

Nuisances sonores et pollutions atmosphériques autour des aéroports franciliens

Cas de l'aérodrome de Paris – Orly

Lucas Abdoul Rahim KANTAGBA

Mémoire de Master 2 : Géomatique appliquée aux études urbaines et aux risques

Sous la direction de : Jean Baptiste FRETIGNY et Anne-laure VERNEIL

Date de soutenance : 6 juillet 2020

Membres du jury :

Jean Baptiste FRETIGNY Maître de conférences en Géographie à CY Cergy Paris Université

Didier DESPONDS Professeur en Géographie à CY Cergy Paris Université

Avant-propos

J'ai été accueilli en tant qu'alternant chargé d'études environnementales au sein du pôle bruit de l'Autorité de Contrôle des Nuisances Aéroporutaires. Cette alternance s'inscrit dans le cadre de mon Master 2 : « Géomatique appliquée aux études urbaines et aux risques ». Elle s'est étalée sur la période du 3 octobre 2019 au 30 septembre 2020.

Tout au long de cette période d'apprentissage, j'ai été encadré par Anne-Laure VERNEIL, responsable du pôle bruit. J'ai ainsi été initié aux problématiques de l'acoustique à travers la manipulation des données relatives au bruit. Par la suite, mes travaux se sont essentiellement axés sur :

- La production, à l'aide d'un outil SIG (ArcGis), d'études relatives à l'évaluation des nuisances sonores et de la gêne via le traitement de données sociodémographiques spatialisées, trajectographiques et acoustiques ;
- L'analyse de dossiers d'études relatives aux plaintes des riverains ;
- La réalisation d'analyses cartographiques concernant les plans et programmes afférant au bruit d'avion aux abords des plateformes aéroporutaires ;
- La réalisation d'études statistiques de données d'émissions acoustiques des aéronefs.
- Un travail de constitution d'une base de données des plots de trajectoires d'aéronefs à partir des fichiers asterix fournis par les aéroports et l'aide du logiciel Elvira.

Dans le cadre de mon mémoire, étant au pôle bruit de l'ACNUSA, il est apparu intéressant d'axer ma réflexion sur les questions relatives aux impacts des nuisances sonores et polluants atmosphériques émis par les aéronefs aux alentours de la plateforme aéroporutaires de Paris-Orly.

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier toute l'équipe du Master Géomatique appliquée aux études urbaines et aux risques de CY Cergy Paris Université, Jean-Baptiste FRETIGNY et Damien MASSON, professeurs, intervenants, Madame BIGOURIE et les étudiants qui m'ont accompagné tout au long de ces deux années. Deux années enrichissantes à travers de nombreuses expériences qui m'ont permis d'avoir une vision assez large de la géomatique. Aujourd'hui c'est un sentiment de fierté qui m'anime et me motive à œuvrer toujours dans ce sens.

Merci à Monsieur Jean-Baptiste FRETIGNY, professeur, jury de mémoire, encadrant de mémoire pour la rigueur, le partage d'expérience et sa disponibilité. Merci de m'avoir rassuré, conseillé et fait confiance non seulement pour la rédaction de ce mémoire mais aussi pour ces deux années passées à CY Cergy Paris Université. Sa bienveillance a été d'une grande importance.

A Monsieur Didier DESPONDS, merci d'avoir accepté de faire partie des membres du jury.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance et ma gratitude à Anne-Laure VERNEIL, ma responsable d'apprentissage, pour sa disponibilité, sa pédagogie et son amabilité. Merci pour le partage d'expérience sur tout ce qui concerne les nuisances aéroportuaires et aussi pour m'avoir donné cette chance d'apprendre avec elle. Elle a su m'orienter et me conseiller dans ma démarche d'études et d'analyses.

A Alvin MERALLY, Thomas COLIN et Nathalie GUITTARD pour leurs conseils et appuis techniques tout au long de cet apprentissage.

Mes remerciements vont également à l'endroit de toute l'équipe de l'ACNUSA qui m'a accueilli dans un cadre conviviale où l'ambiance rythme avec le travail. Toute expérience professionnelle façonne notre personnalité et là, j'ai beaucoup appris auprès d'eux.

Enfin, je remercie du fond du cœur ma sœur et mes parents, pour leur soutien incommensurable et inconditionnel durant ces deux années. Merci d'être toujours présents dans ma vie.

Résumé

Bien que les effets de la crise sanitaire COVID-19 ne soient pas encore bien appréhendés et puissent mettre en cause les prévisions, un accroissement important du trafic aérien mondial est attendu au cours des prochaines décennies. Cela ne sera pas sans conséquence sur l'environnement. De fait, la question de l'impact sur la qualité de l'air et les nuisances sonores émises par les aéronefs se pose. Face aux nombreuses études d'expert internationaux mettant en évidence des impacts sanitaires et les plaintes récurrentes des populations riveraines des aéroports, les politiques portent une attention particulière aux effets néfastes liés au bruit des avions et aux polluants atmosphériques qu'ils engendrent. Dans ce contexte, il nous est apparu pertinent de nous interroger d'une part sur la manière dont les nuisances sonores et les particules fines émises par les aéronefs impactent la qualité de vie des riverains des aéroports ; et d'autre part sur les relations entre nuisances environnementales et inégalités sociales des populations concernées.

Ce mémoire a pour objectif d'analyser les relations entre les nuisances sonores et les polluants atmosphériques sur la qualité de vie des riverains vivant autour de l'aérodrome de Paris-Orly. Pour cela, une méthodologie utilisant des données socioéconomiques, démographiques, de bruit et de la qualité de l'air combinée aux outils de systèmes d'informations géographiques a été développée.

Mots clés : nuisances sonores – polluants atmosphériques – aéronefs – aérodrome – défaveur sociale - inégalités sociales

Abstract

Although the effects of the COVID-19 health crisis are not quite apprehended yet, a significant increase of the air transport is expected over the next few decades. This will not happen without consequences for the environment. Indeed, the question of the impact on air quality and noise pollution emitted by aircraft arises. Having the international expert studies highlighted the health impact and since the regular complaints of people living near airports, policies are specifically taking into consideration the harmful effects of air and noise pollution.

In this context, it appeared relevant that we precisely question the way in which noise pollution and fine particles generated by aircraft impact the quality of life of people living near airports; on the relationship between environmental pollution and social inequalities of the populations concerned.

This essay modestly aim to analyse the relationship between noise pollution and air pollutants on the quality of life of residents around Paris-Orly airport.

For this purpose, a methodology using socio-economic, demographic, noise and air quality data combined with geographic information system tools has been developed.

Keywords: noise pollution - air pollutants - aircraft - airport - social deprivation - social inequalities

SOMMAIRE

Avant-propos	2
Remerciements.....	3
Résumé	4
Glossaire	2
INTRODUCTION	4
1 Première Partie : Le bruit et la qualité de l'air, des nuisances environnementales pour la société	5
1.1 La notion de bruit	6
1.2 La qualité de l'air	18
1.3 Les principaux indicateurs de la pollution des aéronefs	23
2 Deuxième Partie : Méthodologie d'étude et d'analyse	29
2.1 Terrain d'étude	29
2.2 Le concept de défaveur sociale	30
2.3 Les indices de défaveur sociale	31
2.4 Choix et construction de l'indicateur de défaveur sociale, et données environnementales utilisées pour l'analyse	36
2.5 Croisement des variables socioéconomiques avec les données d'exposition au bruit	44
2.6 Croisement des données liées à la qualité de l'air (NO₂, PM10) et aux nuisances sonores avec les variables socio-économiques (indice FDep)	45
2.7 Croisement des données relatives aux bruits et à la qualité de l'air (NO₂, PM10, PM2.5) avec celle des Etablissements sensibles	47
3 Troisième Partie : Discussions des résultats	49
3.1 Exposition des populations au bruit	49
3.2 Exposition des populations aux polluants atmosphériques (NO₂ et PM10)	50
3.3 Exposition des établissements sensibles situés dans le Plan de Gêne Sonore	51
3.4 Discussion des résultats	53
CONCLUSION	55
Bibliographie	56
Liste des Tableaux	63
Liste des figures	63
ANNEXES	64

Glossaire

AASQUA :	Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l’Air
ACNUSA :	Autorité de Contrôle des Nuisances Aéroportuaires
ACP :	Analyse en Composante Principale
ADVOCNAR :	Association de Défense Contre les Nuisances Sonores
AITA :	Association Internationale de l’Aviation civile
CAH :	Classification Ascendante Hiérarchique
CNG :	Community Noise Guideline
CNR :	Composite Noise Rating
CSNA :	Collectif de Santé des Nuisances Aériennes
CO :	Monoxyde de Carbone
CO₂ :	Gaz carbonique
COV :	Composé Organique Volatile
CRESSON :	Centre de Recherche sur l’Espace Sonore
CRETEIL :	Centre de Recherche Espaces Transports Environnement et Institutions Locales
CIRE :	Cellule d’Intervention en Région
dB :	Décibel
EDI :	European Deprivation Index
EFL :	English First Language
EPNL :	Effective Perceived Noise Level
ESL :	English Second Language
DGAC :	Direction Générale de l’Aviation Civile

DSNA :	Direction des Services de la Navigation Aérienne
HYENA :	HYpertension and Exposure to Noise near Airports
IRIS :	Ilots Regroupés pour l'Information Statistique
INSEE :	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
INSERM :	Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale
INVS :	Institut de Veille Sanitaire
LAURE :	Loi sur l'Utilisation Rationnelle de l'Energie
LTO :	Landing-Take-Off
NNG :	Night Noise Guidelines for Europe
NNI :	Noise Number Index
NO_x :	Oxyde d'azote
NO₂ :	Dioxyde d'azote
O₃ :	Ozone
OACI :	Organisation de l'Aviation Civile
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
PGS :	Plan de Gêne Sonore
PM₁₀ :	Particule de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm
PNL :	Perceived Noise Level
RANCH :	Road Traffic and Aircraft Noise and Children's Cognition and Health
RGP :	Recensement Général de la Population
SIG :	Système d'Information Géographique
SO₂ :	Dioxyde de soufre

INTRODUCTION

Partout dans le monde, le secteur aéroportuaire connaît de profondes mutations. Face à la libéralisation du transport aérien, de nombreuses plateformes continuent de se développer en raison d'une augmentation du nombre de passagers et des mouvements d'avions et du volume de fret. Pourtant, les mouvements des aéronefs (notamment décollages et atterrissages) et les différentes opérations effectuées ne sont pas sans conséquences sur l'environnement. En île de France, le centre de l'évaluation technique de l'environnement sonore (Bruitparif) estimait à 1,9 millions (soit 16% de la population), le nombre de franciliens exposés aux nuisances sonores aéroportuaires¹. C'est dans cette logique que ce mémoire vise à réaliser une analyse des nuisances sonores et des polluants atmosphériques (NO₂, PM10) émises par les aéronefs sur la qualité de vie des riverains se trouvant autour des espaces survolés par les avions opérant à Paris-Orly. Cette analyse peut être qualifiée comme non exhaustive au sein de la population francilienne car, compte tenu de diverses contraintes, l'approche utilisée est quantitative. L'objectif visé est d'identifier les associations qui peuvent s'établir entre les nuisances sonores et les polluants atmosphériques émis par les aéronefs d'une part, et une forme d'inégalité sociale d'autre part. L'analyse des relations qui existent entre les sociétés et leur milieu constitue une piste pertinente pour étudier les inégalités du point de vue géographique. De ce fait, il sera question d'étudier comment les nuisances sonores et les polluants atmosphériques (NO₂, PM10) émis par les aéronefs impactent le bien être des riverains autour des aéroports, et quelles relations lient ces nuisances aux inégalités sociales des populations concernées.

Afin de mener à bien cette étude, des hypothèses ont été émises :

- **Hypothèse 1** : Les riverains situés autour des aéroports franciliens sont exposés de manière homogène à la gêne sonore et aux polluants atmosphériques bien qu'ils appartiennent à des catégories socioéconomiques différentes
- **Hypothèse 2** : Le niveau de défaveur sociale des riverains habitant dans les zones survolées par les aéronefs est un indicateur qui accentue le risque d'exposition aux nuisances sonores et aux particules fines.

¹ « Exposition au bruit aérien en île de France ». Etude réalisée par Bruitparif. Document disponible

- **Hypothèse 3** : Les établissements sensibles recevant du public sont susceptibles d'être soumis à des doubles expositions influant sur la qualité d'apprentissage et de soin des populations concernées.

Pour confirmer ou infirmer ces hypothèses le mémoire sera organisé de la manière suivante :

La première partie porte sur l'état de l'art et les concepts fondamentaux à mobiliser autour du bruit des avions et des polluants (NO₂, PM10). Il s'agit de définir les concepts clés sur lesquels s'articulent ce rapport, les principaux indicateurs et les principaux polluants utilisés respectivement pour les nuisances sonores et la qualité de l'air, la prise en compte des populations qui sont relativement exposées et les répercussions sanitaires que cela peut impliquer.

La seconde partie concerne les études qui font l'objet de ce mémoire, c'est-à-dire la méthode d'analyse de l'exposition des populations et des établissements sensibles. Cette partie s'intéresse essentiellement aux nuisances environnementales définies comme facteur renforçant les inégalités sociales. Le bien être des riverains résidant dans les zones survolées par les aéronefs semble essentiellement impacté par diverses nuisances environnementales. Ainsi, l'analyse des populations appartenant à des classes socio-économiques variées, exposées au bruit des avions et aux polluants atmosphériques définis, permettra de vérifier nos hypothèses de recherche. Pour cela, nous aborderons la notion de défaveur sociale, concept clé qui intervient dans les analyses liées aux inégalités sociales. Plusieurs indices permettent de traduire cette notion. Mais, le choix de l'indicateur pertinent traduisant la défaveur sociale sera argumenté. Certaines variables socio-économiques traduisant l'inégale répartition des riverains dans le temps et dans l'espace permettront d'aboutir au calcul de cet indicateur.

La troisième partie est consacrée à l'analyse des résultats issus des différents croisements de données qui seront réalisés

1 Première Partie : Le bruit et la qualité de l'air, des nuisances environnementales pour la société

1.1 La notion de bruit

1.1.1 Définition

Le bruit peut être défini comme un ensemble de bandes sonores se propageant à des fréquences et des niveaux de puissances variées. Il est également qualifié de son indésirable en fonction de la perception de chaque individu.

Selon la norme NF 530-105 de l'Association Française de Normalisation, est bruit « toute sensation auditive désagréable ou gênante, tout phénomène acoustique produisant cette sensation, tout son ayant un caractère aléatoire qui n'a pas de composantes définies » (Jaworski 2012).

Le bruit émis par les aéronefs est l'un des impacts environnementaux majeurs de ce mode de transport, et en fait un enjeu important en termes de santé publique et de qualité de vie des riverains. En effet, il peut influencer le bien-être des populations, perturber le sommeil, accroître le risque cardio vasculaire ou encore nuire à la capacité d'attention des élèves (Basner et al. 2017).

1.1.2 Le bruit des aéronefs : Etat de connaissance

En Allemagne, entre les années 1984 et 1995, l'Agence fédérale pour l'environnement² menait une enquête sur sa population afin de connaître leur rapport à l'exposition du bruit des aéronefs. Au terme de cette étude comme l'illustre la figure 1 ci-dessous, les résultats ont révélé que la moitié de la population Ouest allemande était gênée par le bruit des transports aériens, deux personnes sur trois par le bruit des transports routiers, et un cinquième par ceux provenant des transports ferroviaires (Schade 2003). En France, au Pays-Bas, et dans d'autres pays les contestations demeurent. Les aéroports font face à d'énormes difficultés lorsqu'ils prennent l'initiative d'intensifier le trafic. Ce fut le cas lors de la construction historique d'un nouveau terminal à Londres Heathrow qui a suscité 6 ans de discussions, la complexité de la réalisation d'une piste supplémentaire à Boston Logan en 1973 ou encore l'échec emblématique de

² Umweltbundesamt - Agence fédérale de protection de l'environnement (Allemagne) 1995a. *Jahresbericht 1995*, Berlin, epa.

l'implantation du géant américain DHL à Strasbourg qui a poussé environ 15.000 personnes et 24 associations de riverains à manifester (Dorier-Aprill 2006).

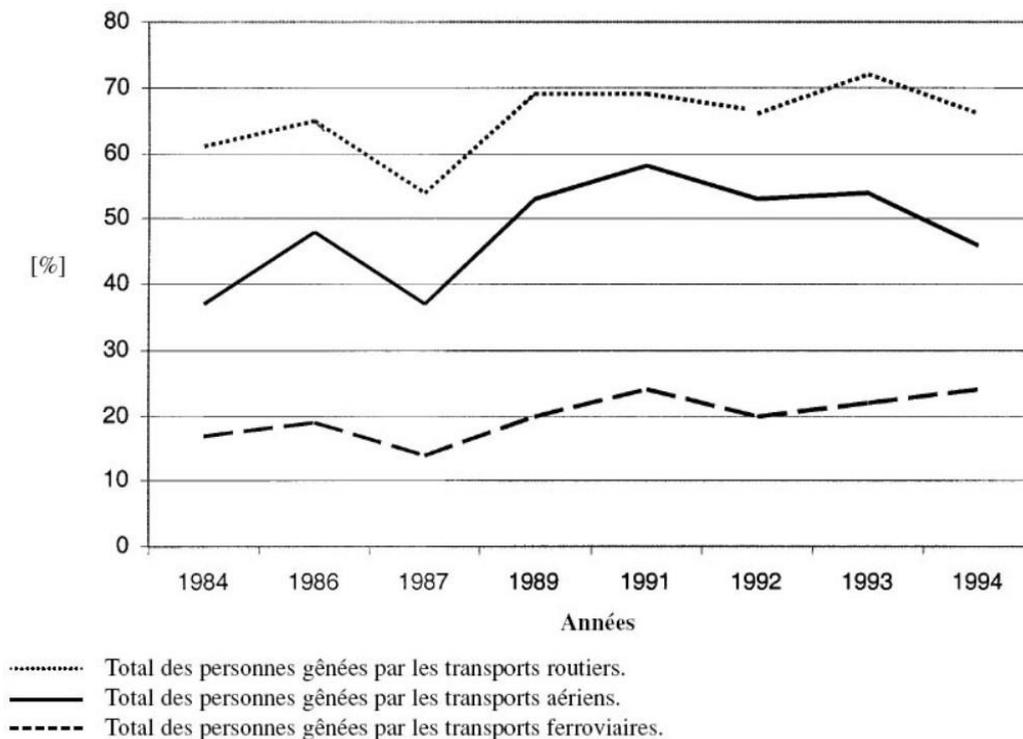


Figure 1 : résultats de l'enquête sur les nuisances sonores en Allemagne
Source : Agence fédérale de protection de l'environnement (Allemagne, 1995)

Aux Etats-Unis; plus de 50 aéroports, dont les tous premiers mondiaux en nombre de passagers (Chicago O'Hare, l'aéroport international de Los Angeles, l'aéroport de San Francisco...), sont pris dans des tourmentes juridiques et des conflits ouverts (Faburel 2003a).

