de la population française, s'élève, dans Debats, à 34 % (37 % chez les hommes et 31 % chez les femmes après ajustement sur l'âge seulement).

Une augmentation du niveau d'exposition au bruit des avions est associée à un risque d'hypertension artérielle chez les hommes (risque 1,34 fois plus élevé pour une augmentation de 10 dB(A), ie risque augmenté de 34 %). En revanche, aucune association entre l'exposition au bruit des avions et le risque d'hypertension n'est mise en évidence chez les femmes.

Une augmentation du niveau d'exposition au bruit des avions est également associée à une élévation des niveaux de pression artérielle systolique et diastolique chez les hommes. Chez les femmes, seule une élévation de la pression artérielle systolique est mise en évidence.

L'étude met aussi en avant, comme attendu, le rôle de l'âge et de l'IMC dans l'augmentation du risque d'hypertension, chez les hommes comme chez les femmes. En revanche, la consommation d'alcool et l'exercice d'une activité professionnelle sont significativement associés au risque d'hypertension chez les hommes seulement.

Ces résultats ont fait l'objet de deux articles :

- Evrard AS, Lefèvre M, Champelovier P, Lambert J, Laumon B.
  Does aircraft noise exposure increase the risk of hypertension in the population living near airports in France?
  Occupational and Environmental Medicine 2017;74(2):123-129.
- Lefèvre M, Champelovier P, Lambert J, Laumon B, Evrard AS.
  Niveau tensionnel moyen et risque d'hypertension chez les riverains des aéroports en France.
  Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire 2018;18: 364-372.

3.3. Étude clinique « sommeil »

Seuls les résultats des analyses menées à partir des données recueillies lors de la première instrumentation sont présentés dans le présent rapport. En effet, les résultats complémentaires issus des analyses longitudinales de l'ensemble des données recueillies au cours des trois instrumentations sont en cours de publication dans des revues internationales à comité de lecture. Ils sont pour l'instant confidentiels et ne pourront être rendus publics qu'après publication dans ces revues, étant alors validés par nos pairs.

Les résultats sont présentés sous forme de fourchette, étant donné que les modèles sont réalisés pour différents indicateurs acoustiques énergétiques et différents indicateurs acoustiques événementiels.

Q : L'exposition au bruit des avions est-elle associée à une dégradation des paramètres objectifs du sommeil chez les riverains des aéroports français ?

R : Les niveaux moyens d'exposition au 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, avec une différence relative moyenne de 5 % et un 95ème percentile de 11 %.

Pendant la période de sommeil, c'est-à-dire entre l'endormissement et le lever des participants, le niveau de bruit continu équivalent, toutes sources de bruit confondues, est en moyenne de 51 dB(A) à l'extérieur de la chambre à coucher des participants ($L_{Aeq,ext}$) et de 33 dB(A) à l'intérieur ($L_{Aeq,int}$). Les niveaux sonores continus équivalents des avions à l'extérieur ($L_{Aeq,aero,ext}$) et l'intérieur ($L_{Aeq,aero,int}$) des chambres des participants sont respectivement de 44 dB(A) et de 17 dB(A). Enfin, des moyennes de 37 et 29 évènements de bruit d'avions sont respectivement détectées à l'extérieur (NA_{ext}) et à l'intérieur de la chambre des participants (NA_{int}) pendant la période de sommeil.

Environ 18 % des participants dorment moins de six heures par nuit. Près de 45 % présentent une insomnie d'apparition du sommeil (ie une latence d'endormissement supérieure à trente minutes) ou une insomnie de maintien du sommeil (ie une durée totale des éveils intra-sommeil supérieure à trente minutes). Environ 13 % des participants ont une mauvaise efficacité du sommeil (ie inférieure à 90 %).

Une augmentation du niveau de bruit des avions de 10 dB(A) ou de 10 événements de bruits d'avions à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre à coucher est associée à une probabilité de dormir moins de six heures par nuit de 1,1 à 1,8 fois plus élevée.

Une augmentation du niveau de bruit des avions de 10 dB(A) à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre à coucher est associée à une probabilité d'insomnie d'endormissement (ie une latence d'endormissement supérieure à trente minutes) de 1,1 à 1,3 plus élevée.

Une augmentation de 10 événements de bruits d'avions à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre à coucher est associée à une probabilité d'insomnie de maintien du sommeil (ie une durée totale des éveils intra-sommeil supérieure à trente minutes) de 1,1 à 1,3 fois plus élevée.

