



Environnement Risques Santé ERS

Volume 15 – numéro 6 • novembre-décembre 2016

**L'ingénierie de la promotion de la
santé : d'Ottawa à l'après-Shanghai**

**Quand un agrégat de malformations
rencontre une agence de santé publique**

**Évaluation toxicologique des nanomatériaux
d'oxydes métalliques *via* la modélisation
« structure-activité »**

**Exposition au bruit des avions et mortalité
cardiovasculaire à proximité des aéroports en France**

**Variabilité climatique et dynamique du paludisme
dans la région de la Marahoué en Côte d'Ivoire**

**Point de vue sur l'article « *Anthropogenic Carbon Nanotubes
Found in the Airways of Parisian Children* »**

www.jle.com

**John Libbey
EUROTEXT**

ISSN 1635-0421





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

ANNE-SOPHIE EVRARD¹
LIACINE BOUAOUN^{1,2}
PATRICIA CHAMPELOVIER³
JACQUES LAMBERT³
BERNARD LAUMON⁴

¹ Univ Lyon, IFSTTAR, Univ
Lyon 1
UMRESTTE, UMR T9405
F-69675 Bron
France
<anne-sophie.evrard@ifsttar.fr>

² Centre international de
recherche sur le cancer
Section génétique
Groupe biostatistique
150, cours Albert Thomas
F-69372 Lyon CEDEX 08
France
<liacine.bouaoun@hotmail.fr>

³ IFSTTAR
Département
aménagement, mobilités
et environnement
Laboratoire transports et
environnement (LTE)
Cité des mobilités
25, avenue François
Mitterrand
F-69675 Bron
France
<patricia.champelovier@ifsttar.fr>
<jacques.lambert@ifsttar.fr>

⁴ IFSTTAR
Département transport,
santé, sécurité
Cité des mobilités
25, avenue François
Mitterrand
F-69675 Bron
France
<bernard.laumon@ifsttar.fr>

Résumé. *Objectif :* Depuis quelques années, l'impact sur la santé de l'exposition au bruit des avions fait l'objet de préoccupations grandissantes. Dans ce contexte, la présente étude s'est intéressée à la relation entre cette exposition et la mortalité par maladies cardio- et cérébrovasculaires en France.

Méthodes : Nous avons réalisé une étude écologique incluant 161 communes situées à proximité de trois aéroports français majeurs : Paris-Charles de Gaulle, Lyon Saint-Exupéry et Toulouse-Blagnac. Les données de mortalité ont été transmises pour la période 2007-2010 par le Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm). L'exposition moyenne au bruit des avions pondérée par la population ($L_{den}IME$) a été calculée au niveau de chaque commune à partir des cartes de bruit produites par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC). Un modèle de régression de Poisson a été ajusté en prenant en compte des facteurs de confusion potentiels, notamment la pollution de l'air.

Résultats : Des associations positives significatives ont été observées entre le $L_{den}IME$ et la mortalité par maladie cardiovasculaire (rapport des taux de mortalité ajustés [MRR] pour une augmentation de 10 dBA du $L_{den}IME = 1,18$; intervalle de confiance à 95 % : 1,11-1,25), la mortalité par cardiopathie ischémique (MRR = 1,24 [IC₉₅ : 1,12-1,36]) et la mortalité par infarctus du myocarde (MRR = 1,28 [IC₉₅ : 1,11-1,46]). Ces associations ne sont pas atténuées par la prise en compte de la pollution de l'air. L'association avec la mortalité par accident vasculaire cérébral n'est pas significative (MRR = 1,08 [IC₉₅ : 0,97-1,21]).

Conclusions : Cette étude écologique montre des associations statistiquement significatives entre l'exposition au bruit des avions et la mortalité par maladie cardiovasculaire, cardiopathie ischémique et infarctus du myocarde. Cependant, des biais écologiques et la possibilité que les associations observées soient dues à des facteurs de confusion résiduels ne peuvent pas être exclus.

Mots clés : bruit ; avion ; environnement ; mortalité ; maladie cardiovasculaire ; santé publique.

Abstract

Does exposure to aircraft noise increase mortality from cardiovascular disease in people living near airports in France?

Objective: The impact of aircraft noise on health is of growing concern. We investigated the relations between this exposure and mortality from cardiovascular disease, ischaemic heart disease, myocardial infarction and stroke.

Methods: We performed an ecological study based on 161 communes (municipalities) close to three major French airports: Paris-Charles de Gaulle, Lyon Saint-Exupéry and Toulouse-Blagnac. The mortality data for the period 2007-2010 came from the French Centre for

Pour citer cet article : 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. *Environ Risque Sante* 2016 ; 15 : 506-514. doi : 10.1684/ers.2016.0941

doi: 10.1684/ers.2016.0941

**Tirés à part :**
AS. EvrardArticle reçu le 17 février 2016,
accepté le 3 mai 2016

Medical Causes of Death. Based on data provided by the French Civil Aviation Authority, a weighted average exposure to aircraft noise ($L_{den}AEI$) was computed at the commune level. A Poisson regression model, adjusted for potential confounding factors including air pollution, was used to investigate the association between mortality rates and $L_{den}AEI$.

Results: Positive associations were observed between $L_{den}AEI$ and mortality from cardiovascular disease (adjusted mortality rate ratio [MRR] per 10 dB[A] increase in $L_{den}AEI$ = 1.18; 95% confidence interval: 1.11 to 1.25), ischaemic heart disease (MRR = 1.24 [CI₉₅: 1.12-1.36]) and myocardial infarction (MRR = 1.28 [CI₉₅: 1.11-1.46]). Stroke mortality was less strongly associated with $L_{den}AEI$ (MRR = 1.08 [CI₉₅: 0.97-1.21]). Adjustment for air pollution did not attenuate these significant associations.