En Europe, Amsterdam- Schiphol, l'aéroport de Bruxelles, celui de Francfort, de Zurich ainsi que plusieurs aéroports français, tels Roissy – Charles de Gaulle, Lyon - Saint-Exupéry et Paris-Orly ont également alimenté des tensions entre associations de riverains et acteurs du secteur aéroportuaire.

En Australie, l'aéroport de Sydney (Kingsford Smith) a connu quelques périodes de tourment au cours des années 1990.

Le Japon qui avait jusque-là échappé à ce type conflits est aujourd'hui confronté à l'émergence d'oppositions depuis la construction de l'aéroport du Kansai.

Par ailleurs, « *les autorités publiques se heurtent aussi à des contestations de plus en plus rudes autant à l'occasion de choix d'implantations aéroportuaires, comme le déroulement du débat sur le troisième aéroport francilien l'a montré de façon saisissante, qu'à l'occasion de*

"simples" modifications de trajectoires, à l'exemple des réactions suscitées en Ile-de-France » (Faburel 2003b).

Des oppositions existent un peu partout dans le monde mais cette fois sur les questions relatives à la transparence au niveau de l'utilisation des données acoustiques sur le bruit des aéronefs. En effet, du retour d'expérience des riverains, la représentation du niveau de bruit par les données acoustiques recueillies n'exprime pas les réalités du terrain. En France, Jacques François en étudiant les répercussions du bruit d'avions sur l'équilibre des riverains des aéroports (1976) estimait qu'il existait une faible relation entre les attributs physiques des sons et la gêne ressentie par les riverains. De plus en 1995, Dominique Aubrée constatait que « le bruit mesuré par les [acousticiens] n'est pas celui dont se plaignent les personnes, les habitants ou usagers qui sont sollicités dans les sondages ou enquêtes »³. Aussi, l'ACNUSA créé en 1999 comme autorité indépendante, va jouer un rôle clé dans le dialogue entre les riverains et les aéroports.

Les travaux du Centre de Recherche Espaces Transports Environnement et Institutions Locales (CRETEIL) et du Centre de Recherche sur l'Espace Sonore et l'environnement urbain (CRESSON) menés autour des conflits aéroportuaires confirmaient la récurrence du questionnement sur le mode de production des données au sein des plateformes aéroportuaires. Ainsi, l'utilisation des outils de mesures, les méthodes de modélisations, le critère de choix des indicateurs font l'objet d'une demande d'éclaircissement entre acteurs territoriaux et associations de riverains. Le vécu du bruit par les riverains est-il mesurable ? La notion de gêne ressentie est-elle quantifiable ?

M. Leroux à travers ces écrits estime que la notion de gêne « *ne peut être considérée comme une variable mesurable et strictement objectivable mais comme une construction sociale complexe* »⁴. Il s'intéresse en ces termes à la représentation de la gêne sonore. Toujours dans le même sens, les recherches menées par le CRESSON dans un contexte de gestion concertée sur le bruit des avions, arrivent à dépeindre la situation. Pour cela, l'étude analyse des entretiens auprès de douze acteurs concernés par le dossier Paris-Charles de Gaulle.

³ Aubrée D., « Quand vous parlez du bruit, qu'entendez-vous ? Acoustique et Techniques », n° 3, pp 19-23, octobre 1995

⁴ Leroux M., 2003, « Vers une charte intersonique », Espaces et Sociétés n°115 - Ambiances et espaces sonores

Aussi, le CRETEIL, en s'appuyant sur l'étude menée par Guillaume Fabruel spécialisé dans les relations entre aéroports et territoire, définit le vécu du bruit comme « une somme d'effets humains et sociaux, à forte dimension spatiale (gêne sonore, mobilité résidentielle des ménages, valeurs immobilières, impacts des dispositifs techniques d'action...), qui génère des coûts sociaux dès lors territorialisés ».

Concernant la gêne sonore, l'analyse doit, selon G. Faburel, s'enrichir des composantes du vécu territorialisé du bruit et alors aussi des pratiques sociales spatialisées que celui-ci implique, pour réellement saisir la signification sociale des nuisances et de leur expression territoriale : gêne, plaintes, oppositions aux projets, revendications. Il y a donc nécessité de faire du concept de territoire et de la notion d'externalité les creusets à la fois de recherches interdisciplinaires, mais aussi de compréhension opérationnelle du bruit et des réactions que ses effets suscitent.

Bien que toutes ces études et analyses relatent les situations conflictuelles qui existent autour du bruit des aéronefs, l'unanimité ne semble pas encore être trouvée.

Le sujet est transposable à une autre échelle : celle des établissements sensibles et en particulier les infrastructures scolaires situées dans le couloir aérien des zones survolées. Cela s'explique par le fait que contrairement aux adultes, les enfants ont du mal à exprimer leur réaction de gêne au bruit des avions. Leurs capacités à se protéger contre les nuisances sonores est assez faible. De plus, des baisses de performances académiques ont été relevées chez certains enfants en milieu scolaire du fait de leur exposition au bruit aérien. Ils constituent ainsi une part de population vulnérable à prendre en considération.

De nombreuses études littéraires établissent un lien entre l'exposition chronique au bruit et à la gêne, les problèmes de mémoires, d'attentions et de compréhension du texte. De plus, certaines recherches démontrent que les enfants exposés pendant longtemps au bruit des avions dans les écoles présentent des niveaux de stress plus élevés, en plus des mauvaises performances en mathématiques et en lecture. Dans certains projets développés en Europe, des tests cognitifs ont été soumis aux enfants dans le but de comprendre si le bruit des avions pouvait entraver leur apprentissage.

Une première étude est menée sur les performances cognitives des élèves (Hygge, Evans, et Bullinger 2002). Avant l'ouverture du nouvel aéroport international de Munich et l'arrêt de fonctionnement de l'ancien aéroport, les enfants habitant autour des deux sites étaient recrutés et scindés en différents groupes. D'une part, un groupe exposé au bruit (bruit d'avion émis continuellement ou en attente) et d'autres part, un groupe de contrôle sans bruit d'avion

(étroitement liés au statut socio-économique). Au total, 326 enfants (âgés d'environ 10 ans) ont participé à trois vagues de collecte de données, une avant et deux après l'ouverture officielle du nouvel aéroport.

Pour cette étude, un groupe d'enfant a été exposé au bruit des avions et un autre groupe de contrôle sans bruit, cela avant l'ouverture du nouvel aéroport international de Munich et l'arrêt de fonctionnement de l'ancien aéroport. Ces études ont pu révéler des problèmes de concentrations et de compréhensions de la lecture chez les enfants.

Une seconde étude initiée par le Road Traffic and Aircraft Noise and Children's Cognition and Health⁵ a relaté également l'effet du bruit sur le développement cognitif des enfants.

En revanche, un autre projet d'étude mené par une équipe de recherche pluridisciplinaire (S. A. Stansfeld et al. 2005) a travaillé sur la relation entre l'exposition à ces bruits aériens et les performances cognitives des enfants. Ils ont trouvé qu'il n'y avait pas d'association entre l'exposition chronique au bruit des avions ou au bruit de la circulation routière avec le score total issu du questionnaire « Forces et Difficultés » (SDQ), largement utilisé pour détecter la morbidité psychologique des enfants de 3 à 16 ans. En effet, le bruit des avions et aussi celui de la circulation routière ne semblent pas affecter l'état de performance globale, ni l'attention et l'état de santé auto-déclaré des élèves. Ils ont mis en évidence les associations entre le bruit des avions et une diminution de la compréhension de la lecture ainsi qu'une diminution de la mémoire de reconnaissance, après avoir pris en compte les facteurs socio-économiques et les travaux d'insonorisation de la salle de classe au bruit. Ils considèrent l'exposition chronique au bruit des avions comme étant un agent stressant environnemental qui peut affecter le développement cognitif de l'enfant, en particulier la compréhension de la lecture. Leurs travaux indiquent qu'il n'y a pas de niveau sonore seuil au-dessus duquel les effets négatifs du bruit sur les performances cognitives commencent. Toutefois, ils notent que la réduction de l'exposition au bruit des aéronefs devrait conduire à une amélioration de la compréhension de la lecture. Une augmentation de 5 décibels (dB) de l'exposition au bruit des avions a été associée à un retard de deux mois dans l'âge de la lecture au Royaume-Uni et à un retard d'un mois aux Pays-Bas.

⁵ Road Traffic and Aircraft Noise Exposure and Children's Cognition and Health: Exposure-Effect Relationships and Combined Effects. [Document](#) accessible

A travers les deux projets évoqués précédemment, nous constatons que l'étude de la relation entre l'exposition au bruit des avions et les performances cognitives des enfants a beaucoup été expérimentée. Cependant qu'en est-il réellement de la notion de gêne ressentie par les écoliers ?

La question du ressenti du bruit par les enfants faisant allusion à la gêne créée par les nuisances aéroportuaires semble très peu abordée dans les travaux littéraires. Mais certaines études comme le « Children' annoyance reactions to aircraft and road traffic noise » (van Kempen et al. 2009) ont eu pour but d'analyser les relations qui peuvent être établies entre : les réactions d'agacements ou de gêne des enfants, l'exposition aux nuisances sonores aériennes et du trafic routier en milieu scolaire et à la maison. Pour cela, ils s'appuient sur les données collectées autour des trois aéroports lors du projet RANCH qui déterminent le premier objectif de leur étude. Le deuxième objectif était de comparer les réactions de gênes ressenties par les enfants à celle de leurs parents. Comme méthodologie, ils décident de soumettre un questionnaire aux enfants sur la gêne dans le cadre d'une session de test de groupe de 2h qui comprenait également divers tests sur papiers mesurant leur performance. Aussi, les enfants ont reçu un questionnaire à ramener à la maison afin que leurs parents ou tuteurs puissent fournir des informations. Chaque parent devait notifier toute remarque sur le comportement inhabituel des enfants mais aussi mentionner leur statut socio-économique, la durée de leur résidence, le vitrage du domicile, etc. De cette étude il ressort que l'exposition au bruit des aéronefs à l'école et à la maison était étroitement liée à une gêne très significative. L'étude a conclu que la gêne due au bruit des avions est plus grave chez les enfants que la gêne due au bruit de la route en raison de « *l'intensité, la variabilité et de l'imprévisibilité du bruit des avions par rapport à [celui du trafic routier]* ».

Des travaux similaires ont été menés en Afrique du Sud dans le but d'analyser les effets de l'exposition au bruit des avions sur la langue maternelle et sur les capacités de compréhension des textes chez les enfants (Seabi et al. 2012). Un modèle linéaire général univarié a été utilisé pour étudier les effets de l'exposition au bruit des avions et de la langue maternelle sur la compréhension de la lecture, tout en observant l'impact possible de la capacité intellectuelle, du sexe et du statut socioéconomique sur les résultats. Pour les élèves EFL, il y a eu une forte réduction de la compréhension de la lecture dans le groupe expérimental exposé au bruit d'avion. En revanche, cette différence n'était pas significative pour les élèves ESL. Pour ces résultats, les auteurs suggèrent que des facteurs tels que l'accès aux ressources d'apprentissage pourraient différer entre les élèves EFL et ESL et expliquer les résultats » (Seabi et al. 2012).

1.1.3 Les indicateurs utilisés pour évaluer le bruit des avions

Le bruit du trafic aérien a constitué un problème majeur lorsque les avions à réaction ont été introduits dans l'aviation civile. Généralement, le bruit se caractérise par des valeurs de pics très élevés au décollage et à l'atterrissage selon les phases d'exploitation.

Les études menées au fil des années sur le ressenti des personnes exposées au bruit produit à la fois par le trafic aérien et par les opérations au sol des aéronefs ont contribué à définir différents indicateurs de bruit destinés à décrire la perception humaine et l'impact causé par différentes caractéristiques de niveaux sonores élevés.

Aux Etats-Unis, Rosenblith et Stevens ont défini l'indicateur « Composite Noise Rating (CNR) » (Rosenblith et al. 1955), l'un des premiers indicateurs basé sur le principe selon lequel la perception des individus varie en fonction des composantes spectrales du son. De ce fait, les mesures prises en compte intègrent le niveau de pression acoustique équivalent par bandes d'octave qui traduit les composantes fréquentielles. Par la suite, l'Administration de l'Aviation Fédérale américaine adoptait en 1985 le « Perceived Noise Level (PNL) » (Kryter 1960). Cet indice est principalement utilisé pour décrire le bruit émis par un seul avion survolant une zone. C'est sur la base de cet indice auquel est intégré la durée du son et une correction fréquentielle, qu'a été créé l'« Effective Perceived Noise Level (EPNL) », qui est actuellement l'indicateur utilisé pour la certification acoustique des aéronefs.

Au Royaume – Unis, le comité Wilson sur le bruit concevait le « Noise Number Index (NNI) » qui sera utilisé entre 1960 et 1990. Cet indice développé lors d'une enquête sociale en 1961 aux environs de l'aéroport de Londres (Heathrow) avait pour objectif d'estimer la gêne totale ressentie par les personnes due aux activités aéroportuaires (Schultz 1982). Mais pour certains auteurs, le NNI devait être abandonné car il ne prend pas en compte les événements nocturnes donc n'est pas efficace pour décrire la gêne ressentie par les personnes exposées aux faibles émissions sonores des avions (Brooker 2004).

La réglementation française s'appuyait à cette époque principalement sur l'utilisation d'un indicateur représentatif de l'énergie reçue en décibel dB(A) sur une période donnée. L'indice isopsophonique I avait été alors développé par la Commission Bruit du Secrétariat Général de

l'Aviation Civile (Mankiewicz 1977) pour évaluer l'exposition totale au bruit des populations vivant à proximité des aéroports.

Au départ, l'indice a été calculé séparément pour les périodes de jour et de nuit et, au fil des ans, différentes formulations ont été proposées jusqu'à la définition d'un indice de bruit unique pour toute la journée. Les hypothèses utilisées lors de l'élaboration de l'indice considèrent que la gêne globale ressentie par les personnes dépend spécifiquement de chaque type d'avion survolant la zone d'exposition, mais est sans rapport effectif avec la durée de ces vols. Dans ce sens certains auteurs estimaient que les vols de nuit sont dix fois plus bruant que les vols de jour pour le même type d'avion (Collet et Delol 1980). De ce fait une tendance internationale apparaît, la commission européenne tranche et recommande fortement l'utilisation d'indicateurs énergétiques et évènementiels.

- Les indicateurs énergétiques représentent la moyenne du bruit sur une période donnée. Ce sont essentiellement :

- LAeq ou niveau sonore équivalent qui représente le niveau énergétique acoustique moyen pendant un temps donné et correspond également au cumul d'énergie sonore perçue par une personne ;
- LDEN (day-evening-night) est l'indicateur de bruit représentant le niveau sonore continu équivalent composé de la moyenne énergétique des niveaux sonores continus équivalents mesurés sur trois intervalles de référence de jour, de soirée et de nuit, auxquels sont appliqués des termes correctifs majorants, avec des pénalisations différentes selon l'heure ;
- LN (N pour night) indicateur de niveau sonore nocturne calculé pour une période de 22h à 6h.

- Les indicateurs évènementiels qui présentent certaines caractéristiques de l'exposition sonore en caractérisant les pics de bruit (niveau ou nombre) pour décrire les bruits les plus proches de la perception des individus.

Ils permettent de mieux prendre en compte la gêne et les effets sanitaires associés. Ce sont essentiellement :

- La valeur L_{Amax} correspondant à l'intensité maximale d'un pic de bruit (aéronefs, trafics ferroviaires et routiers)
- Le nombre d'évènements sonores dont l'intensité maximale atteint ou dépasse un certain niveau : NA (seuil)

Les réglementations françaises et européennes recommandent l'utilisation de ces indicateurs. Toutefois, la directive européenne 2002/49/CE autorise l'utilisation d'autres indicateurs en cas de zonage ou de planification acoustique.

Dans notre cas d'étude, les données qui seront utilisées pour l'analyse sont les indicateurs énergétiques, en particulier le LDEN et à l'échelle de la zone d'étude.

1.1.4 L'impact sanitaire du bruit des avions

Au cours des dernières décennies, plusieurs études ont démontré que l'exposition au bruit des avions entraînerait des effets sanitaires importants sur la santé humaine. Des travaux menés sur l'effet auditif et non auditif du bruit sur la santé (Basner et al. 2014) ont mis en évidence que le risque d'effets cardiovasculaires tels que l'hypertension artérielle, les crises cardiaques et les accidents vasculaires cérébraux, sont fréquents chez les riverains exposés à un niveau de 65 dB au bruit des avions. Une étude épidémiologique menée sur la pression artérielle chez les enfants concluait qu'il y avait une relation étroite entre le bruit des avions et l'hypertension artérielle (Paunović et al. 2011). Les travaux de Stansfeld et Clark sur l'effet du bruit des avions sur la santé des enfants renchérisaient en estimant qu'il pouvait exister ces mêmes complications sanitaires chez les enfants (S. Stansfeld et Clark 2015).

Un projet d'étude dénommé « HYpertension and Exposure to Noise near Airports (HYENA) » a également été réalisé autour de 7 grands aéroports dont Londres Heathrow, Amsterdam Schiphol, Stockholm Arlanda et Bromma, Berlin Tegel, Milan Malpensa et Athènes Eleftherios Venezilos (Jarup et al. 2008). L'étude HYENA a révélé qu'une augmentation de 10 dB du bruit des avions la nuit (Lnight) était liée à une augmentation de 14% des probabilités d'hypertension artérielle, mais le bruit des avions le jour (LAeq16 heure = niveau de bruit moyen équivalent pendant 16h) n'augmentait pas les probabilités d'hypertension artérielle. Cependant, ce projet n'a pas trouvé d'association entre le bruit des avions le jour et l'hypertension artérielle et suppose que cela s'expliquerait par le fait que de nombreux résidents travaillent loin de chez eux pendant la journée. Cela implique une mauvaise classification de leur exposition au bruit des avions pendant la journée. L'étude HYENA a également révélé qu'une augmentation de 10 dB du bruit des avions la nuit était associée à une augmentation de 34% de personnes utilisant les médicaments contre l'hypertension au Royaume-Uni (Floud et al. 2010).