Une augmentation du niveau de bruit des avions de 10 dB(A) ou de 10 événements de bruits d'avions à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre à coucher est associée à une probabilité de passer plus de neuf heures au lit de 1,1 à 1,6 fois plus élevée. Cette augmentation du temps passé au lit, lorsque l'exposition au bruit des avions augmente, peut être interprétée comme un mécanisme d'adaptation à la privation de sommeil.

Enfin, une augmentation de 10 dB(A) du niveau maximum de bruit d'un évènement associé au passage d'un avion ($L_{Amax,1s}$) est associée à une augmentation de l'amplitude de la fréquence cardiaque pendant cet événement (de 0,34 battements par minute).

Ces résultats ont fait l'objet de deux articles :

- Nassur AM, Léger D, Lefèvre M, Elbaz M, Mietlicki F, NGuyen P, Ribeiro C, Sineau M, Laumon B, Evrard AS.
  The impact of aircraft noise exposure on objective parameters of sleep quality: Results of the Debats study in France.
  Sleep Medicine 2019; 54 : 70-77.
- Nassur AM, Léger D, Lefèvre M, Elbaz M, Mietlicki F, NGuyen P, Ribeiro C, Sineau M, Laumon B, Evrard AS.
  Effects of aircraft noise exposure on heart rate during sleep in the population living near airports.
  International Journal of Environmental Research and Public Health 2019, 16(2), 269.

4. Discussion, conclusions et perspectives

4.1. Discussion

Debats est le premier programme de recherche d'ampleur, en France, dont l'objectif est d'évaluer les effets éventuels de l'exposition au bruit des avions sur la santé des riverains d'aéroports. Le taux de participation à l'étude individuelle longitudinale (30 %) est similaire à celui des études sur le même sujet et réalisées en Allemagne, en Italie et au Royaume-Uni (Jarup et al. 2008). D'une manière générale, les résultats obtenus dans Debats confirment ceux qui sont obtenus par les études menées précédemment autour d'autres aéroports dans le monde et principalement en Europe. Ils suggèrent que l'exposition au bruit des avions :

- augmente le risque de dégradation de l'état de santé perçu chez les hommes, mais pas chez les femmes ;
- n'est pas associée directement à des troubles psychologiques, mais l'est par l'intermédiaire de la gêne due au bruit des avions et la sensibilité au bruit ;
- accroît la proportion de personnes fortement gênées par ce type de bruit ;
- diminue la quantité et la qualité du sommeil évaluées de manière subjective ;
- dégrade également les paramètres objectifs du sommeil ;
- est associée à une baisse significative de la variation de cortisol : les individus les plus exposés ont tendance à moins réguler leur sécrétion de cortisol ; cette exposition peut générer un stress chronique et induire une perturbation du rythme circadien du cortisol ;
- augmente le risque d'hypertension chez les hommes mais pas chez les femmes.

La prise en compte d'un grand nombre de facteurs susceptibles d'avoir une influence sur les événements de santé étudiés ne modifie pas les associations mises en évidence ici. Par ailleurs, ces résultats restent inchangés lorsque les analyses sont limitées aux participants habitant dans leur logement depuis au moins cinq ans au moment de leur inclusion dans l'étude.

Ces conclusions soutiennent l'hypothèse selon laquelle le bruit est un facteur de stress qui active le système sympathique et endocrinien (Münzel et al. 2014). L'excitation neuroendocrinienne est elle-même associée à des symptômes psychologiques comme la dépression ou l'anxiété (Zorn et al. 2017), ou encore à des effets néfastes sur le métabolisme qui sont des facteurs de risque établis de maladies cardiovasculaires (Babisch 2014).

Certains effets du bruit sur la santé, le risque d'hypertension notamment, seraient présents uniquement chez les hommes. Mais si les études démontrant les effets du bruit sur la santé, et le risque d'hypertension en particulier, sont nombreuses, rares sont celles s'intéressant plus spécifiquement aux associations qui pourraient être différentes chez les hommes et chez les femmes (Eriksson et al. 2010; Jarup et al. 2008; Lefèvre et al. 2018). Les mécanismes expliquant ces différences ne sont que partiellement élucidés en raison de la complexité des interactions entre les gènes d'une part, les gènes et l'environnement d'autre part. Ces différences pourraient notamment être expliquées par l'interaction des hormones féminines avec les systèmes de régulation, mais cette hypothèse reste à confirmer.