Conclusions: This ecological study supports the hypothesis of an association between aircraft noise exposure and mortality from cardiovascular disease, ischaemic heart disease and myocardial infarction. However, neither the potential for ecological bias nor the possibility that this association could be due to residual confounding can be ruled out.

Key words: noise; aircraft; environment; mortality; cardiovascular diseases; public health.

Depuis quelques années, l'impact sur la santé de l'exposition au bruit des avions fait l'objet de préoccupations grandissantes [1] en raison de l'augmentation, non seulement du trafic (nombre de vols), mais aussi de la gêne ressentie [2]. Alors que beaucoup d'études se sont intéressées à la gêne [3-5] ou à la qualité du sommeil [6-8], peu ont examiné le lien entre l'exposition au bruit des avions et les maladies cardio- ou cérébrovasculaires. En effet, le bruit est un stressor psychosocial qui active les systèmes sympathique et endocrinien. Or une activation excessive et prolongée de ces systèmes peut être délétère pour le système cardiovasculaire [9]. L'exposition au bruit des avions pourrait ainsi augmenter la prévalence ou l'incidence des maladies cardiovasculaires et le risque de décès prématuré associé.

Par ailleurs, plusieurs études ont rapporté une association entre l'exposition au bruit des avions et le risque d'hypertension artérielle [10-13]. Aux États-Unis, une étude réalisée à proximité de plusieurs aéroports a montré qu'une exposition élevée était significativement associée au risque d'hospitalisation pour maladie cardiovasculaire chez les personnes âgées de plus de 65 ans [14]. Néanmoins, les résultats des études s'intéressant à la mortalité cardiovasculaire ne sont pas consistants, certains auteurs trouvant des associations significatives et d'autres non. En 2010, en Suisse, Huss *et al.* [15] ont rapporté une association entre l'exposition au bruit des avions et la mortalité par infarctus du myocarde, avec une relation dose-réponse pour le niveau et la durée d'exposition au bruit. Aucune association n'a en revanche été mise en évidence avec la mortalité par accident vasculaire cérébral ou par maladies cardiovasculaires dans leur ensemble. Une étude danoise n'a pas non plus observé d'association avec la mortalité par accident vasculaire cérébral [16] et une étude canadienne n'en a pas trouvé avec la mortalité par cardiopathie ischémique [17]. Plus récemment, une étude écologique menée à

proximité de l'aéroport d'Heathrow à Londres a montré une association significative entre les niveaux élevés d'exposition au bruit des avions et le risque d'hospitalisation, ainsi que la mortalité par accident vasculaire cérébral, cardiopathie ischémique et maladie cardiovasculaire dans leur ensemble [18].

Au regard de ces résultats, nous avons réalisé en France une étude écologique. Son objectif principal est d'analyser la question d'une association entre l'exposition au bruit des avions et la mortalité par maladie cardiovasculaire, cardiopathie ischémique, infarctus du myocarde et accident vasculaire cérébral. Des études ayant montré que la pollution de l'air était associée à la mortalité cardiovasculaire [19-21], il est important de dissocier les effets du bruit de ceux de la pollution de l'air [1]. Ainsi, un objectif secondaire de la présente étude est d'examiner si la pollution de l'air est un facteur de confusion de l'association entre l'exposition au bruit des avions et la mortalité.

Méthodes

Cette étude écologique inclut 161 communes situées à proximité de trois aéroports français majeurs : Paris-Charles de Gaulle, Lyon Saint-Exupéry et Toulouse-Blagnac. Le trafic passager y a été respectivement d'environ 61 millions, 8,5 millions et 7 millions de personnes en 2011 [22]. La population de ces 161 communes a été évaluée à 1,9 million d'habitants en 2009, ce qui représente 3 % de la population totale de la France métropolitaine.

L'exposition de chaque commune au bruit des avions a été estimée à partir des cartes de bruit produites par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC) avec le modèle INM (*Integrated Noise Model*) [23]. Pour chaque aéroport, nous avons utilisé les cartes de bruit disponibles



les plus récentes ou correspondant le mieux à la période des données de mortalité (2007-2010). Plus précisément, elles datent de 2008 pour Paris-Charles de Gaulle, 2003 pour Lyon Saint-Exupéry, et 2004 pour Toulouse-Blagnac. Elles sont établies sur la base du trafic estimé, des procédures de circulation aérienne applicables et des infrastructures en service.

La zone d'étude comprend toutes les communes exposées au bruit des avions, c'est-à-dire celles incluses dans les cartes de bruit mais aussi celles partageant une frontière commune avec ces dernières. Inclure ces communes voisines permet d'augmenter le contraste d'exposition au bruit des avions.

Conformément à la Directive européenne n° 2002/49/CE du 25 juin 2002, l'indicateur acoustique utilisé par la DGAC pour produire les cartes de bruit qui sont donc utilisées ici est le niveau sonore moyen pondéré (L_{den}). Pour le calcul de cet indicateur, une journée est divisée en 12 heures de jour (*day*), en 4 heures de soirée (*evening*) et en 8 heures de nuit (*night*). Une pénalité de 5 dBA est ajoutée au niveau de bruit en soirée et une pénalité de 10 dBA est ajoutée au niveau de bruit la nuit. Ces pénalités traduisent, pour un même niveau d'exposition au bruit, les différences dans la gêne ressentie au cours de ces trois périodes [24]. Au moment de la présente étude, les niveaux de bruit estimés dans les cartes de bruit étaient disponibles avec une résolution de 1-dBA, à partir de 50 dBA pour la zone de Paris et 45 dBA pour les zones de Lyon et Toulouse. Pour chaque commune, le nombre d'habitants résidant dans chaque intervalle de 1-dBA a été 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 avaient été croisées avec les données de population de 1999 (les seules disponibles au moment où la DGAC avait fait le croisement). Pour la zone de Lyon, les cartes de bruit de 2003 ont été croisées avec les données de population de 2007. Et enfin, pour la zone de Toulouse, les cartes de bruit de 2004 ont été croisées avec les données de population de 2008.