D'autres études plus récentes menées à fine échelle autour de l'aéroport de Londres Heathrow ont examiné les risques d'hospitalisation et de mortalité pour les accidents vasculaires

cérébraux, les maladies coronariennes et les maladies cardiovasculaires pour environ 3,6 millions de personnes vivant près de cet aéroport (Hansell et al. 2013). A travers leurs études ils admettent que l'exposition au bruit des avions de jour (LAeq 16 heures) et de nuit (Lnight) était liée à un risque accru d'hospitalisation cardiovasculaire. Comparativement à ceux exposés à des niveaux de bruit d'avions inférieurs à 51 dB pendant la journée, ceux exposés à des niveaux de bruit supérieurs à 63 dB avaient 24% de probabilité d'être hospitalisé pour un AVC; 21% de probabilité d'être hospitalisé pour une maladie coronarienne et 14% de probabilité d'hospitalisation pour une maladie cardiovasculaire. Ces estimations ont pris en compte l'âge, le sexe, l'origine ethnique et la mortalité par cancer du poumon comme indicateur indirect du tabagisme. L'étude a conclu que les niveaux élevés de bruit des avions étaient associés à une augmentation des risques d'accident vasculaire cérébral, de maladie coronarienne et de maladie cardiovasculaire pour les admissions à l'hôpital et la mortalité dans les zones proches de l'aéroport d'Heathrow.

Une étude suisse à grande échelle effectuée sur 4,6 millions de résidents de plus de 30 ans prouve qu'il existe une relation entre l'exposition au bruit des avions et la mortalité par crise cardiaque (Huss et al. 2010). Dans leur étude, ils révèlent que la mortalité par crise cardiaque était fonction de l'augmentation du niveau et de la durée de l'exposition au bruit des avions (sur 15 ans), mais qu'il n'y avait pas d'association entre l'exposition au bruit des avions et d'autres résultats cardiovasculaires, y compris les accidents vasculaires cérébraux ou les maladies circulatoires. Le manque d'association entre le bruit des avions et les accidents vasculaires cérébraux diffèrent des résultats de l'étude similaire menée autour de l'aéroport d'Heathrow, qui avait indiqué une relation entre le bruit des avions et la mortalité par accident vasculaire cérébral (Hansell et al. 2013).

En France, des études épidémiologiques ont également été menées sur l'impact du bruit d'avion sur les individus qui y sont exposés. Ces études ont prouvé qu'il existait une relation entre l'exposition et la gêne ressentie par les riverains, les conditions socio-économiques, l'âge et la sensibilité individuelle. Trois études ont été réalisées en île de France.

Une première étude sur les troubles anxio-dépressifs autour des aéroports dans les années 2000 a permis d'établir le lien entre l'exposition au bruit des avions et quelques indicateurs tels que la manifestation d'angoisse, la consommation de médicament neuro-psychique. Au terme de l'étude ils admettent que dans les zones survolées par les aéronefs il y a une forte croissance des angoisses et le nombre de médicaments prescrits par les médecins (Vallet et Cohen 2000).

Une seconde étude sur l'Impact des Nuisances Sonores Maladies et Insomnies (INSOMNIA) réalisée en 2004 sous l'égide du Collectif de Santé des Nuisances Aériennes (CSNA) et de l'Association de Défense Contre les Nuisances Sonores (ADVOCNAR) a mis en évidence l'association entre les bruits des avions et les troubles de sommeil des riverains habitants à proximité de l'aéroport de Paris – Charles de Gaulle. A partir d'un questionnaire rempli par les riverains l'étude montre l'augmentation du stress et de l'anxiété parmi les populations surveillées. Cela a permis de confirmer l'impact sanitaire des mouvements d'aéronefs déjà identifié dans d'autres pays⁶.

Une troisième étude menée par Cohen en 2007 a mobilisé 4391 patients chez 78 médecins franciliens. Elle a eu pour objectif de montrer la relation existant entre les troubles de la tension artérielle chez les personnes surveillées par les aéronefs à une altitude inférieure à 2000 mètres, soit environ 2 millions de franciliens concernés. Il conclut dans ses recherches que le bruit des avions pouvait provoquer un état anxieux important, la prise de médicaments, et des hospitalisations. (Cohen 2005).

Dans le cadre de ses missions, l'ACNUSA en lien avec la Direction Générale de la Santé (DGS), a lancé une étude dénommée Discussion sur les Effets du Bruit des Aéronefs Touchant la Santé (DEBATS). Ce programme a été lancé afin de mieux connaître et mieux quantifier les effets de bruits des avions sur la santé des populations riveraines des aéroports franciliens⁷. Ainsi, quelques effets sanitaires ont été analysés : les impacts sur le système cardio-vasculaire, les perturbations du sommeil, les troubles anxio-dépressifs et la gêne ressentie en raison du bruit des avions.

Une étude d'impact sanitaire a aussi été menée autour des trois plates-formes aéroportuaires (Paris-CDG, Paris-Orly et Paris-Le Bourget) franciliennes et confiée en décembre 2007 par le Préfet de région d'Ile-de-France, au Dr Hubert Isnard, coordonnateur scientifique de la Cellule interrégionale d'épidémiologie d'Ile-de-France (CIRE), antenne régionale de l'Institut de Veille Sanitaire (INVS).

⁶ Impact des Nuisances SONores (Maladies et INsomnie) à proximité des Aéroports. [Document](#) accessible

⁷ Discussion sur les Effets du Bruit des Aéronefs Touchant la Santé menée par l'ACNUSA

Grâce aux nombreuses études réalisées, des lignes directrices ont été publiées par l'Organisation Mondiale de la Santé pour protéger les populations exposées au bruit. Ainsi, il publiait respectivement les premières lignes directrices sur le bruit communautaire européen (CNG) et le bruit nocturne (NNG) en 2009⁸. Les CNG émanaient d'avis d'experts et étaient relatifs à toute question portant sur l'évaluation et le contrôle du bruit. Les NNG émanaient également d'avis de personnes expérimentées et ont eu pour objectif de fournir des conseils scientifiques afin de mettre en place des mesures relatives à l'exposition au bruit pendant la nuit. Un compromis a donc été trouvé fixant une valeur L_{night} de 40 dB (A) pour les NNG afin de garantir la protection des populations et en particulier les personnes vulnérables.

En 2018, les lignes directrices sont mises à jour par le bureau régional de l'OMS pour l'Europe. De nouvelles recommandations ont été formulées pour chaque source de bruit et classifiées en deux catégories⁹ : une recommandation ferme et une recommandation conditionnelle :

- Une recommandation ferme peut être adoptée comme politique dans la plupart des situations. La ligne directrice s'appuie sur la conviction que les effets souhaitables de l'adhésion à la recommandation l'emportent sur les conséquences indésirables. La qualité des preuves pour un avantage combinée avec informations sur les valeurs, les préférences et les ressources, diffuser l'information sur les recommandations, qui devrait être mis en œuvre dans la plupart des cas ;
- Une recommandation conditionnelle nécessite un processus d'élaboration des politiques issues des débats impliquant les différentes parties prenantes. Il y a moins de certitude quant à son efficacité en raison de la moindre qualité des preuves d'un avantage net, une possibilité de désaccord autour des valeurs et préférences des individus et des populations affectées, ce qui signifie qu'il peut y avoir des circonstances ou paramètres dans lesquels il ne s'appliquera pas.

Les nuisances sonores émises par les avions sont la première cause de plaintes des riverains d'aéroport (selon les statistiques interne de l'ACNUSA), la pollution atmosphérique fait aussi l'objet de nombreuses préoccupations de la part de la communauté scientifique et des

⁸ Le Bureau régional de l'OMS pour l'Europe a créé un groupe de travail d'experts chargé de fournir des avis scientifiques aux États membres pour l'élaboration de futures législations et actions politiques dans le domaine de l'évaluation et du contrôle de l'exposition au bruit nocturne.

⁹ Publication par l'OMS des nouvelles lignes directrices sur le bruit pour l'Europe le 10 octobre 2018. [Document accessible](#)

associations de riverains. Qu'en est-il alors de la question de la qualité de l'air autour des aéroports ?

1.2 La qualité de l'air

1.2.1 Définition

La qualité de l'air autour des aéroports constitue un enjeu important aussi bien sur le plan sanitaire qu'environnemental et pour les générations futures. Durant leurs mouvements, les moteurs d'avion brûlent le carburant et les gaz d'échappement émettent de la fumée. De ce fait, les aéronefs rejettent des polluants tels que le gaz carbonique (CO₂), le dioxyde d'azote (NO₂) et les particules inférieures à 10 µm (PM10) ou 2,5 µm (PM2.5). Ces polluants, une fois dans l'atmosphère, participent incessamment à la dégradation de la qualité de l'air. A une échelle locale, les polluants sont généralement émis sur les axes aériens et aux alentours des aéroports souvent situés à proximités des zones urbaines. Ces zones sont relativement considérées comme des zones sensibles. Les émissions de polluants provenant des gaz d'échappement deviennent préoccupantes car elles impactent fortement la santé humaine.

En 2018, les chiffres publiés dans le rapport annuel de l'OACI indiquaient que le nombre de passagers transportés pour la totalité des vols internationaux s'élevait à 4,3 milliards, de passagers comparativement à 2,05 milliards en 2008. De plus, selon les prévisions de l'Association Internationale de l'Aviation civile (AITA), le nombre de passagers aériens doublera d'ici 2036 soit environ 7,8 milliards de personnes. Cette croissance aura sans doute des impacts sur la qualité de l'air. Ainsi, la prise en compte de cet enjeu dans ce mémoire nous semble importante. Aussi, de manière générale, à quel moment parle-t-on de pollution atmosphérique et d'émissions atmosphériques ?

Le conseil de l'Europe déclarait en 1968 : « il y a pollution atmosphérique lorsque la présence d'une substance étrangère ou une variation importante dans la proportion de ses composants est susceptible de provoquer un effet nocif, compte tenu des connaissances scientifiques du moment, ou de créer, ou une nuisance ou une gêne » (Melquiot 2004).

D'après la Loi sur l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE)¹⁰ de 1996, la pollution atmosphérique est définie comme : « l'introduction par l'homme, directement ou indirectement,

¹⁰ LOI n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie. Document accessible

dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer les nuisances olfactives ».

« On appelle émissions atmosphériques anthropiques les émissions d'origine humaine. La distinction se fait couramment d'après la nature des sources d'émissions (sources mobiles ou fixes) ou le secteur d'activité. La majorité des activités humaines est à l'origine, directe ou indirecte, d'émissions de polluants »¹¹. Cependant, les sources d'émissions provenant des plateformes aéroportuaires sont à distinguer. Dans notre cas, nous nous intéressons aux émissions des aéronefs à travers les réacteurs et celles provenant directement des mouvements au sol.

- Les réacteurs : « Les moteurs d'aéronefs émettent des polluants lors des différentes phases de vol (roulage au sol, décollage, atterrissage, croisière...). Quand il s'agit de pollution de l'air locale, les émissions lors de la phase croisière ne sont pas pris en compte car si elles ont un impact, c'est principalement à l'échelle planétaire (notamment en raison des émissions de CO₂). Ainsi, ne sont considérées que les émissions pendant le cycle LTO (cycle « Landing-Take-Off » ; figure 2), entre 0 et 3 000 pieds (915 m), hauteur correspondant à la hauteur de couche limite moyenne annuelle »¹²

¹¹ Pollution atmosphérique définie par [l'ACNUSA](#)

¹² Extrait de la rubrique « Pollution atmosphérique et activités aéroportuaires » définie par l'ACNUSA

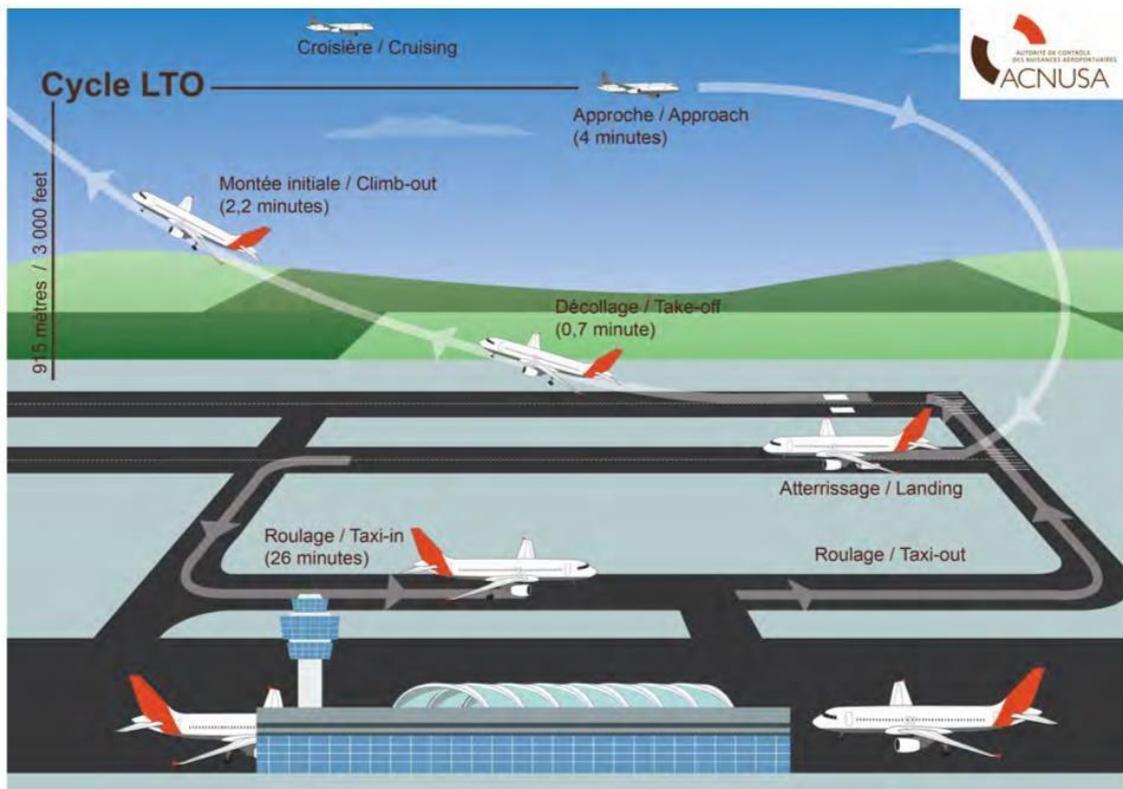


Figure 2 : le cycle landing take-off - ACNUSA

- Les émissions provenant des opérations au sol

Les plateformes aéroportuaires concentrent de nombreuses activités (figure 3) émettrices de polluants atmosphériques, non seulement celles liées au trafic aérien, mais aussi celles liées au trafic routier dont :

- les véhicules arrivant et repartant de la plateforme ainsi que les véhicules de transport en commun – trafic routier induit ;
- les véhicules des services officiels du type police aux frontières, gendarmerie du transport aérien, douane en zone réservée ;
- les divers engins et véhicules de piste ;
- les installations de chauffage, de climatisation et de production d'énergie ;
- les ateliers de maintenance ;
- et d'autres sources.

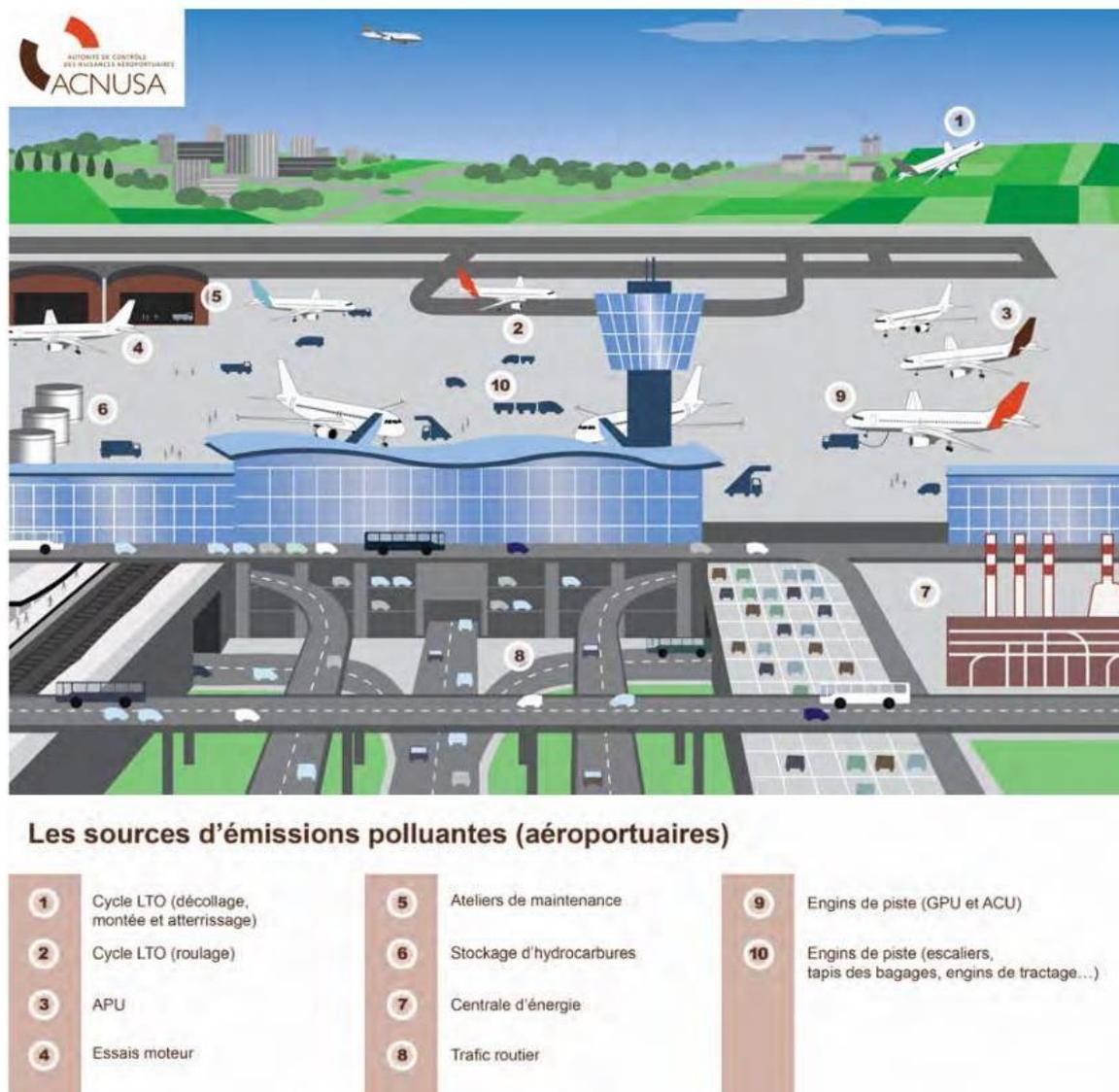


Figure 3: les sources d'émissions polluantes aéroportuaires - ACNUSA

1.2.2 Les polluants dégradant la qualité de l'air

Très peu de travaux scientifiques abordent les questions relatives aux polluants atmosphériques dégradant la qualité de l'air. Cependant quelques travaux ont été menés en Amérique du Nord (Etats – Unis et Canada) et en Europe. La plupart de ces études ont associé le niveau de pollution atmosphérique à la situation socio-économique des populations.