Le pourcentage de personnes fortement gênées est plus élevé dans l'étude Debats que ne le laisse présager l'ancienne courbe standard recommandée par la Commission Européenne en

2002 pour l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement, dans l'Union Européenne (European Commission 2002b). En revanche, ce pourcentage est plus faible dans Debats que ce que prévoit la nouvelle courbe européenne de 2020 (Official Journal of the European Union 2020). Des différences méthodologiques dans l'évaluation des personnes fortement gênées pourraient être à l'origine du fait que les études menées depuis les années 2000 trouvent, pour un même niveau de bruit, des proportions de personnes fortement gênées plus élevées que celles observées dans les études conduites avant 2000.

Même si tout a été fait pour les éviter, certains biais de sélection ne peuvent être totalement exclus. En effet, d'une part les participants à l'étude pourraient être « différents » (ie au-delà de leur exposition au bruit) des individus qui ont refusé de participer, d'autre part, les participants pourraient être « différents » selon leur niveau d'exposition sonore. S'agissant du premier risque de biais, les profils démographiques et socioéconomiques des participants et des non-répondants qui ont néanmoins accepté de répondre à quelques questions sont relativement similaires. Quelques différences apparaissent, notamment une proportion de cadres et de professions intermédiaires plus élevée chez les participants que chez les non-répondants, ainsi qu'une proportion de retraités moins élevée, sachant que ces non-répondants ne sont peut-être pas représentatifs, eux non plus, de l'ensemble des non-répondants. Par ailleurs, il est possible que les personnes ayant accepté de participer se sentent davantage concernées, et auraient ainsi tendance à déclarer plus de problèmes de santé liés au bruit. À défaut de pouvoir totalement contrôler ce risque de biais, nous avons veillé à ce que les participants n'aient pas été informés de l'objectif spécifique de l'étude avant de compléter le questionnaire (l'étude leur ayant été présentée comme s'intéressant à la perception de leur environnement et à leur santé). S'agissant du second risque de biais, peut-être plus essentiel que le précédent, une hypothèse raisonnable est de considérer que ce risque est faible. Et ce d'autant plus que les résultats avancés sont ajustés sur un ensemble de facteurs, certes de confusion, mais qui peuvent aussi constituer des facteurs de biais de sélection (on peut penser à l'âge, au sexe ou à la catégorie socioprofessionnelle). De fait, les éventuels biais de sélection associés ne peuvent qu'être « gommés » par ces ajustements (cette remarque valant aussi pour le premier risque de biais de sélection évoqué précédemment).

Au demeurant, les riverains des aéroports retenus dans Debats ne sont certainement pas représentatifs de l'ensemble des riverains des aéroports français (a fortiori du reste du monde). En l'absence de données concernant cette population, il n'est pas possible de caractériser les probables différences entre les uns et les autres. Là encore, la remarque précédente, concernant l'ajustement des risques sur plusieurs facteurs de confusion, peut être rassurante quant à la pertinence des associations mises en évidence.

L'évaluation de l'exposition au bruit des avions au domicile de chaque participant à l'aide des niveaux de bruit modélisés par des cartes de bruit pourrait être source d'erreurs de mesure. Cependant, la plupart des différences entre les niveaux de bruit modélisés et les mesures de stations permanentes (Aéroports de Paris 2006) ou de campagnes spécifiques (Foret et al. 2005) se situent entre 0,5 et 1,5 dB(A) en termes de L_{den}. Par ailleurs, les niveaux moyens de bruit des avions, estimés grâce aux cartes de bruit à l'adresse des 112 participants à 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, avec une différence relative moyenne de 5 % et un 95ème percentile de 11 % (Nassur et al. 2018). Ces résultats montrent une correspondance étroite entre les niveaux de bruit modélisés et ceux mesurés, validant ainsi l'estimation des niveaux d'exposition au bruit des avions fournie à partir du logiciel INM (He et al. 2007).

Enfin, aucune information concernant leur exposition au bruit n'a été recueillie lorsque les participants sont à l'extérieur de leur domicile, en particulier sur leur lieu de travail ou dans les transports. Ceci a pu conduire à une évaluation erronée du niveau d'exposition au bruit de certains d'entre eux du fait de leur exposition à d'autres sources de bruit, notamment pendant la journée. Toutefois, de telles erreurs de mesure auraient vraisemblablement pour conséquence une sous-estimation des associations étudiées ici.