Ces niveaux de bruit ont été agrégés de façon à obtenir une estimation du niveau d'exposition au bruit des avions de chaque commune de la zone d'étude. Une moyenne pondérée sur la population, également appelée indice moyen d'exposition au bruit des avions ($L_{den,IME}$) [25] a été calculée en pondérant, pour une commune donnée, le L_{den} par le nombre d'habitants résidant dans chaque intervalle de 1-dBA. Pour une commune donnée i , le $L_{den,IME}$ a été défini de la façon suivante :

$$L_{den,IME_i} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\sum_k P_k} \sum_{j \geq 1} P_j 10^{\frac{L_{den,j}}{10}} \right)$$

où $L_{den,j}$ correspond au niveau d'exposition au bruit des avions j (la différence entre le $L_{den,j}$ et le $L_{den,j+1}$ est

égale à 1 dBA), P_j au nombre d'habitants de la commune exposés au niveau de bruit des avions $L_{den,j}$ dBA et $\sum_k P_k$ au nombre total d'habitants dans cette commune.

Le $L_{den,IME}$ a ensuite été utilisé comme mesure de l'exposition au bruit des avions de chaque commune dans les analyses statistiques présentées ici.

Le lien entre la mortalité cardiovasculaire et l'exposition aux particules PM_{10} a été clairement établi contrairement à celui avec l'exposition au dioxyde d'azote (NO_2). Cependant, des études récentes ont trouvé un lien entre NO_2 et mortalité cardiovasculaire [26, 27]. Comme les données d'exposition à la pollution de l'air étaient disponibles à l'échelle de la commune, pour les zones de Paris et de Lyon, à la fois pour le NO_2 et pour les PM_{10} , les deux variables ont été utilisées dans les analyses. Des modèles de dispersion ont été utilisés pour estimer les concentrations annuelles dues à la pollution de fond pour chaque commune de la zone d'étude, pour chaque année de 2008 à 2010. Contrairement à la pollution de proximité, la pollution de fond correspond à des niveaux de pollution représentatifs de l'ambiance générale de tout un secteur géographique, activité aéroportuaire comprise. Il s'agit du niveau de pollution minimum auquel la population de ce secteur est soumise, quelle que soit son activité, et donc pendant de longues périodes. Les concentrations modélisées ont été fournies avec une résolution de 50 m × 50 m par Airparif pour la zone de Paris, et avec une résolution de 1 000 m × 1 000 m par Air Rhône-Alpes pour la zone de Lyon. Elles ont été validées par comparaison avec les concentrations mesurées par un réseau de stations de mesure. L'exposition moyenne à la pollution de l'air pour la période 2008 à 2010 (pour le NO_2 et les PM_{10} , exprimée en $\mu g/m^3$) de chaque commune a été utilisée pour les analyses statistiques. Ces analyses incluant la pollution de l'air portent sur 139 communes au lieu de 161 du fait de l'absence de données de NO_2 et PM_{10} pour la zone de Toulouse. Des travaux de modélisation de la qualité de l'air sur l'aire toulousaine ont été entrepris dans le cadre du Plan pour la protection de l'atmosphère mais ils ne sont pas achevés.

Les données de mortalité ont été transmises par le Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (CépiDc-Inserm) pour la période 2007-2010. La classification internationale des maladies 10^e révision (CIM-10) a été utilisée pour coder et classifier les données de mortalité à partir des certificats de décès. Nous disposons de la commune de résidence, qui figure systématiquement dans les certificats de décès, pour la localisation spatiale des décès.

La présente étude s'est intéressée 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) ;
- 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-Inserm a enregistré 7 450 décès par maladie cardiovasculaire dans l'ensemble des communes de la zone d'étude.

Les modèles ont été ajustés à l'échelle de la commune sur les covariables suivantes considérées comme des facteurs de confusion *a priori* : sexe, âge, logarithme de la densité de population, mortalité par cancer du poumon et indice de défaveur. Les variables âge, sexe 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 avons utilisé 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 a été 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 (ICD-10 code: C34) a été 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-Inserm pour la période 2007-2010.

Comme il est souhaitable de ne pas utiliser l'indice de défaveur de Townsend en France [28-30], nous lui avons préféré celui proposé par Rey *et al.* [31]. Il a été construit à l'échelle de la commune, à partir de quatre variables, chacune représentant une dimension socio-économique :

- le revenu médian ;
- le pourcentage de bacheliers dans la population de 15 ans et plus ;
- la proportion d'ouvriers dans la population active ;
- le taux de chômage chez les 15-64 ans.

Ces données socio-économiques ont été obtenues à partir du recensement de 2007 de l'Insee, année la plus récente pour laquelle ces variables étaient disponibles au moment de l'étude.

Notre indice de défaveur a été défini comme la première composante de l'analyse en composante principale (ACP) de ces quatre variables. Il représente 67 % de l'inertie totale formée par les quatre variables et est fortement corrélé à chacune de ces dimensions (négativement avec le revenu médian et le pourcentage de bacheliers, positivement avec le pourcentage d'ouvriers et le taux de chômage). Les valeurs positives de cet indice correspondent à des communes défavorisées.

Lors d'une analyse de sensibilité, les modèles ont été stratifiés sur le sexe afin de tester si les associations potentielles entre l'exposition au bruit des avions et la mortalité étaient similaires chez les hommes et chez les femmes.