Aux Etats-Unis, précisément dans le bassin atmosphérique de la côte sud de la Californie, les études ont porté essentiellement sur les niveaux d'expositions à l'ozone et aux particules fines associés à des indicateurs tels que le revenu, l'âge, et l'éducation des résidents. Les résultats ont démontré que les personnes à faible revenu, faible niveau d'éducation et les enfants sont

fortement exposées aux particules fines et à l'ozone. (Brajer et Hall 1992). Une étude similaire menée sur l'évaluation socio-économique de l'exposition humaine à l'ozone aboutissait au même résultat (Korc 1996).

En revanche, d'autres d'études menées à New York et à Philadelphie ont démontré que les populations possédant un revenu élevé et un niveau d'éducation assez conséquent étaient relativement plus exposées aux polluants atmosphériques (Liu 1996). D'autres auteurs (Woodruff et al. 2003), ont mobilisé un échantillon de femmes enceintes situés dans les zones de forte concentrations de polluants et appartenant à des communautés ethniques (hispaniques, afro-américaine et asiatique). Ils ont démontré à travers leur étude que la pollution atmosphérique influençait la qualité de vie de ces femmes enceintes ce qui se traduisait par des complications à la naissance des enfants.

Au Canada, dans la ville d'Hamilton (1985-1994), des recherches ont porté sur la sensibilité de l'association entre les niveaux de pollutions atmosphériques des particules fines et le statut socio-économique des personnes résidant à proximité des aéroports. Ainsi, un groupe de chercheurs a pu montrer l'intérêt d'utiliser les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) et des techniques statistiques spatiales pour estimer la relation qui pourrait exister entre les valeurs de concentrations de particules et les caractéristiques socio-économiques (valeur du logement, taux de chômage, revenu médian du foyer) des populations (Jerrett et al. 2001). De cette étude, ils conclurent qu'une relation positive existe entre les niveaux de concentrations des particules, le taux de chômage et les revenus des riverains contrairement à la valeur de logement. Toujours dans la ville d'Hamilton, des travaux similaires menés entre 1985 et 1996 relatifs aux perspectives spatio-temporelles sur la pollution atmosphérique et la justice environnementale confirmaient les mêmes résultats.

En Europe, la quasi-totalité des premières études relatives à la qualité de l'air ont été menées au Royaume-Uni (Chaix et al. 2006), (McLeod et al. 2000), ou en Suède (Stroh et al. 2005). Les études abordaient principalement les émissions de polluants (NO₂, PM10 et CO). A titre d'exemple, un groupe de chercheurs (Brainard et al. 2002), a d'abord mis en évidence l'association positive entre les émissions de NO₂ et de CO, ensuite l'appartenance à une communauté ethnique et le niveau de défaveur social dans la ville de Birmingham à l'échelle du quartier. D'autres chercheurs (Mitchell et Dorling 2016) ont fait le même constat à travers une étude portant sur la justice environnementale de la qualité de l'air britannique. Cette étude a émis l'hypothèse selon laquelle, les populations favorisées exposées à des niveaux de pollutions atmosphériques élevés participaient également à augmenter le pic de pollution (NO₂) en raison

des voitures qu'ils possèdent, contrairement aux populations défavorisées dont la majorité est dépourvue. En 2006, *Chaix et al*, ont considéré un échantillon d'enfants âgés de 7 à 15 ans pour mettre en exergue les différences socio-économiques liées à aux concentrations de polluants NO₂, sur le lieu de résidence et à l'école de ces enfants dans la ville de Malmö, en Suède. Les auteurs ont constaté une augmentation fréquente de l'exposition au NO₂ dans les quartiers où le revenu médian était plus important.

Toutes ces études démontrent l'intérêt de prendre en compte l'association entre le niveau socio-économique des populations et les pollutions atmosphériques dans notre étude.

1.3 Les principaux indicateurs de la pollution des aéronefs¹³

Les polluants atmosphériques émis par l'ensemble des activités aéroportuaires permettent d'évaluer l'impact de celles-ci sur la qualité de l'air. Il existe aujourd'hui plusieurs polluants atmosphériques qui rendent la surveillance de la qualité de l'air complexe autour des plateformes aéroportuaires. Certains sont plus pertinents parce qu'ils sont caractéristiques de type de pollution (aérienne ou routière) et parce que leurs conséquences négatives sur l'environnement et la santé sont déterminées. C'est ainsi qu'ils sont appelés indicateurs de pollution atmosphérique. Parmi ces indicateurs, ceux qui reviennent le plus souvent dans les études d'estimation du niveau d'exposition de la population sont entre autres :

Polluants	Origine	Impacts
NO _x	Formés par oxydation de l'azote de l'air aux fortes valeurs de température et de pression en sortie de chambre de combustion du moteur.	Impact local : participent à la formation d'ozone et d'autres réactions chimiques. Effet sur la santé Impact global : forçage radiatif positif via la création d'ozone et malgré le rôle favorable dans la destruction du méthane (CH ₄)
CO	Résultent de la combustion incomplète du kérosène émis lorsque le moteur tourne au ralenti (stationnement et roulage au sol)	Impact local : participe à la formation d'ozone et d'autres réactions chimiques. Effet sur la santé Impact global (faible) : effet indirect sur le forçage radiatif

¹³ Association de Défense Contre les Nuisances Aériennes. [Document](#) accessible

COV (Composés organiques volatiles) dont le benzène	Résultent de la combustion incomplète du kérosène émis lorsque le moteur tourne au ralenti (stationnement et roulage au sol)	Impact local : participe à la formation d’ozone et d’autres réactions chimiques. Effet sur la santé. Le benzène est cancérigène Impact global : participent aux réactions chimiques dans la haute atmosphère
Particules fines	Résidus solides de la combustion du kérosène	Impact local : effet grave sur la santé Impact global : participent à la formation des traînées de condensation et donc au forçage radiatif positif
SO ₂	Résulte de l’oxydation du soufre contenu dans le kérosène lors de la combustion (il y en a de moins en moins)	Impact local : contribue aux pluies acides. Effet sur la santé Impact global : acidification de l’atmosphère
H ₂ O	Produit de la combustion du kérosène	Impact global : formation des traînées de condensation, de cristaux de glace. Contribue à la formation des cirrus. Participe aux réactions hétérogènes conduisant au forçage radiatif
CO ₂	Produit de la combustion du kérosène	Impact global : gaz à effet de serre
Ozone (O ₃)	Produit de réaction photochimique entre NO _x d’une et CO et COV d’autre part	Impact local : Effet sur la santé (mauvais ozone) Impact global : l’ozone troposphérique participe à l’effet de serre

Tableau 1: Source : Association de Défense Contre les Nuisances Aériennes

1.3.1 Surveillance de la qualité de l’air autour des aéroports franciliens¹⁴

La surveillance de la qualité de l’air en France est confiée par l’Etat aux associations agréées de surveillance de la qualité de l’air (AASQA) dans le cadre de la loi LAURE du 30 décembre 1996. Ce sont des organismes multi-parties (représentants de l’état, des collectivités locales, des représentants des entreprises polluantes, des représentants des diverses activités contribuant à l’émission des substances surveillées). Les outils de surveillance sont :

- plus de 600 stations fixes de mesure implantées sur le territoire français ;
- des systèmes mobiles de prélèvement et d’analyse utilisés lors de campagnes de mesure dans des zones non couvertes par les stations permanentes ;

¹⁴ [Guide](#) méthodologique à destination des aéroports pour évaluer leur impact sur la qualité de l’air locale

- des outils de modélisation qui permettent de cartographier, de scénariser et de prévoir, à court et moyen terme l'évolution de la qualité de l'air. Ces outils sont déclinés aux échelles nationales (Prev'Air par exemple) et locales (plateformes urbaines ou régionales comme Esmeralda, Prevest...).

Les polluants faisant l'objet d'une réglementation au titre de la loi sur l'air ou des directives européennes sont les suivants : SO₂, NO₂, NO_x, O₃, benzène, particules (PM₁₀ et PM_{2,5}), CO, Pb, As, Cd, Ni, Hg et HAP.

Sur et autour des aéroports « acnusés », la surveillance est réalisée soit par le gestionnaire de l'aéroport, soit par l'AASQA locale. La surveillance s'effectue par différents moyens :

- des mesures en continu via des analyseurs automatiques (camion laboratoire ou station de mesure fixe) ;
- des mesures par capteurs actifs (avec pompe aspirante) ou passifs (tubes à diffusion gazeuse) et analyses en laboratoire (mesures sur des périodes au moins d'une semaine) pouvant être associées à des cartographies des niveaux en polluants ;
- des cartographies des principaux polluants.

Les polluants fréquemment mesurés sont le NO₂, O₃, PM, benzène et COV. On notera qu'en première approximation, les hydrocarbures imbrulés émis par les aéronefs sont assimilés aux composés organiques volatils non méthaniques et qu'actuellement, la difficulté réside dans l'absence de traceur spécifique connu des activités aéroportuaires ou du trafic aérien. Les aéroports suivants bénéficient d'un dispositif de surveillance permanent :

- Beauvais-Tillé (1 station de mesure : SO₂, NO₂ et PM₁₀)
- Lyon-Saint-Exupéry (1 station de mesure : NO₂, PM₁₀ et O₃)
- Nice Côte-d'Azur (1 station de mesure : NO₂, PM₁₀ et O₃)
- Paris-Orly (2 stations de mesure : NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} et O₃)
- Paris-Charles-de-Gaulle (2 stations de mesure : NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} et O₃)
- Toulouse-Blagnac (2 stations de mesure : NO₂, PM₁₀ et benzène)

1.3.2 L'impact sanitaire des polluants sur la population

Au sein des zones de survols, la problématique demeure. Bien que la technologie progresse afin de réduire les impacts des émissions de polluant atmosphérique sur la santé, le trafic aérien ne fait qu'augmenter au fil des années. Comme pour le bruit, des études ont démontré d'après l'OMS (WHO/UNECE-PEP, 2003), que même à des niveaux faibles, le rôle joué par quelques polluants atmosphériques (PM10, PM2.5 et NO₂) a des répercussions sur la santé. Par ailleurs, à partir de ce constat, l'OMS renchérit en indiquant que « *Trois millions de personnes meurent chaque année sous l'effet de la pollution atmosphérique, soit 5 % des décès annuels dans le monde* » (WHO/UNECE-PEP, 2004). Concernant la DGAC, les effets de la pollution de l'air dépendent en premier lieu du type de polluants, de leurs concentrations, de la durée de l'exposition et des conditions sanitaires préalables de la population. De manière conventionnelle, les effets sanitaires liés à la pollution atmosphérique sont repartis en deux catégories : les effets à court terme et les effets à long terme.

- Les effets à court terme

« Les effets à court terme sont définis comme des manifestations cliniques, fonctionnelles ou biologiques survenant dans des délais brefs, suite aux variations journalières des niveaux ambiants de pollution atmosphérique. Il faut cependant noter que les effets à court terme peuvent conduire à des effets à long terme.

Les problèmes respiratoires sont un indicateur souvent employé, généralement pour des raisons de disponibilité des données. Les polluants ayant des propriétés irritantes pour l'appareil respiratoire sont de différentes natures (gaz, particules). Les conséquences vont d'une baisse de la capacité respiratoire à une incidence sur la mortalité à plus ou moins long terme. Pour le polluant d'origine transport ayant le plus d'implications sanitaires à l'échelle locale dans les villes des pays développés, c'est-à-dire le NO₂ (et son dérivé photochimique O₃), les conséquences sur les fonctions respiratoires et pulmonaires sont avérées (ex : toux chroniques, infections bronchitiques).» (Faburel et al. 2006)

Concernant le cas des particules fines, l'impact sanitaire est très important car par simple inhalation, elles pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire où elles peuvent provoquer des infections. Des études épidémiologiques menées sur la pollution atmosphérique particulière comme indicateur de mortalité (Pope et al. 1992), ont mis en lumière l'importance de considérer ces polluants comme nocifs pour la santé des populations. D'autres études menées sur les travailleurs des aéroports de Barcelone et Birmingham ont révélé quelques effets sanitaires

induits par les particules fines suite à leur exposition : asthme chez les mécaniciens de moteur d'avion, risque de cancer rénal, etc.

- Les effets à long terme (Faburel et al. 2006)

Les effets à long terme peuvent représenter des affections ou pathologies survenant après une exposition chronique, (plusieurs mois ou années) à la pollution atmosphérique. Ces effets sont étudiés au moyen d'études épidémiologiques, au protocole très différent. Les études de cohortes consistent par exemple en un suivi sanitaire d'une dizaine d'années d'un vaste échantillon de population, avec précisions sur leur exposition quotidienne, selon leurs activités, et leur mode de vie. Si ces effets restent mal connus car difficiles à évaluer :

- Certaines études américaines, comparant les indices de mortalité de ville aux qualités d'air différentes, semblent cependant confirmer leur existence (cf. Marano, 2005)¹⁵ ;
- et surtout les études de cohortes se développant, il a été montré, en Ile-de-France par exemple, une liaison entre l'exposition chronique à la pollution particulaire et l'augmentation des risques de décès pour cause cardio-pulmonaire (Daniau et al. 2013)

Aujourd'hui, il est admis qu'une exposition prolongée à des concentrations de polluants aurait une incidence sur la mortalité à long terme, par effets mutagènes et cancérigènes dus aux particules fines, benzène et divers autres composés aromatiques.

Il y a par ailleurs une présomption de plus en plus forte de cancers dus à l'exposition aux hydrocarbures polycycliques aromatiques liée aux particules diesel (Perera, 1981 ; US EPA, 1990, 1993). Des études toxicologiques, réalisées aux Etats-Unis, au Canada, en Angleterre, en Suède, permettent d'aborder les différents effets de la pollution atmosphérique sur la santé sous ses aspects fondamentaux et aident alors à la compréhension des mécanismes généraux de toxicité. Les particules fines liées à l'usage du gazole sont ici considérées comme génératrices d'un des tous premiers problèmes en termes de santé (Marano, 2005). Mais, aucune étude expérimentale ne permet, seule, une conclusion définitive sur un impact précis et quantifiable sur la santé humaine. L'analyse épidémiologique doit venir compléter l'approche toxicologique (Haut Comité Français de Santé Publique, 2000). Toujours en ce qui concerne les particules, nombre des données existantes ont en fait été compilées ces dernières années, pour relayer des faisceaux de preuves (WHO, 2003, 2004).

¹⁵ Les [particules](#) atmosphériques fines et ultrafines : l'apport de la toxicologie dans l'évaluation des risques pour la santé

L'ensemble des effets respiratoires à long terme de la pollution atmosphérique peut être schématisé par une pyramide tenant compte à la fois de la gravité des effets ainsi que du pourcentage de la population qui en est atteinte comme indiqué sur la figure 4 ci-dessous.¹⁶

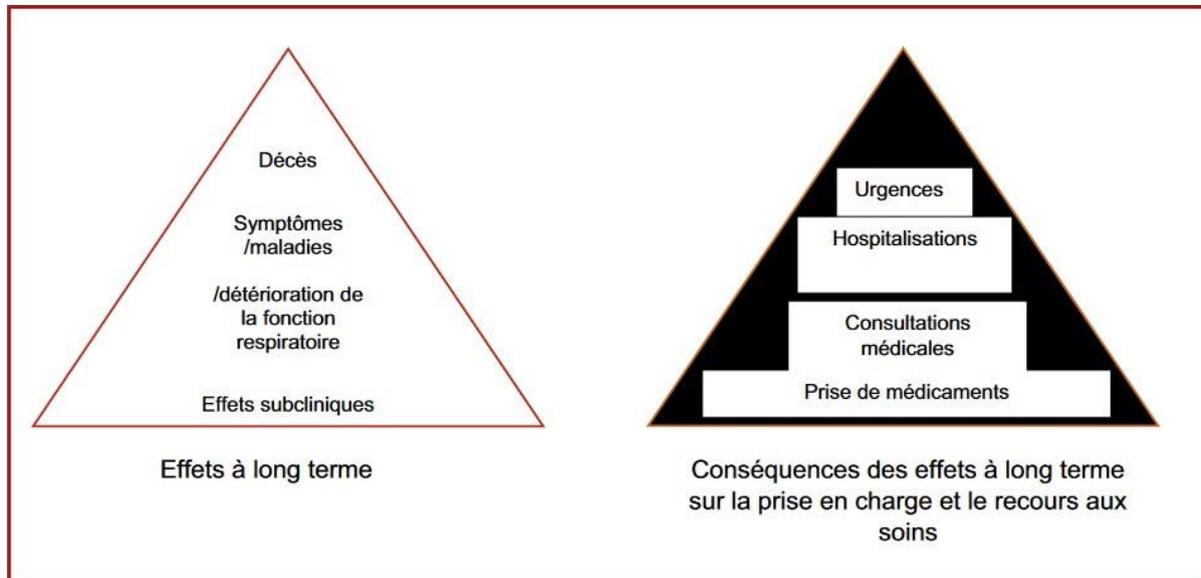


Figure 4: Pyramide des effets à long terme sur la santé respiratoire de la pollution atmosphérique et de leurs conséquences sur la prise en charge et le recours aux soins

« Dans le contexte mondial de croissance du trafic aérien, la réduction de son empreinte environnementale est un enjeu prioritaire pour l’aviation civile. Non seulement pour la performance globale du secteur mais avant tout pour la protection du climat, de la biodiversité et de la santé publique. Réduire l’impact du transport aérien tout en préservant sa croissance économique, c’est l’équation que s’efforcent de résoudre les opérateurs comme les industriels¹⁷ ». Nous avons pu constater précédemment avec les travaux littéraires mentionnés, que la question des nuisances sonores et des particules fines demeure une problématique majeure pour les générations futures. Une prise de conscience individuelle et collective semble nécessaire. C’est ainsi que ce mémoire s’inscrit dans une nouvelle dynamique d’utiliser les données sur le bruit des avions (Lden) et des polluants atmosphériques (NO₂, PM10), afin

¹⁶ La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire. [Document](#) d’experts du groupe pathologies pulmonaires professionnelles environnementales et iatrogéniques (PAPPEI) de la Société de pneumologie de langue française (SPLF)

¹⁷ Assises nationales du transport aérien du 30 mai 2018

d'observer les relations qui pourraient exister avec les inégalités sociales des riverains autour des aéroports. Il faut noter également que très peu d'études promeuvent l'association des particules fines (PM10 et PM2.5) avec les inégalités sociales ; c'est dans ce cas un intérêt de plus de pouvoir mettre en lumière le type de relation qui pourrait exister au moyen des SIG et des techniques statistiques spatiales.