4.2. Conclusions

En conclusion, l'étude écologique de Debats confirme les résultats d'autres études qui suggèrent qu'une augmentation de l'exposition au bruit des avions est associée à une mortalité plus élevée par maladie cardiovasculaire en général, par maladie cardiaque ischémique en particulier, notamment par infarctus du myocarde. Cependant, il est impossible d'extrapoler ces résultats au niveau individuel. C'est la raison pour laquelle deux études individuelles ont également été mises en place.

Les résultats de l'étude individuelle longitudinale et de l'étude clinique « sommeil » confirment ceux d'études antérieures réalisées à l'étranger. Ils suggèrent que l'exposition au bruit des avions en France a des effets délétères sur l'état de santé perçu, la santé psychologique, la gêne, la quantité et la qualité du sommeil et les systèmes endocrinien et cardiovasculaire.

La validité de ces résultats est pour le moins renforcée par ceux de l'analyse longitudinale de l'ensemble des données recueillies aux trois suivis ou au cours des trois instrumentations[26].

4.3. Originalités de Debats

Les originalités de Debats concernent :

- l'étude des effets sanitaires : de nombreuses enquêtes menées en France se sont intéressées à la gêne ou aux effets rapportés sur le sommeil mais plus rares sont celles qui ont considéré les effets physiopathologiques de l'exposition au bruit des avions ;
- le suivi des personnes dans le temps qui a permis d'étudier l'évolution de leur état de santé en termes d'habituation, de modifications des comportements, d'adaptation à l'environnement ;
- la recherche et l'évaluation d'un lien entre les effets psychosociologiques du bruit des avions d'une part, et ses effets physiopathologiques d'autre part ;
- l'utilisation d'indicateurs événementiels pour caractériser l'exposition au bruit des avions dans le cadre de l'étude clinique « sommeil » : la quasi-totalité des études épidémiologiques sur le sujet ont utilisé des indicateurs énergétiques ;
- la réalisation de mesures acoustiques dans l'habitat dans le cadre de l'étude clinique « sommeil » qui ont permis de prendre en compte le bâtiment en termes d'isolation et la pratique d'ouverture/fermeture des fenêtres alors que les règlementations françaises et européennes ainsi que les études épidémiologiques se basent sur l'exposition au bruit en façade des bâtiments ;
- les enregistrements actimétriques et du rythme cardiaque, très rarement utilisés dans les études épidémiologiques, qui ont permis d'évaluer de manière objective le sommeil des participants à l'étude clinique « sommeil » ;

[26] Mais qui ne sont pas encore publiés dans des revues internationales à comité de lecture.

- et enfin, l'approche pluridisciplinaire qui a fait appel à des compétences en épidémiologie, en psychologie et en acoustique physique.

4.4. Perspectives

La mise en œuvre en 2009 d'un programme de recherche épidémiologique appelé Debats faisait suite à une recommandation du Conseil supérieur d'hygiène publique de France, qui visait à affiner la connaissance de la situation sanitaire française résultant de l'exposition au bruit des avions. Des démarches d'évaluation avaient déjà été réalisées ou étaient engagées autour de nombreux aéroports européens, mais aucune n'avait été entreprise en France, alors que les pouvoirs publics avaient besoin d'une étude de référence dans notre pays. L'objectif était de mieux connaître et quantifier les effets de l'exposition au bruit des avions sur la santé des riverains des aéroports en France. Nous espérons avoir contribué à répondre à ces attentes.

En apportant une connaissance élargie et approfondie de la situation sanitaire française résultant de l'exposition au bruit des avions, Debats devrait permettre de répondre à la demande des populations riveraines des zones aéroportuaires en France. Il devrait, par ailleurs, permettre d'évaluer les bénéfices sanitaires attendus de la mise en œuvre de mesures de réduction des nuisances sonores à proximité des aéroports.

5. Références

Aéroports de Paris (2006) Exposition au bruit des avions : Aéroport Paris-Charles de Gaulle - Compte rendu annuel 2006.

Babisch W (2003) Stress Hormones in the Research on Cardiovascular Effects of Noise. Noise & Health 5:1-11

Babisch W (2014) Updated exposure-response relationship between road traffic noise and coronary heart diseases: A meta-analysis. Noise & Health 16:1-9

Bacak V, Olafsdottir S (2017) Gender and validity of self-rated health in nineteen European countries. Scand J Public Health 45:647-653

Basner M, Griefahn B, Müller U et al. (2007) An ECG-based Algorithm for the automatic identification of autonomic activations associated with cortical arousal. Sleep 30:1349-1361

Direction du transport aérien (2012) Activité des aéroports français Année 2011 vol 169.