Comme l'on suppose que les niveaux de bruit des avions sont plus élevés dans la zone de Paris que dans les deux autres zones du fait de l'importance du trafic de cet aéroport, nous avons étudié l'ajustement du modèle sur la zone d'étude et mené une analyse de sensibilité à partir des données de la zone de Paris uniquement.

Analyses statistiques

Des coefficients de corrélation de Spearman ont été calculés pour estimer les corrélations entre les niveaux d'exposition au bruit des avions et l'exposition à la pollution de l'air.

Les effets de l'exposition au bruit des avions sur les taux de mortalité ont d'abord été étudiés avec des modèles mixtes de Poisson additifs généralisés (GAMMs) [32, 33] incluant une fonction spline cubique lissée de façon à prendre en compte un possible effet non linéaire. Comme l'ajustement lissé n'est pas significativement différent d'une droite pour le $L_{den}IME$, les associations avec la variable continue d'exposition ont ensuite été estimées et sont présentées ici. Des modèles mixtes de Poisson linéaires généralisés (GLMMs) [34] incluant un terme aléatoire spécifique à la commune ont été ajustés pour prendre en compte la sur-dispersion. Pour chaque cause de mortalité, le modèle GLMM peut s'écrire de la façon suivante :

$$Y_i | u_i \sim \text{Poisson}(\mu_i = \text{Pop}_i \theta_i)$$

$$\log(\mu_i) = \log(\text{Pop}_i) + \beta^T X_i + u_i$$

où i correspond à la commune, Y_i au nombre de décès observé dans la commune i , Pop_i la population totale de la commune i , X_i le vecteur des covariables d'ajustement, et u_i le vecteur des effets aléatoires. β^T représente le vecteur des coefficients de régression correspondant à ces covariables. La composante non-spatiale de l'effet aléatoire, u_i , également appelée composante d'hétérogénéité, est supposée suivre une loi normale de moyenne zéro et de variance constante.

Les rapports des taux de mortalité ajustés (MRR : *mortality rate ratio*) avec leur intervalle de confiance à 95 % (IC_{95}) ont été calculés pour chaque covariable incluse dans le modèle en prenant l'exponentielle du coefficient de régression correspondant.

La version 10.1 du logiciel ArcGIS [35] a été utilisée pour produire les cartes. La validation des données a été effectuée avec le logiciel SAS [36] version 9.3 et les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R [37] version 3.0.2 incluant la fonction *gam* du package *mgcv* [38].

Résultats

Globalement, la moyenne du $L_{den}IME$ a été estimée à 49,6 dBA (étendue : 42,0 – 64,1 dBA) comme présenté dans

Tableau 1. Distribution des niveaux d'exposition au bruit des avions ($L_{den,IME}$) et de la pollution de l'air (NO_2 et PM_{10}) dans les communes de la zone d'étude.*Table 1. Distribution of aircraft noise exposure ($L_{den,AEI}$) and air pollution (NO_2 and PM_{10}) in the communes studied.*

Zone d'étude	Paris	Lyon	Toulouse	Total
Nombre de communes	108	31	22	161
$L_{den,IME}$ (dBA)				
Moyenne	51,6	45,3	45,7	49,6
Médiane	51,3	43,4	44,9	48,9
Minimum	45,0	42,0	42,0	42,0
Maximum	64,1	55,1	55,8	64,1
NO_2 ($\mu g/m^3$)^a				
Moyenne	24,0	16,5	-	22,3
Médiane	23,4	16,3	-	21,2
Minimum	15,9	12,0	-	12,0
Maximum	36,3	21,9	-	36,3
PM_{10} ($\mu g/m^3$)^a				
Moyenne	24,2	23,9	-	23,9
Médiane	23,4	24,0	-	23,6
Minimum	22,4	22,3	-	22,3
Maximum	27,1	26,2	-	27,1

^a 139 communes du fait de l'absence de données de NO_2 et PM_{10} dans la zone de Toulouse.

le *tableau 1*. Le $L_{den,IME}$ moyen le plus élevé a été observé dans la zone de Paris (51,6 dBA comparativement à 45,3 dBA dans la zone de Lyon et 45,7 dBA dans la zone de Toulouse). Par ailleurs, le $L_{den,IME}$ varie plus dans la zone de Paris. La concentration en NO_2 est plus élevée dans la zone de Paris (moyenne : 24,0 $\mu g/m^3$) que dans la zone de Lyon (moyenne : 16,5 $\mu g/m^3$) et varie également plus largement.

Les MRRs augmentent avec l'âge pour toutes les causes de mortalité considérées. La densité de population est associée négativement avec toutes les causes de mortalité sauf les accidents vasculaires cérébraux. L'indice de défaveur est positivement associé avec toutes les causes de mortalité. La mortalité par cancer du poumon n'est associée avec aucune des causes de mortalité considérées.

Les MRRs associés à une augmentation de 10 dBA du $L_{den,IME}$ sont présentés sur la *figure 1* (ils sont notamment ajustés sur le sexe, l'âge, la log-densité, l'indice de défaveur et le taux de mortalité par cancer du poumon). Des associations sont mises en évidence avec la mortalité par maladie cardiovasculaire (MRR = 1,18 [IC₉₅ : 1,11-1,25]), par cardiopathie ischémique (MRR = 1,24 [IC₉₅ : 1,12-1,36]), et par infarctus du myocarde (MRR = 1,28 [IC₉₅ : 1,11-1,46]). Le $L_{den,IME}$ n'est pas associé significativement avec la mortalité par accident vasculaire cérébral (MRR = 1,08 [IC₉₅ : 0,97-1,21]).