2 Deuxième Partie : Méthodologie d'étude et d'analyse

2.1 Terrain d'étude

Le défi de ce mémoire réside sur la proposition d'une méthodologie appropriée au terrain d'investigation défini. De ce fait, le domaine d'étude défini correspond à la plateforme aéroportuaire d'Orly (figure 5) où les activités liées au mouvement des aéronefs sont susceptibles d'impacter la qualité de l'air et générer des nuisances sonores. L'aéroport de Paris-Orly est situé à cheval sur les départements du Val-de-Marne (94) et de l'Essonne (91). Il s'étend sur une superficie de 378 km² et est reparti sur sept communes : Paray-Vieille-Poste, Wissous, Athis-Mons, Chilly-Mazarin, Morangis, Villeneuve-le-Roi et Orly.

L'aéroport de Paris-Orly avec ses trois pistes (deux orientés Est-Ouest et le troisième Nord-Sud) opérationnelles se place au deuxième rang des aéroports français. Environ 221 538 mouvements ont été enregistrés en 2019 (figure 10).

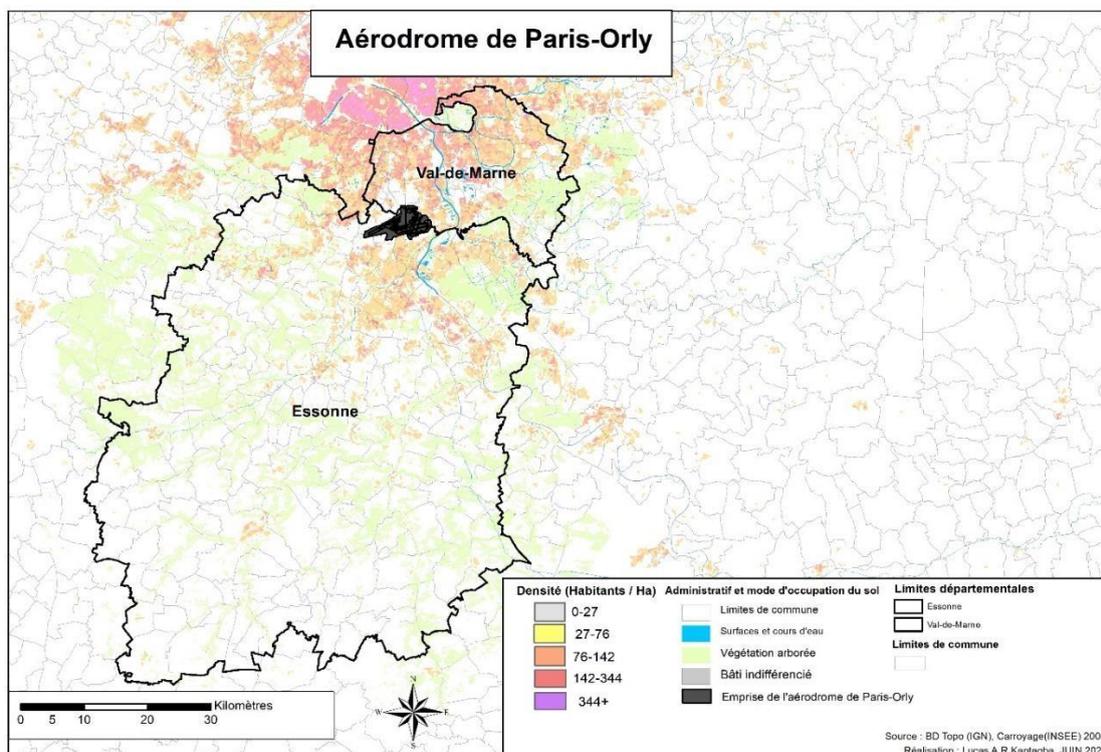


Figure 5: Situation du domaine de l'étude

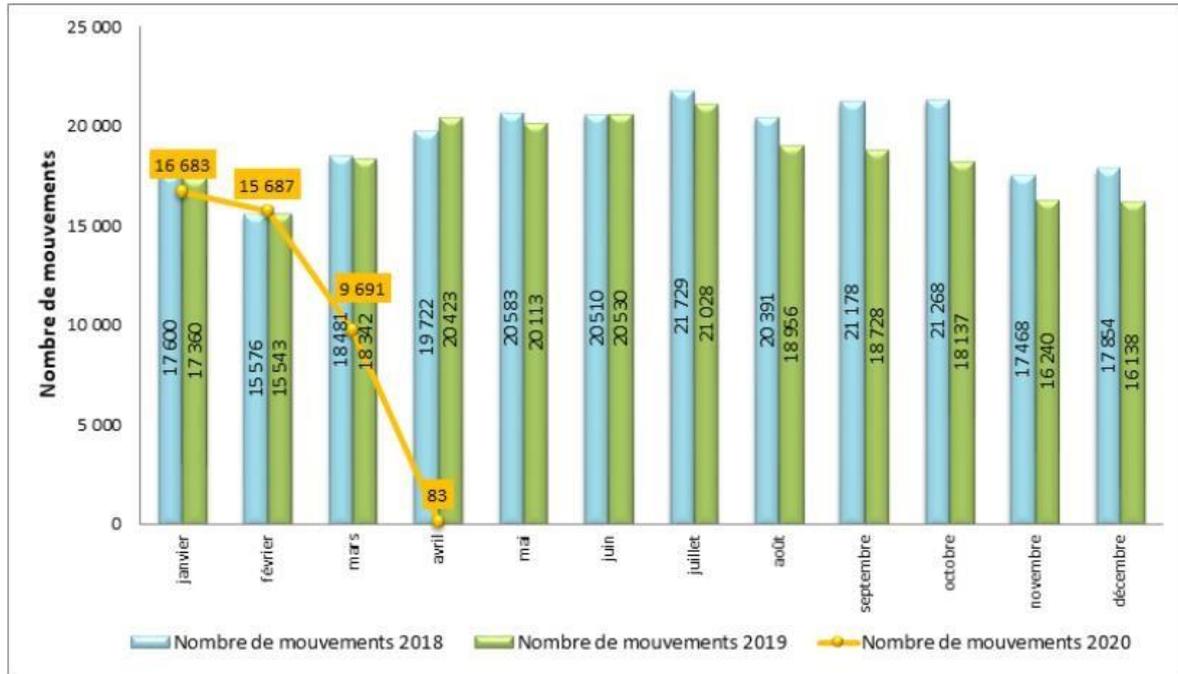


Figure 6 : Nombre de mouvement enregistré à l'aéroport de Paris-Orly source : Direction des services de la navigation aérienne

2.2 Le concept de défaveur sociale

La défaveur sociale est le terme couramment utilisé pour mesurer et comparer les inégalités socio-économiques vis-à-vis de l'exposition aux nuisances environnementales et aux risques. Dans les années 80, Peter Townsend proposait ce concept et le définissait comme « *un état observable et démontrable de désavantage relatif face à la communauté locale ou à l'ensemble de la société à laquelle appartient l'individu, la famille et le groupe* » (Townsend 1987). D'après cette définition, le désavantage peut se produire à plusieurs niveaux tels que la qualité de vie, le logement, l'éducation, le travail ou les liens locaux. Ainsi, toute personne se situant pour l'une de ces catégories, en dessous du niveau atteint par la majorité de la population ou un niveau jugé socialement acceptable est considéré comme défavorisée. De ce fait, Townsend distingue deux formes de privation : l'une matérielle et l'autre sociale. La première forme fait référence aux biens et aux commodités comme posséder un logement convenable, une voiture, un téléviseur ou vivre dans un quartier disposant d'une zone de loisir. La forme sociale correspond aux relations au sein de la famille, sur le lieu de travail et dans la communauté (R Pampalon et al. 2009). Cependant, à l'instar de Townsend et Pampalon, d'autres auteurs ont souligné le fait qu'il n'existe pas d'unanimité quant à la définition et à la mesure des inégalités sociales (Mackenbach et Kunst 1997). De ce fait, aucune mesure conventionnelle n'a été

établie, permettant de caractériser de manière synthétique les dimensions de la défaveur sociale. Il n'existe pas encore de mesure standard, permettant de caractériser de façon synthétique, les multiples dimensions de la défaveur sociale. De plus, les données exhaustives sur les situations individuelles sont rarement disponibles alors que les enquêtes menées à l'échelle locale sont coûteuses et encore peu développées en France comme à l'étranger. C'est pourquoi, pour la construction d'un indice exprimant la défaveur sociale, les chercheurs utilisent une méthode alternative. Il s'agit de faire recours à des données sociodémographiques produites par exemple à l'échelle d'îlots regroupés pour l'information statistique (IRIS). L'intérêt d'utiliser ces types de données a largement été qualifié comme mesure adéquate de la défaveur sociale, ainsi que pour leurs relations avec les phénomènes de santé ou de qualité de l'environnement (Rey et al. 2009). Cette méthode a conduit depuis les années 80 à la construction d'une multitude d'indices, comme par exemple celui développé par Townsend (Townsend 1987). Cet indice présente l'avantage de fournir une mesure de la situation socioéconomique des populations en l'absence de données individuelles.

2.3 Les indices de défaveur sociale

L'obtention des données individuelles sur les populations de manière exhaustive est peu complexe. De ce fait, des indices traduisant la défaveur sociale ont été conçus à partir de différentes unités géographiques. Ces indices, se focalisant sur l'espace ou les aires de résidence, permettent de décrire les relations qui peuvent être établies entre la santé des populations et les territoires auxquelles elles appartiennent. Quelques indicateurs ayant permis la réalisation de certaines études ont été décrites ci-dessous.

2.3.1 L'indice de Townsend exprimant la défaveur sociale

Les caractéristiques socioéconomiques sont généralement prises en compte pour caractériser les inégalités sociales. Il est à noter que l'indice de Townsend dont nous nous inspirons a été développé dans un contexte anglo-saxon qui n'a pas les mêmes spécificités que d'autres territoires. En effet, il existe une différence entre territoires urbains, ruraux, périurbains. De plus, les contextes des territoires évoluent. L'indice de Townsend est construit à partir de quatre variables exprimées en pourcentage :

- La proportion de chômeurs dans la population active ;

- La proportion de logements occupés par plus d'une personne par pièce ;
- La proportion de résidences principales dont le ménage occupant n'est pas propriétaire ;
- La proportion de ménages sans voiture.

La formule du calcul de l'indice est donnée ci-dessous :

$$I = \frac{\{\log(V1 + 1) - \text{moyenne}[\log(V1 + 1)]\}}{\text{écart} - \text{type}[\log(V1 + 1)]} + \frac{\{\log(V2 + 1) - \text{moyenne}[\log(V2 + 1)]\}}{\text{écart} - \text{type}[\log(V2 + 1)]} \\ + \frac{\{V3 - \text{moyenne}(V3)\}}{\text{écart} - \text{type}(V3)} + \frac{\{V4 - \text{moyenne}(V4)\}}{\text{écart} - \text{type}(V4)}$$

Où V1 correspond au pourcentage de chômeurs dans la population active, V2 au pourcentage de logements principaux occupés par plus d'une personne par pièce, V3 le pourcentage de logements principaux dont le ménage occupant n'est pas propriétaire et V4 représente le pourcentage de ménages sans voiture.

Comme souligné précédemment, l'application du calcul de l'indice dépend du contexte territorial dans lequel on se trouve. A titre d'exemple, en région parisienne, la variable correspondant à la proportion de ménages sans voiture peut être interpréter différemment. « En effet, à Paris et en petite couronne¹⁸, le fait de ne pas posséder une voiture ne constitue pas une composante de défaveur sociale, du fait d'un tissu urbain et d'un réseau de transports en commun dense. Tandis que dans un département de la grande couronne¹⁹, l'absence de voiture est considérée comme un handicap et constitue bien, de ce fait, une composante de défaveur sociale²⁰ ».

2.3.2 L'indice de Pampalon

Inspiré des propositions de Townsend, l'indice de Pampalon a été développé au cours des années 2000 au Québec. Il regroupe certains indicateurs socioéconomiques choisis pour leurs relations connues avec un grand nombre de problème de santé, leurs affinités avec les formes matérielles et sociales de la défavorisation et de leur disponibilité par secteur de dénombrement

¹⁸ La petite couronne parisienne correspond aux départements : Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis, Val-de-Marne

¹⁹ La grande couronne parisienne correspond aux départements : Yvelines, Val-d'Oise, Seine-et-Marne, Essonne

²⁰ Rapport d'étude du projet « Survol » de février 2013 mené par Airparif et Bruitparif

(Robert Pampalon et Raymond 2003). Cet indice est construit à partir des six variables présentées ci-dessous :

- Le pourcentage de personnes de 15 ans et plus ne possédant aucun diplôme ;
- le rapport emploi/population chez les 15 ans et plus ;
- le revenu moyen des populations dont l'âge varie de 15 ans et plus ;
- le pourcentage de personnes de 15 ans et plus vivant seules dans leur résidence ;
- le pourcentage de personnes de 15 ans et plus séparées, divorcées ou veuves ;
- le pourcentage de familles monoparentales.

La méthode utilisée pour intégrer les indicateurs socioéconomiques sous la forme d'indice de défavorisation est l'Analyse en Composante Principale (ACP). Cela a pu mettre en évidence d'une part, une composante exprimant la défaveur matérielle qui reflète principalement la scolarité, l'emploi et le revenu. D'autre part, une composante de la défaveur sociale traduisant le fait d'être veuf, séparé ou divorcé, de vivre seul ou en famille monoparentale

2.3.3 L'indice de défavorisation multiple

Développé au Royaume-Unis, précisément en Angleterre, il a été retenu comme mesure officielle de la défaveur sociale pour les petites zones ou quartiers. Les organisations nationales et locales utilisent cet indice, parfois en opposition avec d'autres données, pour distribuer le financement ou cibler les ressources sur les zones. Il est largement utilisé dans l'administration centrale pour concentrer les programmes sur les zones les plus défavorisées.

Il a été revisité plusieurs fois (2007, 2010 et 2015) par le gouvernement anglais et est désormais utilisé dans plusieurs pays comme l'Irlande, l'Ecosse et le Pays de Galle. En Angleterre, l'indice est maintenant construit à partir de 37 indicateurs répartis dans 7 domaines :

- Le revenu ;
- L'emploi ;
- La santé ;
- L'éducation ;
- L'accès/barrière au service ;

- L'environnement résidentiel ;
- La criminalité.

2.3.4 L'indice européen de défavorisation

L'indice exprimant la défaveur à l'échelle européenne est l'EDI ou « european deprivation index », il a été créé en 2012 (Pornet et al. 2012).

La méthodologie est différente de celle utilisée pour les indices de défavorisation sociale habituellement rencontrés. Elle prend comme point de départ la définition de la défavorisation de Townsend, et postule qu'il n'y a pas un standard officiel pour la mesurer en ce qui concerne le choix des variables, celles-ci variant selon les pays. La démarche consiste donc à définir cette notion dans la population étudiée, avec les variables pertinentes, avant de construire l'indice. Elle repose sur la sélection d'une combinaison de variables qui sont disponibles à la fois au niveau individuel dans une enquête européenne dédiée à l'étude de la défavorisation et au niveau géographique dans le recensement de la population et qui reflète au mieux l'expérience individuelle de défavorisation sociale. L'enquête européenne utilisée est l'étude EU-SILC (European Union – Statistics on Income and Living Conditions) ou SRCV dans sa version française (Statistiques sur Revenus et Conditions de vie), qui vise à collecter des données sur le revenu, la pauvreté, l'exclusion sociale et les conditions de vie. La méthodologie a été établie en respectant trois grandes étapes :

Pour la première étape, un indicateur individuel de défavorisation sociale a été construit en se focalisant sur :

- L'identification des besoins fondamentaux à l'aide d'une enquête européenne ;
- La sélection des besoins fondamentaux qui sont associés à la pauvreté objective et subjective car le revenu seul n'est pas un élément clé pour exprimer la défaveur ;
- La définition d'un indicateur individuel de défaveur binaire à partir de ces besoins fondamentaux associés à la fois à la pauvreté objective et subjective.

La seconde étape correspond à l'identification et à la dichotomisation des variables disponibles au niveau individuel (enquête européenne sur le statut socioéconomique) et dans le recensement.

La troisième étape correspond à la construction de l'EDI. Une régression logistique sur les données de l'enquête européenne permet de ne conserver, parmi les onze variables retenues, que celles associées avec l'indicateur individuel. Les coefficients de régression associés à

chacune de ces variables deviennent les poids de ces variables dans l'EDI. L'EDI est construit au niveau de l'Iris et inclut les variables suivantes :

- surpopulation dans le logement ;
- pas de chauffage central ou électrique ;
- non propriétaire, chômeur ;
- de nationalité étrangère ;
- pas de voiture ;
- ouvrier non qualifié ou agricole ;
- faible niveau d'étude ;
- Proportion de famille monoparentale.

2.3.5 L'indice socio-économique (SES)

Cet indice a été développé par Benoit Lalloué (Lalloué et al. 2013) afin de proposer un processus statistique adéquat pour créer un indice socio-économique à l'échelle du quartier. Pour cela il s'est concentré sur quatre zones urbaines françaises (Paris, Lille, Lyon et Marseille) en utilisant les données issues du recensement de 1999 et 2006. A partir de ces données, 50 variables ont été sélectionnées pour représenter au mieux les concepts théoriques de la position socioéconomique en lien avec certains travaux littéraires abordant la question d'inégalité sociale. Des analyses successives en composantes principales ont été réalisées pour sélectionner les variables finales. L'indice représente alors la combinaison linéaire des facteurs retenus par le premier axe de la dernière ACP. La même procédure a été appliquée à chaque agglomération séparément puis aux quatre agglomérations simultanément, d'abord avec les données du recensement de 1999 puis avec celles du recensement de 2006. Les variables sélectionnées sont identiques dans tous les cas, sauf pour Lille (1999).