Eriksson C, Bluhm G, Hilding A et al. (2010) Aircraft noise and incidence of hypertension - Gender specific effects. Environmental Research 110:764-772

European Commission (2002a) Directive of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise vol Directive 2002/49/EC. Official Journal of the European Communities, Available at: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32002L0049; Accessed December 1, 2014

European Commission (2002b) Position paper on dose response relationships between transportation noise and annoyance. Luxembourg

Fields JM, De Jong RG, Gjestland T et al. (2001) Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: Research and a recommendation. Journal of Sound and Vibration 242:641-679

Foret R, Bruyère JC, Yombo N (2005) Etude empirique de la validité du Plan de Gêne Sonore de l'aéroport Lyon St Exupéry. Rapport d'étude. Aéroport de Lyon-St Exupéry.

Goldberg D, Williams P (1988) A User's Guide to the General Health Questionnaire. NFER-Nelson, London, UK

Goldberg P, Guéguen A, Schmaus A et al. (2001) Longitudinal study of associations between perceived health status and self reported diseases in the French Gazel cohort. Journal of Epidemiology and Community Health 55:233-238

Guski R, Schreckenberg D, Schuemer R (2017) WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance. Int J Env Res Public Health 14:1539

He B, Dinges E, Hemann J et al. (2007) Integrated Noise Model (INM) Version 7.0 User's Guide. Federal Aviation Administration, Washington DC, USA

Idler EL, Benyamini Y (1997) Self-rated health and mortality: a review of twenty-seven community studies. J Health Soc Behav 38:21-37

ISO (2003) Acoustics -- Assessment of Noise Annoyance by means of Social and Socio-acoustic Surveys. TS 15666:2003(E) Acoustics, Geneva, Switzerland.

Jarup L, Babisch W, Houthuijs D et al. (2008) Hypertension and exposure to noise near airports: the HYENA study. Environmental Health Perspectives 116:329-333

Lambert J, Philipps-Bertin C (2009) Les nuisances environnementales des transports : résultats d'une enquête nationale. Rapport de recherche n°278, Les Collections de l'INRETS, octobre 2009

Lefèvre M, Champelovier P, Lambert J et al. (2018) Niveau tensionnel moyen et risque d'hypertension chez les riverains des aéroports en France Bull Epidemiol Hebd 18 : 364-372

Léger D, Zeghnoun A, Faraut B et al. (2019) Le temps de sommeil, la dette de sommeil, la restriction de sommeil et l'insomnie chronique des 18-75 ans : résultats du Baromètre de Santé Publique France 2017 Bull Epidemiol Hebd 8-9:149-160

McDowell I (2006) Measuring Health: A Guide to Rating Scales and Questionnaires, 3rd ed. Oxford University Press, Oxford, United Kingdom; New-York, NY, USA

McEwen BS, Seeman T (1999) Protective and damaging effects of mediators of stress - Elaborating and testing the concepts of allostasis and allostatic load. Annals of the New York Academy of Sciences 896:30-47

Miedema HM, Oudshoorn CMG (2001) Annoyance from Transportation Noise: Relationships with Exposure Metrics DNL and DENL and Their Confidence Intervals. Environmental Health Perspectives 109:409-416

Montaut A (2010) Santé et recours aux soins des femmes et des hommes.

Münzel T, Gori T, Babisch W et al. (2014) Cardiovascular effects of environmental noise exposure. Eur Heart J 35:829-836

Nassur AM, Sous la co-direction de Laumon B, Sous la co-direction de Léger D et al. (2018) Effets de l'exposition au bruit des avions sur la qualité du sommeil des riverains des aéroports français. Thèse de doctorat, spécialité Epidémiologie, Université Claude Bernard Lyon 1

Official Journal of the European Union (2020) Commission Directive (EU) 2020/367 of 4 March 2020 amending Annex III to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council as regards the establishment of assessment methods for harmful effects of environmental noise.