Les niveaux d'exposition au bruit des avions ($L_{den,IME}$) sont modérément corrélés avec les concentrations en

NO_2 (coefficient de corrélation de Spearman, $r = 0,45$) mais non corrélés avec les concentrations en PM_{10} ($r = 0,06$). La corrélation entre le $L_{den,IME}$ et la concentration de NO_2 est plus faible pour la zone de Paris ($r = 0,26$). Les concentrations en NO_2 et en PM_{10} sont corrélées positivement ($r = 0,64$).

Les associations mises en évidence entre l'augmentation du $L_{den,IME}$ et la mortalité pour toutes les causes de mortalité qui nous intéressent ne changent pas lorsque la concentration en NO_2 est prise en compte dans les modèles (*figure 1*). Utiliser la concentration en PM_{10} plutôt que la concentration en NO_2 ne modifie pas les résultats (non présentés).

Les MRRs ajustés sont plus élevés chez les hommes que chez les femmes. Après ajustement sur la concentration de NO_2 , les MRRs correspondant à une augmentation de 10 dBA du $L_{den,IME}$ sont respectivement chez les hommes et les femmes : 1,29 (IC₉₅ : 1,17-1,42) et 1,12 (IC₉₅ : 1,03-1,23) pour la mortalité par maladie cardiovasculaire ; 1,29 (IC₉₅ : 1,12-1,49) et 1,15 (IC₉₅ : 0,97-1,37) pour la mortalité par cardiopathie ischémique ; et 1,37 (IC₉₅ : 1,11-1,68) et 1,21 (IC₉₅ : 0,94-1,55) pour la mortalité par infarctus du myocarde.

L'indice de Townsend est très corrélé avec l'indice de défaveur obtenu avec l'ACP ($r = 0,85$). L'utilisation alternative de l'indice de Townsend dans les modèles ne change pas les résultats.

L'ajustement sur la zone d'étude ne modifie pas non plus les résultats (*figure 1*). Par ailleurs, les associations mises en évidence entre l'exposition au bruit des avions et la mortalité pour toutes les causes considérées sont similaires lorsque seules les données de la zone de Paris sont utilisées (*figure 1*).

Discussion

L'étude décrite ici est la première étude écologique s'intéressant à la relation entre l'exposition au bruit des avions et la mortalité chez les riverains des aéroports français. Elle couvre 161 communes incluant 1,9 million de riverains des aéroports de Paris-Charles de Gaulle, Lyon-Saint-Exupéry et Toulouse-Blagnac. Des associations positives sont mises en évidence entre l'exposition moyenne des communes au bruit des avions et la mortalité par maladie cardiovasculaire, cardiopathie ischémique et infarctus du myocarde. La prise en compte du statut socio-économique des communes (mesuré par un indice de défaveur), de facteurs démographiques au niveau de la commune (âge et sexe des habitants), et de la mortalité par cancer du poumon (utilisée comme variable d'approximation de la consommation de tabac) ne modifie pas les résultats. Quand les modèles sont stratifiés sur le sexe, les associations sont significatives chez les hommes comme chez les femmes, mais moins fortes chez ces dernières.

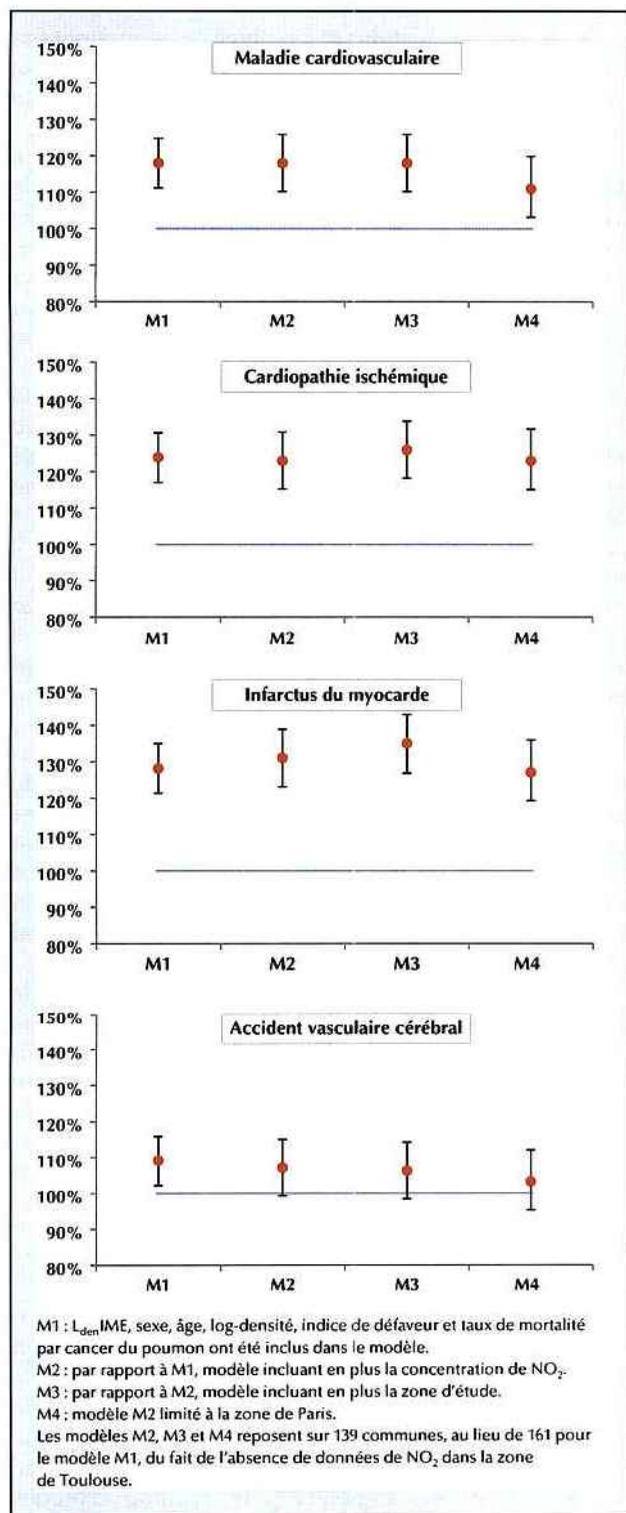


Figure 1. Rapports des taux de mortalité (MRR) pour une augmentation de 10 dBA du $L_{den,IME}$.