En ce qui concerne les données de 2006, une vingtaine de variables a été retenue pour chaque agglomération parmi lesquelles :

- huit variables communes à tous les indices : population étrangère, immigré, famille monoparentale, sans diplôme, BAC+2, chômage total, non propriétaire, revenu médian ;
- huit variables complémentaires communes aux agglomérations de province : profession intermédiaire, emplois stables, maisons, immeubles, garages, surface de plus de 100m², sans voiture, deux voitures ou plus ;

- autres variables : population inférieure à 25 ans, cadres, employés, ouvriers, non scolarisés, HLM.

2.3.6 L'indice de défaveur sociale FDep

Le French Deprivation index (FDep) a été développé dans un contexte d'étude territoriale français (Rey et al. 2009). Il a été défini à l'échelle communale en utilisant les données du recensement de la population et des déclarations fiscales des ménages de 2001 (Insee-DGFiP). Aussi, il a été défini comme la première composante principale d'une analyse factorielle de quatre variables représentant le niveau socioéconomique de la population :

- La proportion d'ouvriers dans la population active ;
- La proportion de bacheliers chez les 15 ans et plus ;
- La proportion de chômeurs dans la population active ;
- Le revenu médian par foyer.

2.4 Choix et construction de l'indicateur de défaveur sociale, et données environnementales utilisées pour l'analyse

2.4.1 Choix de l'indicateur de défaveur sociale

Comme énoncé précédemment, il n'existe pas encore d'unanimité pour la mesure de la défaveur sociale compte tenu des différences territoriales et des contextes socio-économiques qui varient d'une zone à l'autre. Les différents indices identifiés comme étant couramment utilisés présentent chacun des avantages et des inconvénients.

La majorité des indices introduits précédemment présentent des limites. Benoit Lalloué, dans son étude sur les « Méthodes d'analyse de données et modèles bayésiens appliqués au contexte des inégalités socio-territoriales de santé et des expositions environnementales », indiquait à ce sujet que « la plupart des indices existants posent différents problèmes. La sélection des variables qu'ils utilisent est principalement basée sur le choix arbitraire de variables reconnues dans la littérature comme étant de bons indicateurs du statut socio-économique ». (Lalloué et al. 2013).

En France, plusieurs études ont tenté de représenter à des échelles différentes (cantons, communes, IRIS) et sur différents territoires français (Lyon, Marseille, France métropolitaine)

le niveau de défaveur sociale (Rey et al. 2009). Ces travaux se sont concentrés sur des zones urbaines ou des zones périphériques, et en particulier sur des espaces ruraux. Une multitude de méthodes ont été employées aussi bien au niveau des variables retenues que pour la création de l'indice de défaveur sociale (analyse factorielle, calcul de scores cumulés).

Nous avons pu également constater à travers les indices décrits plus haut que certains utilisent un nombre important de variables. C'est le cas de l'indice développé par Benoit Lalloué lors de sa thèse. Bien que son indice regroupe des données largement disponibles, et que l'adéquation entre le résultat de l'indice et les variables sélectionnées a été validé par des experts, son interprétation reste tout de même complexe, ce qui entraîne un désavantage pour son utilisation. De plus nous avons noté que la plupart des indices utilisés pour exprimer la défaveur sociale utilisent moins de dix variables.

Au terme de cette analyse, nous avons choisi d'utiliser l'indice de défaveur social FDep (Rey et al. 2009). Ce choix est justifié de la manière suivante :

- L'indice utilise un nombre de variables limitées qui sont disponibles gratuitement sur le site de l'INSEE ;
- L'indice est en adéquation avec notre zone d'étude du fait de son insensibilité aux différents types d'espaces (rural/urbain) sur l'ensemble du territoire. Bien que l'auteur l'ait calculé à l'échelle communale, nous avons la possibilité de le calculer à l'échelle de l'IRIS ;
- L'indice a la propriété de révéler le caractère unidimensionnel ou multidimensionnel de la défaveur, maximisant la représentation de l'hétérogénéité de ses composantes.

	Avantages	Inconvénients
Townsend	Efficacité démontrée par de nombreuses études étrangères et françaises. Facile à calculer ; Indicateur ayant fait l'objet de travaux d'évaluation et de comparaison avec d'autres indices.	Il prend en compte le contexte socio-économique mais ne prend pas en compte le contexte du milieu de vie (urbain ou rural, centre-ville ou périphérie, etc.). Ainsi par exemple, ne pas avoir de voiture n'a pas la même signification en matière de défaveur sociale en milieu urbain, périurbain ou rural. Il est calculé à un contexte donné, or, la mobilité différentielle des groupes sociaux contribue à façonner les territoires.
SES	Sélection des variables sur des critères statistiques (approche guidée par les données) ; Procédure flexible et reproductible ; Propose une méthode pour créer des classes les plus homogènes possibles.	Validé dans les grandes agglomérations urbaines (Paris, Lille, Lyon, Marseilles), n'a pas été testé dans les zones rurales ; Interprétation complexe car trop de variables.
EDI	Part du postulat qu'il n'y a pas de « <i>gold standard</i> » en termes d'indices, mais qu'un concept comme celui de déprivation s'exprime différemment (avec des variables différentes) dans différents pays.	EU-SILC (European Union – Statistics on Income and Living Conditions) pas représentatif de la population française, c'est une enquête : effectif restreint et non réponse (10 036 foyers, 24 940 individus, 19253 âgés de 16 ans et plus). Possibilité d'effectifs faibles dans les régions françaises
FDep	Calculé sur la France Construction comparable sur différents types d'espace et sur l'ensemble du territoire	Son calcul au niveau de l'Iris reste très peu étudié

Figure 7: Avantages et inconvénients des indicateurs source : Haut conseil de la santé Publique 2013²¹

²¹ Indicateurs de suivi de l'évolution des inégalités sociales de santé dans les systèmes d'information en santé ; HCSP 2013

2.4.2 Mobilisation des sources de données

Pour la réalisation de notre étude, des données ont été mobilisées :

- Les données relatives à l'exposition du bruit des avions
- Les données relatives à la pollution atmosphérique (NO₂, PM10)
- Les données socio-économiques disponibles sur le site de l'INSEE

2.4.3 Réalisation de l'Analyse en Composantes Principale (ACP)

Pour la construction de l'indice de défaveur sociale, une ACP a été réalisée. L'analyse a concerné principalement les départements du Val-de-Marne (94) et de l'Essonne (91) sur lesquels s'étend la plateforme aéroportuaire de Paris-Orly.

Par la suite nous comptons quatre variables sélectionnées pour la construction de l'indice qui sont projetées ci-dessous sur le cercle des corrélations associées au premier plan factoriel :

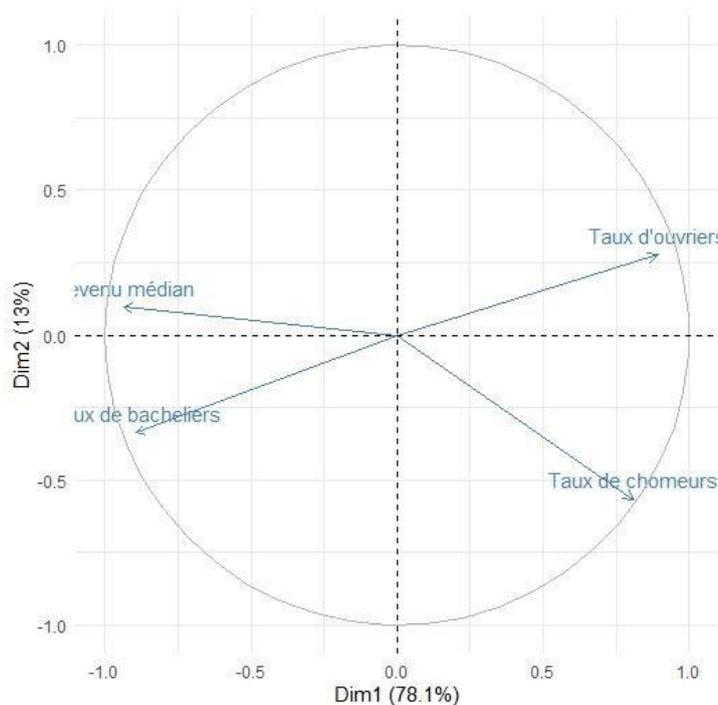


Figure 8 : Cercle de corrélation des variables de l'ACP finale

L'indice de défaveur sociale est défini comme la première composante de l'ACP et représente 78,1% de l'inertie totale formée par les quatre variables. Il est fortement corrélé à chacune de ces dimensions dans un sens cohérent de désavantage social (Rey et al. 2009) : négativement avec le revenu médian et la proportion de bacheliers, positivement avec le taux d'ouvriers et le taux de chômage. Les territoires ont ensuite été classés en 4 classes suite à la réalisation d'une classification ascendante hiérarchique (CAH) à partir de l'ACP :

- Classe 1 (iris moyen) : taux moyen de bacheliers, revenu médian moyen, taux moyen de chômeurs, taux moyen d'ouvriers
- Classe 2 (iris favorisé) : présence assez élevée de bacheliers, revenu médian assez élevé, faible taux de chômeurs, faible taux d'ouvriers
- Classe 3 (iris défavorisé) : faible taux de bacheliers, faible revenu médian, forte présence de chômeurs, forte présence d'ouvriers
- Classe 4 (iris très favorisé) : forte présence de bacheliers, revenu médian très élevé, faible taux de chômeurs, faible taux d'ouvriers

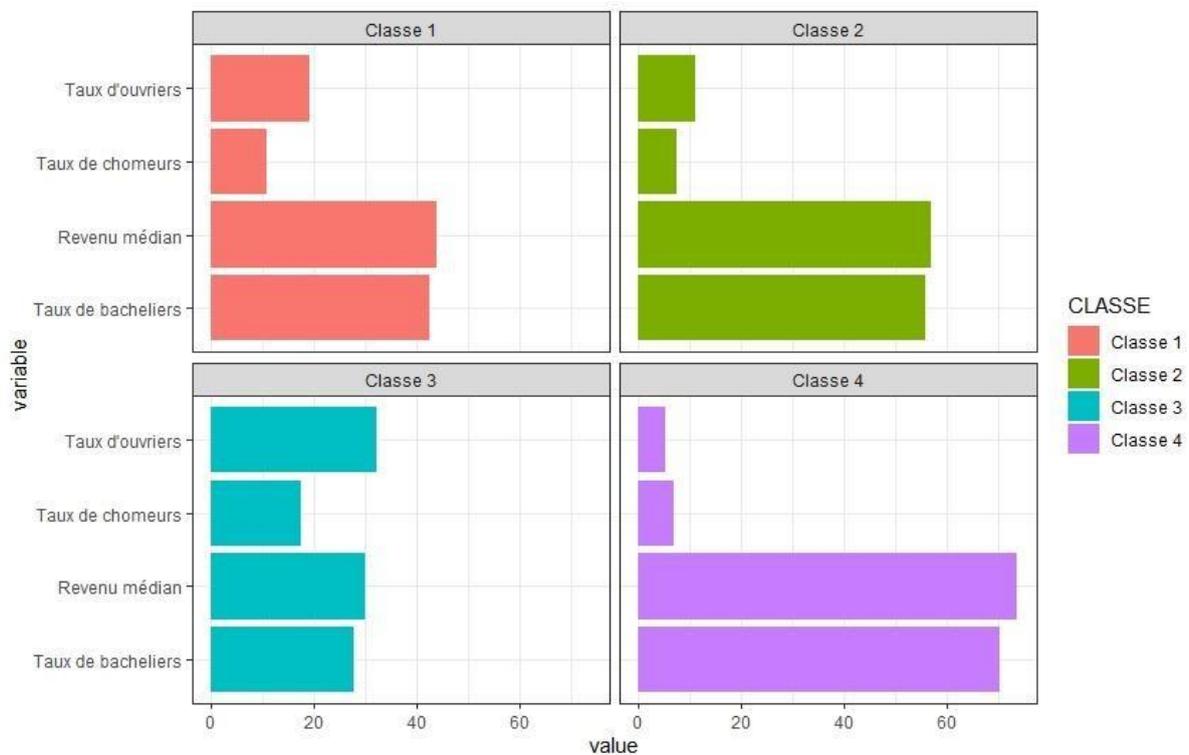


Figure 9: Représentation graphique des différentes classes

Ces différentes classes ainsi obtenues ont par la suite été importées sur un SIG (ArcGIS) afin d’observer la répartition spatiale à l’échelle de l’IRIS pour les départements du Val-de-Marne (94) et de l’Essonne (91) sur lesquels s’étend notre zone d’étude. Cette répartition spatiale est illustrée ci-dessous.

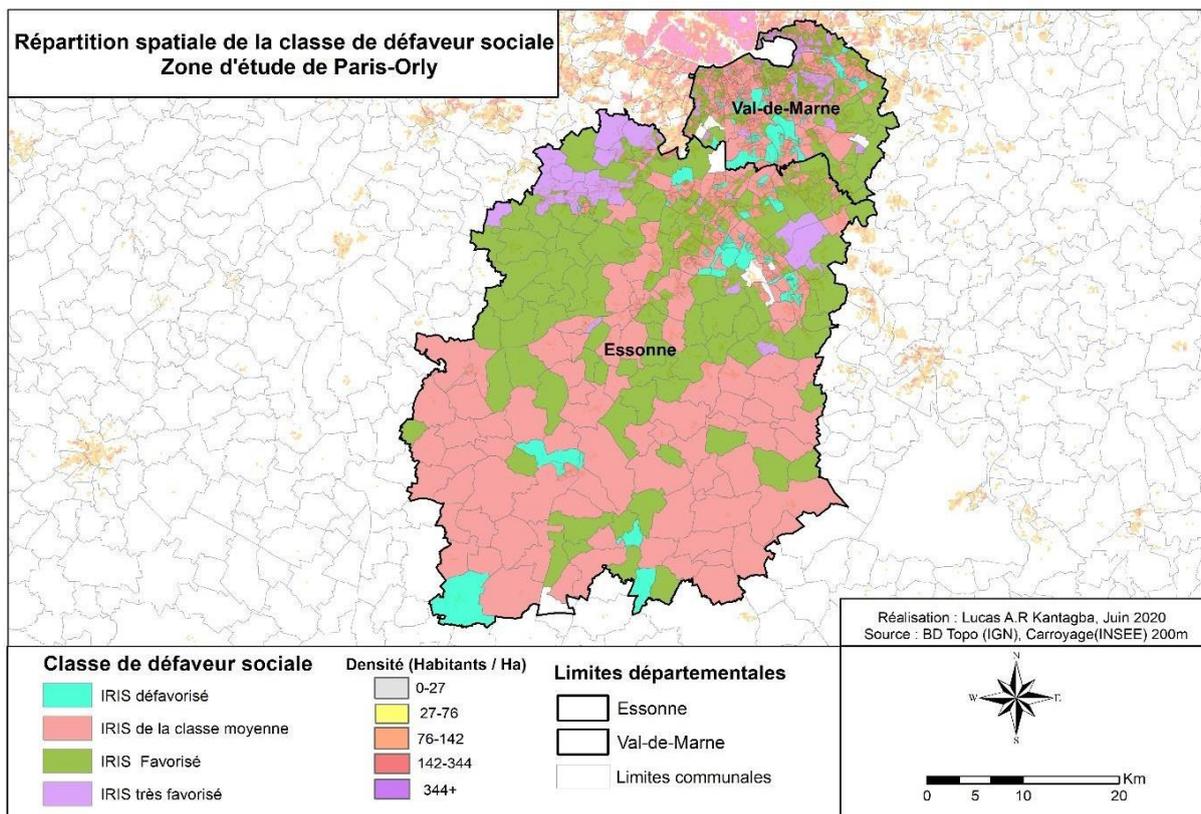


Figure 10: Répartition spatiale de la classe de défaveur sociale

2.4.4 Données d’exposition au bruit : utilisation des cartographies existantes

Introduit en 1992 par la loi n°92 relative à la lutte contre le bruit, le plan de gêne sonore est un dispositif de compensation et de protection pour les populations subissant les nuisances.²² Les courbes du PGS se répartissent sur trois zones²³ :

²² L’article [L.112-10](#) du code de l’environnement explique les modalités relatives

²³ Management des dispositifs d’évaluation et de gestion du bruit sur et autour des aéroports français.

- Zone I : exposition au bruit aérien très forte, en tout point à l'intérieur de la zone le niveau sonore Lden est supérieur à 70dB ;
- Zone II : exposition au bruit aérien fort, en tout point à l'intérieur de la zone le niveau sonore Lden est compris entre 70dB et 65 ou 62 dB ;
- Zone III : exposition au bruit aérien modéré, en tout point à l'intérieur de la zone le niveau sonore Lden est compris entre [65 ou 62] dB et 55dB

L'intérêt d'exploiter les données relatives au Plan de Gêne Sonore (PGS) est de pouvoir estimer l'exposition au bruit de la population et des bâtis susceptibles d'appartenir à la catégorie des établissements dits sensibles (établissement scolaire ou hôpital). L'ensemble de ces courbes sont exprimées en Lden et moyennent différentes configurations de vols. Le Lden a tendance à lisser les émergences sonores caractéristiques de la gêne sonore mais est le seul indicateur réglementé au niveau européen et français. L'absence de cartographies disponibles en indicateurs acoustiques événementiels, ainsi que l'absence de corrélations fortes et reconnues par l'OMS entre des indicateurs événementiels et les impacts sanitaires, n'a pas permis d'utiliser d'autres données que des courbes en indicateur moyenné Lden.