Statistique Canada (2019) Santé perçue. Accessed 29-June-2019

Zorn JV, Schür RR, Boks MP et al. (2017) Cortisol stress reactivity across psychiatric disorders: A systematic review and meta-analysis. Psychoneuroendocrinology 77:25-36

Liste des principaux sigles et abréviations

Acnusa : Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires
AdP : Aéroports de Paris
Bruitparif : Centre d'évaluation technique de l'environnement sonore en Île-de-France
CépiDc : Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès
CES : courbes d'environnement sonore
CIM-10 : classification internationale des maladies 10ème révision
CSHPF : Conseil supérieur d'hygiène publique de France
dB(A) : décibel pondéré A
DCM : Dynamique des changements de mobilité
Debats : Discussion des effets du bruit des aéronefs touchant la santé
DGAC : Direction générale de l'aviation civile
DGS : Direction générale de la santé
Elisa : Enzyme linked immunoSorbent assay
GHQ : General health questionnaire
HA : highly annoyed
HTA : hypertension artérielle
Hyena : Hypertension and exposure to noise near airports
Icben : International commission on the biological effects of noise
Ifsttar : Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
IMC : indice de masse corporelle
INM: integrated noise model
Inrets : Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité
Insee : Institut national de la statistique et des études économiques
Inserm : Institut national de la santé et de la recherche médicale
ISO: International organization for standardization
L_{den} : L pour level, d pour day, e pour evening et n pour night
LE : latence d'endormissement
LTE : Laboratoire Transports et Environnement
OMS : Organisation mondiale de la santé
PAC : Perception, acceptabilité et comportements
PAD : pression artérielle diastolique ; PAS : pression artérielle systolique
PGS : plan de gêne sonore
SF-36 : 36-item short form survey
SIG : système d'information géographique
TEIS : temps d'éveil intra-sommeil
TS2 : département Transport santé sécurité
TST : temps de sommeil total
Umrestte : Unité mixte de recherche épidémiologique et de surveillance transport travail environnement

Remerciements

L'ensemble des auteurs tiennent à remercier :

- les financeurs :
l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), l'Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires (Acnusa), la Direction générale de l'aviation civile (DGAC), la Direction générale de la prévention des risques (DGPR), et la Direction générale de la santé (DGS).

- les autres membres du comité de pilotage du programme de recherche, placé sous la présidence de l'Acnusa :

Ses présidentes, Joëlle Adrien, puis Agnès Brion Ducoux, membres du collège de l'Acnusa ;

Les représentants de la DGS : Emmanuel Briand, Charlotte Bringer-Guérin, Frédérique Cousin, Corinne Drougard, Marie Fiori, Didier Ollandini, Ghislaine Palix-Cantone, Laurine Tollec ;

Les représentants de la DGPR : Natalie Commeau, Pascal Valentin ;

Les représentants de la DGAC : Jean- Philippe Dufour, Jonathan Gilad, Nathalie Gilad, Pascal Luciani, Véronique Martin, Aline Pillan, Claire Rais-Assa, Diane Szynkier, Guillaume Van Reysel ;

Les représentants de l'Anses : Anthony Cadène, Olivier Merckel, Aurélie Niaudet ;

Et les secrétaires généraux de l'Acnusa : Ghislaine Esquiague, Philippe Gabouleaud, Éric Girard-Reydet.

- les membres du comité scientifique :
Pierre Ducimetière (président), Mark Brink, Jérôme Defrance, Hubert Isnard, Damien Léger, Stéphane Legleye, Alain Muzet, Mahmoud Zureik.

- les autres membres de l'Université Gustave Eiffel qui ont contribué au programme de recherche :
Clémence Baudin, Laure Barthélémy, Jean-Marc Benhaim, Anne-Marie Bigot, Geneviève Boissier, Liacine Bouaoun, Patricia Champelovier, Camille Chantelot, Patricia Chapuis, Agnès Chaumond, Mireille Chiron, Evelyne Croiser, Véronique David- Dehal, Emmanuel Farga, Lise Giorgis Allemand, Clément Giron, Evelyne Grange, Violette Horde, Heikki Jähi, Inès Khati, Aboud Kourieh, Jacques Lambert, Marie Lefèvre, Thibaut Level, Maud Maza, Bernard Mingot, Fabienne Molinari, Ali Mohamed Nassur, Paul Niogret, Dan Olivier, Céline Pescié, Delphine Puccianti, Karim Sayah.

- Acoucité, Aéroports de Paris, Airparif, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, DGAC, Geocible, GfK ISL, Sleeptech, pour leur assistance technique.

- et enfin, tous les participants au programme de recherche !