Figure 1. Mortality rate ratios (MRR) for a 10-dBA increase in $L_{den,AEI}$.

Les résultats sont inchangés lorsque les modèles sont ajustés sur la zone d'étude ou basés seulement sur les données de la zone de Paris.

Les résultats obtenus ici confirment ceux d'études récentes qui suggèrent que les niveaux élevés d'exposition au bruit des avions sont associés à la mortalité par maladie cardiovasculaire et par cardiopathie ischémique [18] ainsi que par infarctus du myocarde [15]. Par ailleurs, comme Huss *et al.* [15] et Sorensen *et al.* [16], nous n'observons pas d'association significative entre l'exposition au bruit des avions et la mortalité par accident vasculaire cérébral.

La prise en compte de la concentration de NO_2 ou de PM_{10} dans les modèles ne change pas les résultats : la pollution de l'air ne semble pas être un facteur de confusion de la relation entre l'exposition au bruit des avions et la mortalité pour les causes étudiées. Ces résultats sont cohérents avec ceux des études précédentes [14, 15, 18].

La principale force de cette étude réside dans la précision et l'exhaustivité des données de mortalité transmises par le CépiDc-Inserm ainsi que dans le nombre important de décès par maladie cardiovasculaire (7 450) sur une période de quatre ans (2007-2010). Son second intérêt concerne sa méthodologie. En effet, l'approche écologique permet de bénéficier de contrastes d'exposition plus importants entre des unités géographiques qu'entre des individus pour mettre en évidence de faibles associations entre la mortalité et l'exposition au bruit des avions, le $L_{den,IME}$ variant de 42,0 à 64,1 dBA à l'échelle de la commune.

Les données d'exposition au bruit des avions des années 2003, 2004 et 2008 ont été utilisées respectivement pour Lyon-Saint-Exupéry, Toulouse-Blagnac et Paris-Charles-de-Gaulle. Les données de mortalité de la période 2007-2010 examinées nous ont permis de prendre en compte une éventuelle période de latence entre l'exposition et la mortalité, en particulier pour la zone de Paris. Du fait qu'aucune autre donnée d'exposition n'était disponible pour les zones de Lyon et de Toulouse et comme les contours de bruit semblent stables au cours du temps pour la zone de Paris, les cartes de bruit utilisées dans la présente étude peuvent être considérées comme représentatives des années précédant la période couverte par les données de mortalité.

L'utilisation de l'exposition moyenne au bruit des avions des communes pondérée par la population ($L_{den,IME}$) dans les modèles permet de prendre en compte la variabilité de l'exposition à l'intérieur des communes. Il n'existait pas d'alternative pour prendre en compte cette variabilité car les données de mortalité et les données d'exposition au bruit des avions n'étaient pas disponibles à une échelle géographique plus fine que celle des communes.

Dans la présente étude, il n'a pas été possible de dissocier les effets sur la mortalité de l'exposition au bruit des avions la nuit au domicile, de l'exposition pendant la



journée sur le lieu de travail, même s'il aurait été important de le faire. Des études récentes suggèrent en effet que les perturbations du sommeil dues au bruit des avions pourraient jouer le rôle de facteur intermédiaire dans la relation entre l'exposition au bruit et l'altération de la santé, en particulier cardiovasculaire [39, 40]. Cependant, les informations n'étaient pas disponibles pour permettre cette distinction.

La pertinence du L_{den} pour décrire les effets sur la santé de l'exposition au bruit des avions peut être discutable. En effet, cet indicateur ne semble pas être l'indicateur acoustique le plus approprié lorsque l'on s'intéresse aux maladies cardiovasculaires puisqu'il pénalise les expositions de soirée et de nuit, périodes pendant lesquelles le bruit est le plus gênant. Cependant, les cartes de bruit sont produites avec cet indicateur, en application de la Directive européenne n° 2002/49/CE du 25 juin 2002 qui recommande le L_{den} pour l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement. Par ailleurs, pour les études sanitaires, il est actuellement recommandé d'inclure des indicateurs événementiels comme le nombre total de survols d'avions ou le nombre de survols d'avions dépassant un certain seuil de bruit défini par le L_{Amax} [1], en particulier lorsque l'on s'intéresse aux perturbations du sommeil. En complément du L_{den} , il aurait été intéressant de considérer de tels indicateurs dans la présente étude afin d'accroître l'impact de ses résultats. Mais, ces indicateurs ne sont actuellement pas disponibles en France. Ils le seront cependant bientôt pour 100 participants à une étude longitudinale en cours pour laquelle des mesures acoustiques sont réalisées pendant une semaine [41] ce qui permettra de valider l'intérêt de leur utilisation.

Se pose également la question d'une vulnérabilité différente de la population vivant à proximité des aéroports qui pourrait expliquer les associations positives rapportées ici entre l'exposition au bruit des avions et la mortalité. Nous avons pu constater que, d'une part, le fait d'habiter à proximité d'un aéroport n'est pas associé au statut socio-économique dans la présente étude : les pourcentages d'ouvriers et de cadres dans la population active sont très similaires pour les communes de la zone d'étude et pour les communes de la France entière. C'est également le cas du pourcentage de la population ayant un diplôme supérieur au baccalauréat. En outre, l'indice de défaveur obtenu avec l'ACP n'est pas corrélé au L_{den} IME ($r = 0,12$) et l'interaction entre ces variables n'est pas significative dans les modèles. D'autre part, la mobilité résidentielle de la population de la zone d'étude de Paris et de Lyon est légèrement plus faible que celle de la population française dans son ensemble. Elle est légèrement plus élevée dans la zone de Toulouse mais ceci peut être expliqué par le fait que la population de cette zone est plus jeune et plus éduquée que celles des autres zones de l'étude et donc plus encline à déménager.