Aussi, pour le bruit du trafic aérien, la valeur limite réglementaire est de 55 dB (A) selon l'indicateur Lden. Il paraît donc plus intéressant de retenir cette valeur seuil pour identifier la population exposée au bruit. Cependant, pour l'aéroport de Paris-Orly, nous utilisons le contour de la zone Lden 55 et Lden 65 du Plan de Gêne Sonore. Ci-dessous le schéma représentatif des zones du PGS de l'aérodrome de Paris-Orly

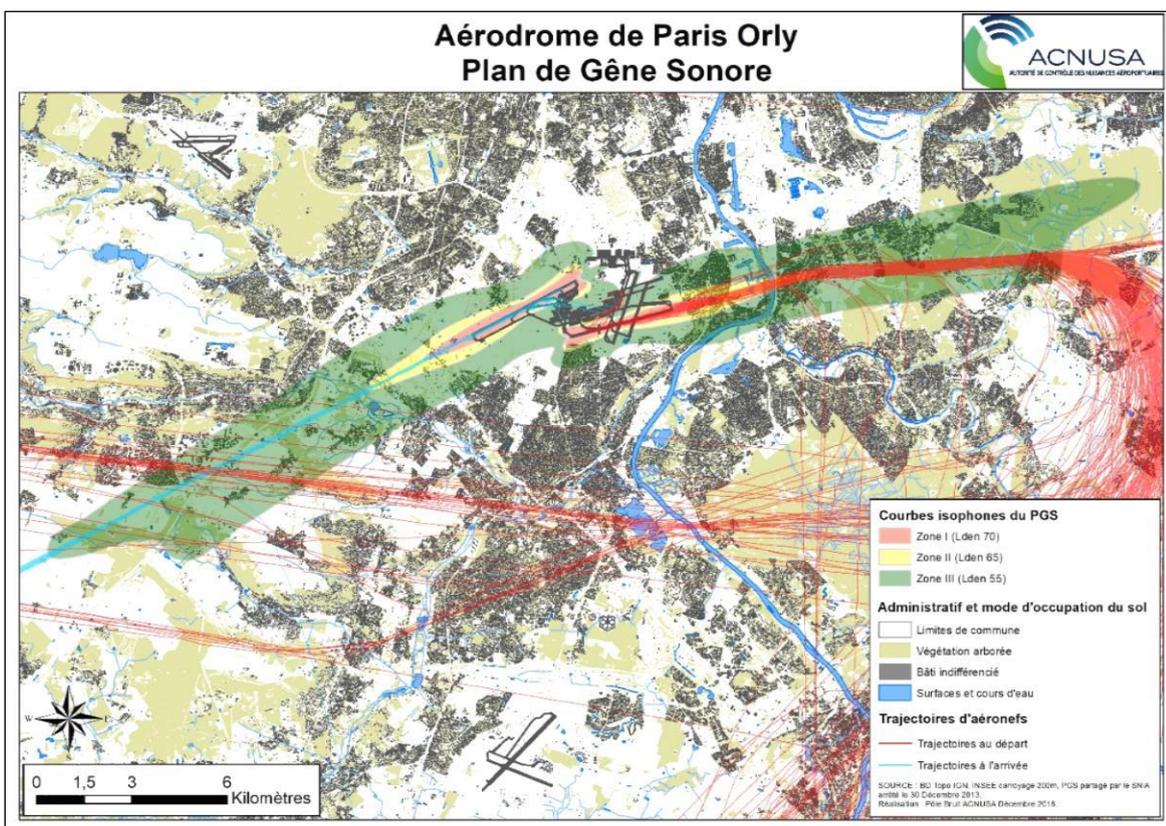


Figure 11: Plan de Gêne Sonore de l'aérodrome de Paris-Orly

2.4.5 Données socio-économiques

Les données socioéconomiques utilisées dans notre étude proviennent des résultats du recensement général de la population (RGP) disponible sur le site de l'INSEE. Nous avons utilisé le RGP de 2015 et les données de déclarations d'impôt (disponibles uniquement pour les communes de plus de 50 ménages).

A partir du RGP nous avons obtenu des informations qui tiennent compte de certains critères comme les catégories sociodémographiques ou socioéconomiques de la population, à l'échelle géographique la plus fine (IRIS). Cependant, comme évoqué précédemment, quatre variables sont nécessaires à l'élaboration de l'indice de défaveur sociale que nous aurons à calculer. Concernant les données sur les revenus des ménages, elles proviennent du dispositif sur les revenus fiscaux et sociaux localisés fournis par la Direction Générale des Impôts.

2.4.6 Données sur la pollution atmosphérique (NO₂, PM₁₀)

Les données sur les polluants atmosphériques sont produites par Airparif et accessibles depuis leur portail « Open data²⁴ ». Plusieurs jeux de données sont disponibles afin de faciliter leur réutilisation. Les données concernent essentiellement :

- Les quantités de polluants présents dans l'air relevées aux stations de mesure (concentration observées) ou spatialisées sur les territoires (Concentrations cartographiées)
- Les quantités de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre rejetés dans l'air par les différentes sources de pollutions (Emissions)
- Les populations et superficies de territoire soumises à des dépassements de valeur réglementaire (Exposition)
- Les informations agrégées pour qualifier la qualité de l'air observé et prévu (indice de qualité de l'air)
- Le déclenchement d'alerte épisode de pollution (épisode de pollution)

Par conséquent, dans notre cas nous avons décidé de travailler sur les données relatives aux populations et superficies de territoires soumises à des dépassements de valeur réglementaire. Toutefois, il faut noter que les données ne proviennent pas uniquement des émissions des aéronefs. Plusieurs sources y sont intégrées

2.5 Croisement des variables socioéconomiques avec les données d'exposition au bruit

Afin d'estimer les populations exposées au bruit, nous avons jugé pertinent d'utiliser les données correspondant à la densité de la population de notre domaine d'étude (Val-de-Marne et Essonne). De ce fait, nous avons considéré pour la part de la population, le niveau de vie moyen des individus d'un carreau qui s'obtient en faisant le ratio : somme des niveaux de vie winsorisés²⁵ d'un carreau (Ind_Snv) par le nombre d'individus de ce même carreau (Ind). En effet, le croisement de ces données permettra de connaître la part de populations exposées à des niveaux sonores aériens supérieurs à 50Lden et la classe de défaveur à laquelle ils appartiennent

²⁴ Portail Open data Airparif

²⁵ La winsorisation est une technique statistique permettant le traitement des valeurs extrême d'une distribution

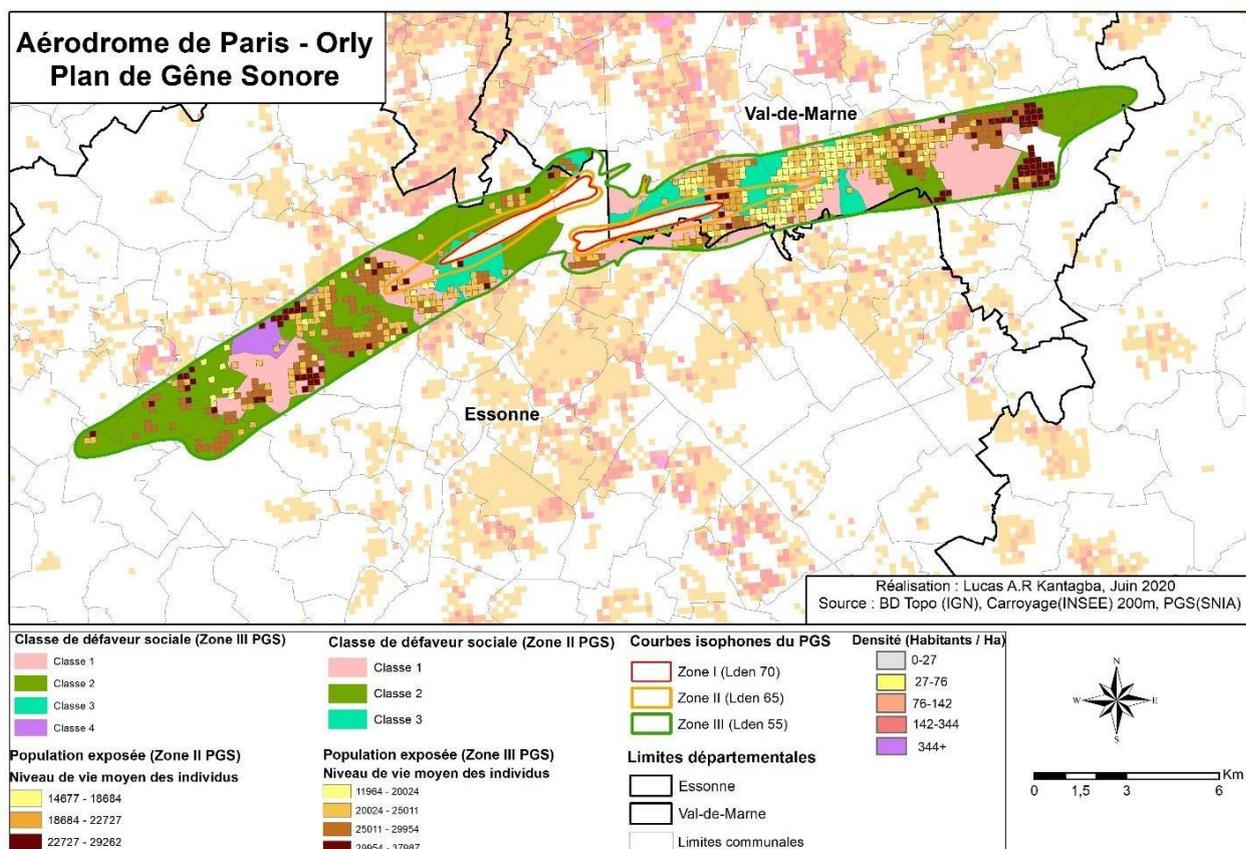


Figure 12 : Population exposée au Plan de gêne sonore

2.6 Croisement des données liées à la qualité de l'air (NO₂, PM₁₀) et aux nuisances sonores avec les variables socio-économiques (indice FDep)

Les modélisations des polluants atmosphériques sont dans la plupart des cas réalisées à des échelles fines permettant par exemple de disposer des estimations à une échelle de 50 m. De ce fait, dans le but de connaître le nombre de personnes exposées au dépassement des valeurs limites par IRIS, le croisement a été réalisé en considérant deux sources d'informations :

- La donnée correspondant au bâti de nos domaines d'études
- Les niveaux d'exposition des concentrations annuelles de polluants atmosphériques NO₂ et PM₁₀ supérieur à 40 µ/m³

Les données concernant les populations exposées à un dépassement de la valeur limite des concentrations moyenne annuelle de NO₂ et PM₁₀ ont été recueillis sur l'Open data de Airparif.

Les cartes réalisées ci-dessous présentent les résultats obtenus à l'IRIS

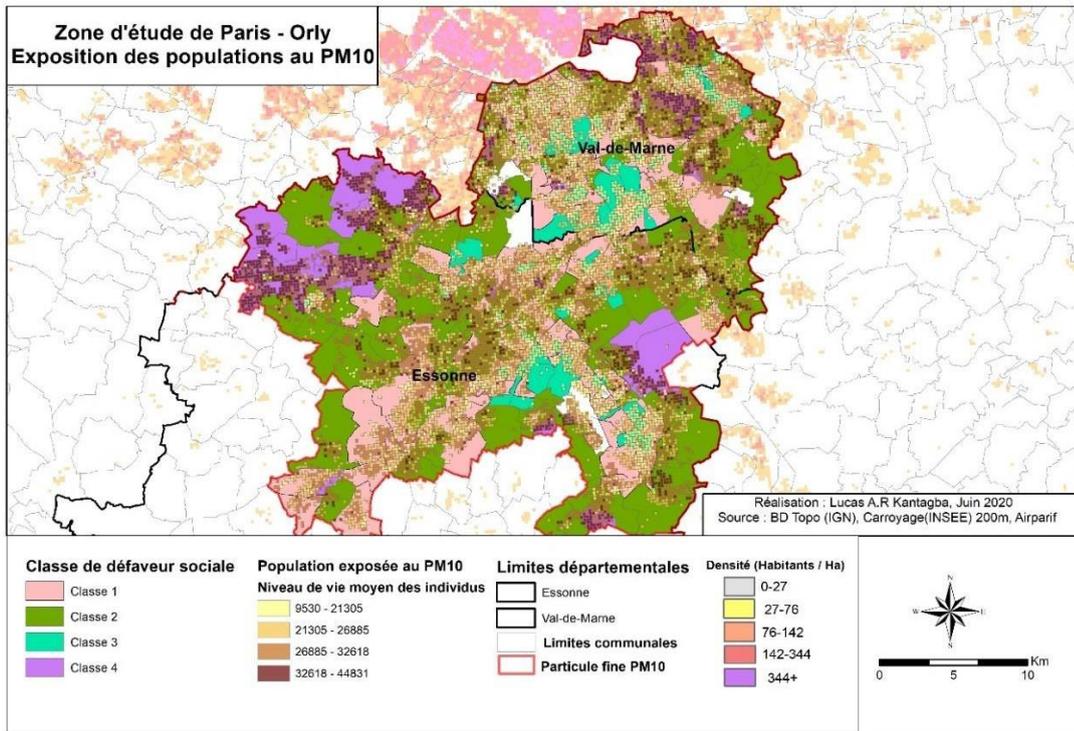


Figure 13: Population exposée à une concentration moyenne annuelle de NO2 au critère de 40 μm^3

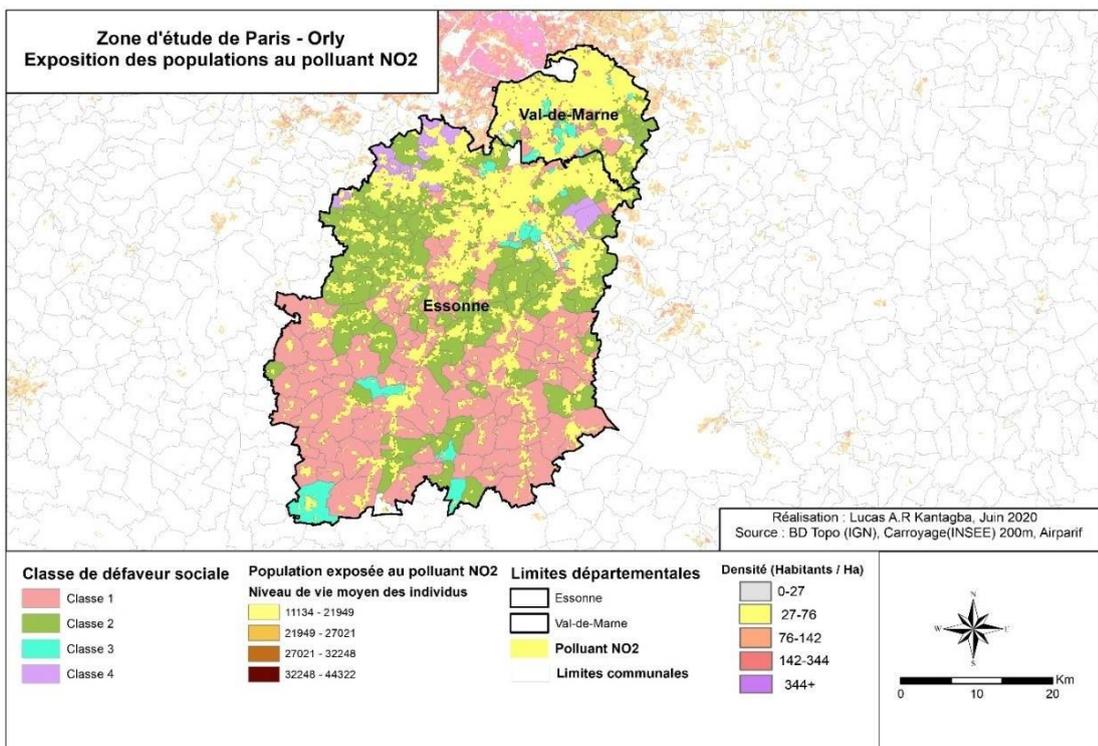


Figure 14: Population exposée à une concentration moyenne annuelle en PM10 au critère de 40 μm^3

2.7 Croisement des données relatives aux bruits et à la qualité de l'air (NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}) avec celle des Etablissements sensibles

Dès le bas âge, l'attention, la communication et les compréhensions sont des éléments nécessaires au développement des enfants. A l'instar de l'éducation reçue à la maison, le milieu scolaire contribue un tant soit peu à l'éveil des enfants. Les activités scolaires sont dans ce sens, effectuées dans des locaux adaptés à l'apprentissage. Pourtant, il arrive que certains établissements soient dépourvus de dispositifs qui prennent en compte la dimension acoustique. Ainsi, exposés à des niveaux de bruit élevés, les établissements accueillant les enfants peuvent participer à l'altération de l'apprentissage scolaire. De plus, contrairement aux adultes qui ont la capacité de comprendre une phrase interrompue par le bruit aérien, les enfants rencontrent des difficultés d'appréhension et d'anticipation de certains messages qui sont véhiculés (notamment la prononciation lors de la lecture). Par ailleurs, en région parisienne, la commission européenne portait également l'attention sur les pollutions atmosphériques liées aux particules fines et au dioxyde d'azote. Elle estimait à environ 55 000 décès prématurés en France par an due à la dégradation de la qualité de l'air en milieu urbain (Font et al. 2019). Cependant les polluants ayant des effets sanitaires sur les populations proviennent à la fois du trafic aérien et du trafic routier. Ces aspects nous emmène à analyser le croisement des données relatives aux bruits et à la qualité de l'air avec celle des établissements sensibles.