Un biais de sélection est possible si la population installée à proximité des aéroports est moins sensible aux

effets sanitaires de l'exposition au bruit que la population générale. Les informations disponibles ne permettent pas de vérifier ni d'écarter l'existence d'un tel biais qui conduirait probablement à sous-estimer les effets du bruit.

L'association écologique entre l'exposition moyenne pondérée au bruit des avions et la mortalité à l'échelle de la commune peut être différente de la relation au niveau individuel [42]. Cette problématique a été particulièrement discutée dans le cas où il existe un important facteur de risque individuel pour une pathologie, comme par exemple la consommation de tabac ou un régime alimentaire riche en graisse pour les maladies cardiovasculaires. Dans la présente étude, il n'a pas été possible d'obtenir des informations sur de tels facteurs ni au niveau individuel ni à l'échelle de la commune. Nous avons utilisé la mortalité par cancer du poumon comme variable d'approximation de la consommation de tabac à l'échelle de la commune. Cependant, alors qu'il est établi que la consommation de tabac est associée au statut socio-économique [43], le fait de résider à proximité d'un aéroport ne l'est pas dans la présente étude, aussi est-il peu vraisemblable que la consommation de tabac soit un facteur de confusion dans la relation entre l'exposition au bruit des avions et la mortalité observée.

La possibilité que les associations observées dans la présente étude soient dues en partie à des facteurs de confusion non mesurés qui auraient des distributions géographiques similaires à celle de l'exposition au bruit des avions ne peut être exclue. Cependant, nous avons tenté de limiter ces biais en introduisant un certain nombre de facteurs de confusion potentiels quand l'information était disponible.

Il sera prochainement possible de valider ces résultats observés à l'échelle de la commune à partir de ceux obtenus au niveau individuel dans une étude longitudinale actuellement en cours en France qui recueille notamment des informations sur des facteurs de confusion comme la consommation de tabac [41].

Conclusions

La présente étude écologique a montré des associations positives et significatives entre l'exposition moyenne au bruit des avions des communes et la mortalité par maladie cardiovasculaire, cardiopathie ischémique et infarctus du myocarde, même après prise en compte des facteurs de confusion, et de la pollution de l'air en particulier. Cependant, le nombre d'études s'intéressant à la relation entre l'exposition au bruit des avions et la mortalité est clairement insuffisant et leurs résultats ne sont pas complètement consistants. C'est la raison pour laquelle d'autres études individuelles sont nécessaires pour mieux comprendre les associations mises en évidence dans le présent article. ■



Remerciements et autres mentions

L'Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires (Acnusa) a fait appel à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) pour réaliser la présente étude. Nous les remercions pour leur confiance.

Les auteurs sont reconnaissants à Grégoire Rey et Mireille Eb (CépiDc-Inserm) pour avoir transmis les données de mortalité de la base du Centre d'épidémiologie

sur les causes médicales de décès de l'Inserm, ainsi qu'à Aéroports de Paris et à la Direction générale de l'aviation civile pour leur avoir procuré les cartes d'exposition au bruit produites avec le logiciel *Integrated Noise Model*. Les auteurs remercient également Airparif et Air Rhône-Alpes pour avoir fourni les données de pollution.

Financement : la présente étude a été financée par des subventions du ministère de la Santé, du ministère de l'Environnement et de la Direction générale de l'aviation civile ; **liens d'intérêts** : aucun.

Références

1. Lekaviciute J, Kephelopoulou S, Stansfeld SA, Clark C. *Final Report of the ENNAH (European Network on Noise and Health) project, FP7-ENV-2008*. European Commission, Joint Research Centre. Report no 226442. 2013.
2. Babisch W, Houthuijs D, Pershagen G, et al. Annoyance due to aircraft noise has increased over the years: results of the HYENA study. *Environ Int* 2009 ; 35 : 1169-76.
3. Miedema HME, Vos H. Noise sensitivity and reactions to noise and other environmental conditions. *J Acoust Soc Am* 2003 ; 113 (3) : 1492-504.
4. Brown AL, van Kamp I. Response to a change in transport noise exposure: a review of evidence of a change effect. *J Acoust Soc Am* 2009 ; 125 (5) : 3018-29.
5. Brown AL, Van Kamp I. Response to a change in transport noise exposure: competing explanations of change effects. *J Acoust Soc Am* 2009 ; 125 (2) : 905-14.
6. Griefahn B. Environmental noise and sleep. Review - Need for further research. *Applied Acoustics* 1991 ; 32 (4) : 255-68.
7. Jones K. *Aircraft noise and sleep disturbance: a review*. ERCD REPORT 0905. London: 2009.
8. Hume K. Sleep disturbance due to noise: current issues and future research. *Noise Health* 2010 ; 12 (47) : 70-6.
9. Babisch W. Updated exposure-response relationship between road traffic noise and coronary heart diseases: a meta-analysis. *Noise Health* 2014 ; 16 : 1-9.
10. Eriksson C, Rosenlund M, Pershagen G, Hilding A, Ostenson C, Bluhm G. Aircraft noise and incidence of hypertension. *Epidemiology* 2007 ; 18 (6) : 716-21.
11. Babisch W, van Kamp I. Exposure-response relationship of the association between aircraft noise and the risk of hypertension. *Noise Health* 2009 ; 11 (44) : 161-8.
12. Jarup L, Babisch W, Houthuijs D, et al. Hypertension and exposure to noise near airports: the HYENA study. *Environ Health Perspect* 2008 ; 116 (3) : 329-33.
13. Rosenlund M, Berglund N, Pershagen G, Jarup L, Bluhm G. Increased prevalence of hypertension in a population exposed to aircraft noise. *Occup Environ Med* 2001 ; 58 (12) : 769-73.
14. Correia AW, Peters JL, Levy JJ, Melly S, Dominici F. Residential exposure to aircraft noise and hospital admissions for cardiovascular diseases: multi-airport retrospective study. *BMJ* 2013 ; 347 : f5561.
15. Huss A, Spoerri A, Egger M, Röösli M. Aircraft noise, air pollution, and mortality from myocardial infarction. *Epidemiology* 2010 ; 21 (6) : 829-36.
16. Sorensen M, Hvidberg M, Andersen ZJ, et al. Road traffic noise and stroke: a prospective cohort study. *Eur Heart J* 2011 ; 32 (6) : 737-44.
17. Gan WQ, Davies HW, Koehoorn M, Brauer M. Association of long-term exposure to community noise and traffic-related air pollution with coronary heart disease mortality. *Am J Epidemiol* 2012 ; 175 (9) : 898-906.
18. Hansell AL, Blangiardo M, Fortunato L, et al. Aircraft noise and cardiovascular disease near Heathrow airport in London: small area study. *BMJ* 2013 ; 347 : f5432.
19. Raaschou-Nielsen O, Andersen ZJ, Jensen SS, et al. Traffic air pollution and mortality from cardiovascular disease and all causes: a Danish cohort study. *Environmental Health* 2012 ; 11 : 60.
20. Brook RD, Rajagopalan S, Pope III CA, et al. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* 2010 ; 121 (21) : 2331-78.
21. Rosenlund M, Bellander T, Nordquist T, Alfredsson L. Traffic-generated air pollution and myocardial infarction. *Epidemiology* 2009 ; 20 : 265-71.
22. Direction du transport aérien. *Activité des aéroports français. Année 2011*. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, Direction générale de l'aviation civile, 2012: 169.
23. Federal Aviation Administration. *Integrated Noise Model (INM) Version 7.0 User's Guide*. 2007.
24. European Union. *Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise*. The European Parliament and the Council of the European Union: Official Journal of the European Communities. 2014. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32002L0049>.
25. Selander J, Nilsson ME, Bluhm G, et al. Long-term exposure to road traffic noise and myocardial infarction. *Epidemiology* 2009 ; 20 (2) : 272-9.
26. Raaschou-Nielsen O, Andersen ZJ, Jensen SS, et al. Traffic air pollution and mortality from cardiovascular disease and all causes: a Danish cohort study. *Environmental Health* 2012 ; 11 : 60.



27. Carugno M, Consonni D, Randi G, et al. Air pollution exposure, cause-specific deaths and hospitalizations in a highly polluted Italian region. *Environmental Research* 2016 ; 147 : 415-24.
28. Townsend P. Deprivation. *Journal of Social Policy* 1987 ; 16 : 125-46.
29. Havard S, Deguen S, Bodin J, Louis K, Laurent O, Bard D. A small-area index of socioeconomic deprivation to capture health inequalities in France. *Social Science & Medicine* 2008 ; 67 : 2007-16.
30. Ghosn W, Kassié D, Jouglu E, Salem G, Rey G, Rican S. Trends in geographic mortality inequalities and their association with population changes in France, 1975-2006. *The European Journal of Public Health* 2013 ; 23 (5) : 834-40.
31. Rey G, Jouglu E, Fouillet A, Hémon D. Ecological association between a deprivation index and mortality in France over the period 1997 – 2001: variations with spatial scale, degree of urbanicity, age, gender and cause of death. *BMC Public Health* 2009 ; 9 : 33.
32. Hastie T, Tibshirani R. *Generalized additive models*. Chapman and Hall, 1990.
33. Wood Simon N. *Generalized additive models: an introduction with R*. Chapman and Hall/CRC Press, 2006.
34. McCulloch CE, Searle SR. *Generalized, linear and mixed models*. New York : Wiley, 2001.
35. ESRI (Environmental Systems Research Institute). *ArcGIS for Desktop 10.1*. Redlands, California : 2012.
36. SAS Software [program]. *Version 9.3 version*. Cary NC, USA: 2011.
37. R. Foundation. *A language and environment for statistical computing [program]*. 2.14.0 version. Vienna, Austria : R Foundation for Statistical Computing, 2011.
38. Wood Simon N. *mgcv R package*. CRAN, 2013.
39. Haralabidis AS, Dimakopoulou K, Vigna-Taglianti F, et al. Acute effects of night-time noise exposure on blood pressure in populations living near airports. *European Heart Journal* 2008 ; 29 (5) : 658-64.
40. Greiser E, Greiser C, Janhsen K. Night-time aircraft noise increases the prescription for antihypertensive and cardiovascular drugs irrespective of social class – the Cologne-Bonn Airport study. *J Public Health* 2007 ; 15 : 327-37.
41. Evrard AS, Khati I, Champelovier P, Lambert J, Laumon B. *Health effects of aircraft noise near three French airports: results from a pilot epidemiological study of the DEBATS study. Internoise proceedings*. New-York : 2012.
42. Elliott P, Wakefield J, Best N, Briggs DJ. *Spatial epidemiology: methods and applications*. Oxford, United Kingdom : Oxford University Press, 2000.
43. Guignard R, Beck F, Richard JB, Peretti-Watel P. *Le tabagisme en France : analyse de l'enquête Baromètre santé 2010*. Saint-Denis : Inpes, collections Baromètres santé, 2013.