- Croisement des données relatives au bruit

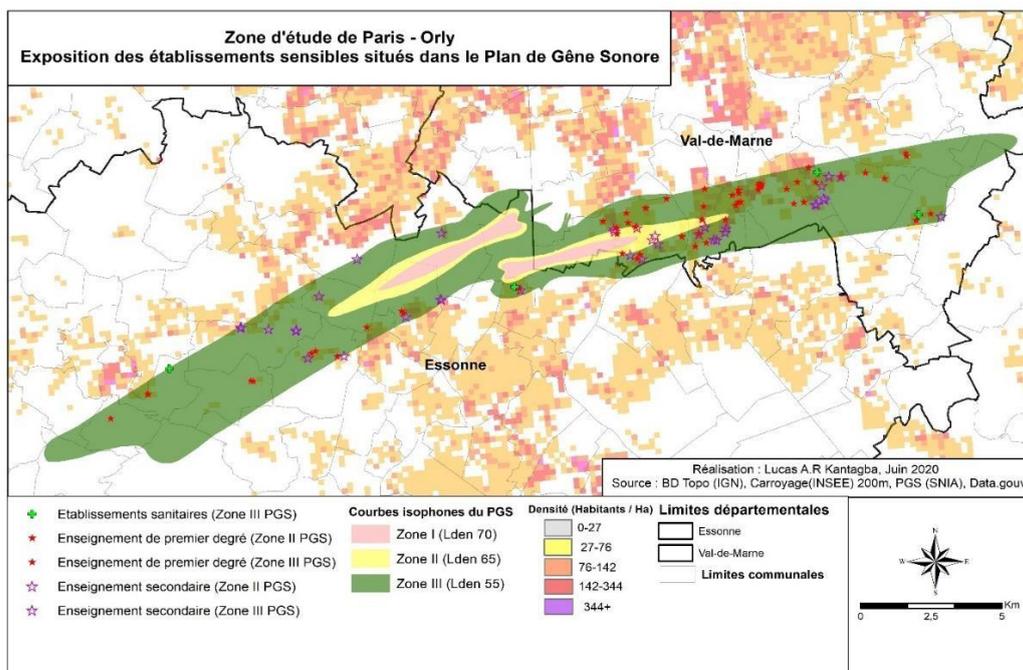


Figure 15 : Identification des établissements sensibles situés dans le Plan de Gène Sonore

- Croisement des données relatives aux Polluants atmosphériques (NO₂ et PM₁₀)

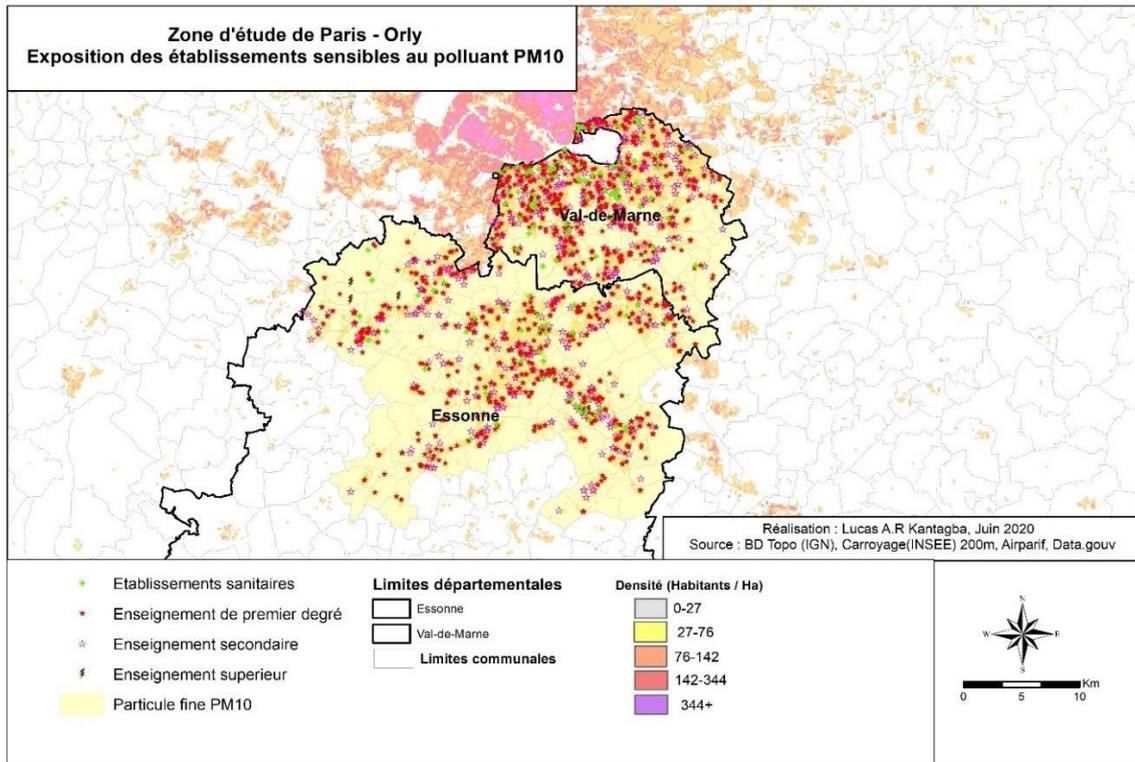


Figure 16: Identification des établissements sensibles exposés au polluant PM₁₀

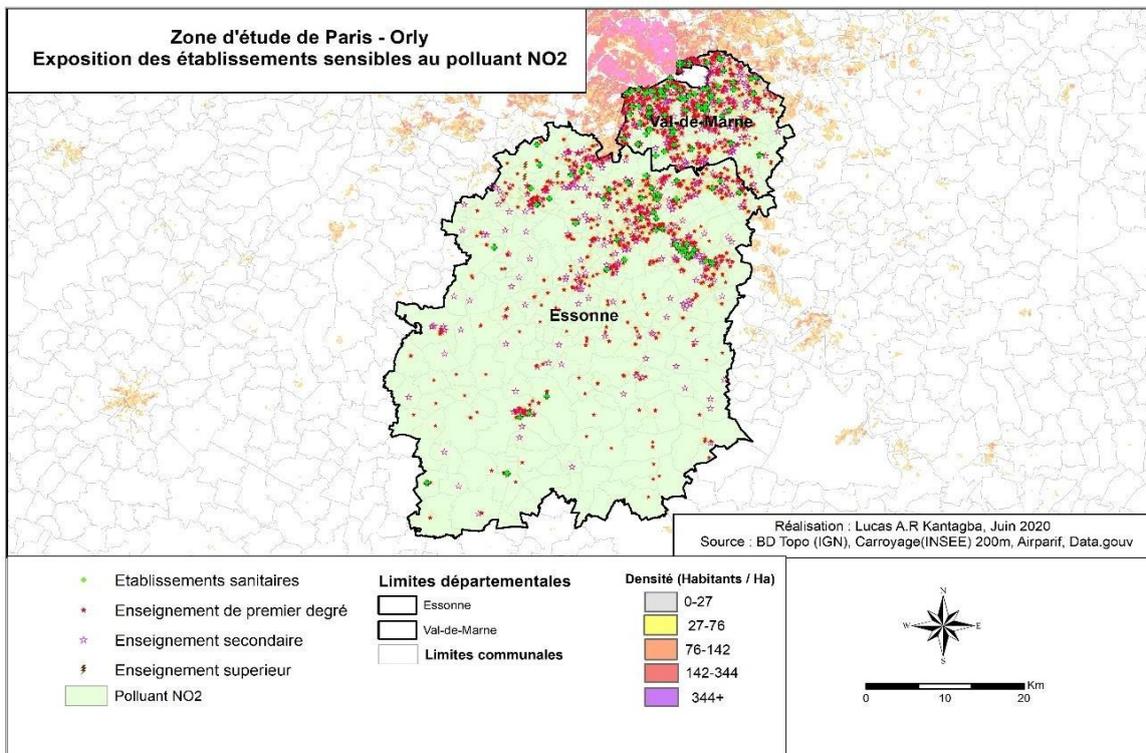


Figure 17: Identification des établissements sensibles exposés au polluant NO₂

3 Troisième Partie : Discussions des résultats

3.1 Exposition des populations au bruit

Nous observons de ces croisements d'une part, l'association de la classe de défaveur sociale à la zone du PGS à laquelle elle correspond et d'autre part, l'association du niveau moyen de vie des populations à chaque zone du PGS. Les constats que nous pouvons en tirer sont les suivants :

- **Dans la zone II du PGS (zone de forte nuisance)**

Cette zone se répartie sur des IRIS moyens (Classe 1), IRIS favorisés (Classe 2), IRIS défavorisés (Classe 3). On note cependant l'absence des IRIS très défavorisés (Classe 4). Par ailleurs il existe une association entre ces classes de défaveur sociale et le niveau de vie moyens des individus appartenant à cette zone de forte nuisance. Le tableau ci-dessous récapitule les résultats observés :

Classe de défaveur sociale	Total des différentes classes	Niveau de vie moyen des individus	Zone II du PGS
IRIS moyens (Classe 1)	14	18684 – 22727	Lden 65
IRIS favorisés (Classe 2)	2	22727 - 29262	Lden 65
IRIS défavorisés (Classe 3)	10	14677 - 18684	Lden 65

Tableau 2: Exposition des populations à une forte nuisance sonore (Zone II du PGS)

En conclusion, les populations exposées au bruit dans cette zone du PGS appartiennent essentiellement à une classe de défaveur moyenne et un niveau de vie moyen.

- **Dans la zone III du PGS (zone de nuisance modérée)**

Cette zone se répartie sur des IRIS moyens (Classe 1), IRIS favorisés (Classe 2), IRIS défavorisés (Classe 3) et des IRIS très défavorisés (Classe 4). Ici également, il existe une association entre ces classes de défaveur sociale et le niveau de vie moyens des individus appartenant à cette zone de nuisance modérée.

Classe de défaveur sociale	Total des différentes classes	Niveau de vie moyen des individus	Zone III du PGS
IRIS moyens (Classe 1)	41	25011 - 29954	Lden 55
IRIS favorisés (Classe 2)	30	29954 – 37987	Lden 55

IRIS défavorisés (Classe 3)	16	20024 - 25011	Lden 55
IRIS très défavorisés (Classe 4)	4	11964 - 20024	Lden 55

Tableau 3: Exposition des populations à une forte nuisance sonore (Zone III du PGS)

En conclusion, les populations exposées au bruit dans cette zone appartiennent essentiellement à une classe de défaveur moyenne et un niveau de vie moyen.

3.2 Exposition des populations aux polluants atmosphériques (NO₂ et PM10)

- Pour les particules fines PM10

Les concentrations moyennes annuelles en particules fines PM10 avec une valeur limite de 40 µ/m³ se répartissent plus sur le département du Val-de-Marne. Cependant, une partie du département de l'Essonne est concernée. Le domaine d'étude appartient donc à des IRIS moyens (Classe 1), IRIS favorisés (Classe 2), IRIS défavorisés (Classe 3) et des IRIS très défavorisés (Classe 4). On note également une association entre ces classes de défaveur sociale et le niveau de vie moyens des individus. Le tableau ci-dessous récapitule les résultats observés :

Classe de défaveur sociale	Total des différentes classes	Niveau de vie moyen des individus	concentrations moyennes annuelles en particules fines PM10
IRIS moyens (Classe 1)	383	26885 – 32618	40 µ/m ³
IRIS favorisés (Classe 2)	315	32618 – 44831	40 µ/m ³
IRIS défavorisés (Classe 3)	111	21305 - 26885	40 µ/m ³
IRIS très défavorisés (Classe 4)	108	9530 - 21305	40 µ/m ³

Tableau 4: Exposition des populations à une concentration moyenne annuelle en PM10

En conclusion, pour une concentration moyenne annuelle en particule fine PM10 avec une valeur limite de 40 µ/m³ on a des populations appartenant essentiellement à une classe de défaveur moyenne et un niveau de vie moyen.

- **Pour le dioxyde d'azote (NO₂)**

Les concentrations moyennes annuelles en dioxyde d'azote (NO₂) avec une valeur limite de 40 µ/m³ se répartissent de manière générale sur tout notre domaine d'étude. Cependant, on observe une présence de NO₂ dans le département du Val-de-Marne. Toutes les classes de défaveur sociale sont représentées avec en particulier une forte présence d'un niveau de défaveur moyenne (Classe 1). Par ailleurs, on note également une association entre ces classes de défaveur sociale et le niveau de vie moyen des individus. Le tableau ci-dessous récapitule les résultats observés :

Classe de défaveur sociale	Total des différentes classes	Niveau de vie moyen des individus	concentrations moyennes annuelles en NO ₂
IRIS moyens (Classe 1)	445	27021 - 32248	40 µ/m ³
IRIS favorisés (Classe 2)	346	32248 – 44322	40 µ/m ³
IRIS défavorisés (Classe 3)	117	21949 - 27021	40 µ/m ³
IRIS très défavorisées (Classe 4)	108	11134 - 21949	40 µ/m ³

Tableau 5: Exposition des populations à une concentration moyenne annuelle en NO₂

En conclusion, pour une concentration moyenne annuelle en dioxyde d'azote (NO₂) avec une valeur limite de 40 µ/m³ on a des populations appartenant essentiellement à une classe de défaveur moyenne et un niveau de vie moyen.

3.3 Exposition des établissements sensibles situés dans le Plan de Gêne Sonore

- **Pour le Plan de Gêne Sonore**

Les résultats de ce croisement nous permettent d'identifier le nombre d'établissements sensibles situés dans les différentes zones du Plan de Gêne Sonore. Ainsi, nous avons pu constater que la plupart des établissements sensibles sont essentiellement situés dans la zone dite de nuisance modérée du PGS. On dénombre : 63 établissements d'enseignement de premier degré, 36 établissements d'enseignement de second degré et 4 établissements sanitaires. Cependant, aucun établissement d'enseignement supérieur n'a été identifié dans les différentes zones du PGS. Le tableau 6 ci-dessous récapitule les résultats observés :

Etablissements sensibles	Nombre d'établissements sensibles dans la zone II du PGS	Nombre d'établissements sensibles dans la zone III du PGS
Enseignement de premier degré	5	63
Enseignement de second degré	4	36
Enseignement supérieur	0	0
Etablissements sanitaires	0	4

Tableau 6 : Exposition des établissements sensibles situés dans le Plan de Gêne Sonore

- Pour les particules fines PM10

Les résultats de ce croisement nous permettent d'identifier le nombre d'établissements sensibles exposés aux particules fines PM10. Ainsi, nous avons pu identifier comme établissements : 1199 enseignements de premier degré, 4 enseignements de second degré, 15 enseignements supérieurs, 122 établissements sanitaires. De ces observations nous pouvons dire que les enfants sont plus susceptibles d'avoir des impacts sanitaires assez conséquent vu le nombre d'établissements d'enseignement de premier degré présents dans la zone. Le tableau 7 ci-dessous récapitule les résultats observés :

Etablissements sensibles	Nombre d'établissements sensibles exposé au PM10
Enseignement de premier degré	1199
Enseignement de second degré	546
Enseignement supérieur	15
Etablissements sanitaires	122

Tableau 7: Exposition des établissements sensibles au polluant PM10

- Pour le dioxyde d'azote (NO₂)

Concernant l'exposition des établissements dans ce cas précis, on note une concentration moyenne annuelle en NO₂ qui s'étend sur tout notre domaine d'étude. La forte présence des établissements relatifs aux enseignements de premier degré sur le territoire, implique une

exposition conséquente des enfants au polluant atmosphérique NO₂ avec une valeur limite de 40 µ/m³. Le tableau 8 ci-dessous récapitule les résultats observés :

Etablissements sensibles	Nombre d'établissements sensibles exposé au polluant NO ₂
Enseignement de premier degré	1348
Enseignement de second degré	615
Enseignement supérieur	15
Etablissements sanitaires	141

Tableau 8: Exposition des établissements sensibles au polluant NO₂

3.4 Discussion des résultats

Les populations les plus impactées par le trafic aérien sont celles résidants aux alentours des aéroports ou vivant dans des zones survolées à basse altitude par des avions. La littérature fait état de plusieurs études d'impacts environnementales sur les nuisances sonores et les pollutions atmosphériques. Les différents croisements que nous avons réalisés nous permettent dès à présent de confirmer ou infirmer nos hypothèses. En rappel trois hypothèses avaient été émises :

- **Hypothèse 1** : Les riverains situés autour des aéroports franciliens sont exposés de manière homogène à la gêne sonore et aux polluants atmosphériques bien qu'ils appartiennent à des catégories socioéconomiques différentes
- **Hypothèse 2** : Le niveau de défaveur sociale des riverains habitant dans les zones survolées par les aéronefs est un indicateur qui accentue le risque d'exposition aux nuisances sonores et aux particules fines.

- **Hypothèse 3** : Les établissements sensibles recevant du public sont susceptibles d'être soumis à des doubles expositions influant sur la qualité d'apprentissage et de soin des populations concernées.

Au regard des différentes analyses effectuées, nous pouvons conclure que :

- Les riverains situés autour de l'aérodrome de Paris-Orly sont exposés de manière hétérogène à la gêne sonore et aux polluants atmosphériques (NO₂ et PM10), traduisant une inégalité environnementale. A chaque classe de défaveur sociale correspond une catégorie de population donnée et un niveau moyen de vie particulier. A titre d'exemple, à chaque zone du Plan Gêne Sonore, nous observons une classe de défaveur différente. Ce cas est également observé pour les polluants atmosphériques.
- Le niveau de défaveur sociale ne constitue pas un indicateur qui accentue le risque d'exposition des populations aux nuisances sonores et aux polluants atmosphériques. Cela s'explique par le fait que dans notre cas d'étude, les populations appartenant à des classes très défavorisées ne sont pas les plus exposées aux nuisances sonores et aux polluants atmosphériques (NO₂ et PM10). Nous avons pu constater que les populations appartenant à un niveau de défaveur moyen sont les plus exposées. Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'autour des plateformes aéroportuaires, on assiste à un renouvellement des populations. Les populations aisées et âgées du fait de la gêne sonore font place à l'arrivée de jeunes couples issus du locatif aidé. Ces ménages appartiennent essentiellement à des catégories d'employés et d'ouvriers disposant de revenus moyens et attiré par une accession à la propriété rendue possible du fait de la dévalorisation immobilière (Faburel et Maleyre 2007).
- Les établissements sensibles quant à eux sont soumis à une double exposition. Nous avons pu identifier une forte présence des établissements d'enseignement du premier degré dans la zone dite de nuisance modérée du Plan de Gêne Sonore et également pour les zones exposées aux polluants NO₂ et PM10.

CONCLUSION

Comme nous avons pu le constater, les nuisances sonores aériennes et les pollutions atmosphériques liées aux activités des aéronefs présentent des enjeux importants pour l'environnement. Toutes les classes sociales sont exposées à ces formes de nuisances en témoigne nos résultats et les études expérimentales réalisées par les experts internationaux. Ce mémoire, s'inspirant de quelques études réalisées autour des aéroports franciliens, a eu pour objectif d'observer les relations qui existent entre les nuisances sonores, les polluants atmosphériques (NO₂ et PM₁₀) et les inégalités sociales des populations d'une part ; et entre les nuisances sonores, les polluants atmosphériques et les établissements sensibles d'autre part. La démarche d'étude adoptée à cet effet nous a permis de faire des analyses statistiques et spatiales en utilisant des données acoustiques, sociodémographiques et socioéconomiques. L'utilisation d'un système d'information géographique a été un appui considérable à notre démarche.

Des investigations sur le terrain à travers une analyse qualitative permettraient de compléter cette étude et d'observer de manière précise, la relation qui existe entre les inégalités sociales, les nuisances sonores et les polluants atmosphériques émis par les aéronefs. Néanmoins, la particularité de cette étude réside dans le fait qu'elle utilise une analyse en composante principale aboutissant à une classification hiérarchique ascendante pour créer des classes de défaveur sociale ; associe ces classes de défaveur sociale au niveau moyen de vie des populations puis les associe enfin au Plan de Gêne Sonore et à certains polluants atmosphériques. Cette démarche pourrait contribuer ainsi à la prise de décision dans certains territoires franciliens. Aujourd'hui, vivre dans un environnement où la qualité de l'air se dégrade, où les nuisances sonores s'accroissent avec l'accroissement du trafic aérien, constitue un facteur de risque majeur pour la santé des populations. Cela contribue également à créer des disparités au sein de la population, c'est-à-dire des inégalités sanitaires entre des groupes sociaux.

Bibliographie

- Basner, Mathias, Wolfgang Babisch, Adrian Davis, Mark Brink, Charlotte Clark, Sabine Janssen, et Stephen Stansfeld. 2014. « Auditory and non-auditory effects of noise on health ». *Lancet* 383 (9925): 1325-32.
- Basner, Mathias, Charlotte Clark, Anna Hansell, James I. Hileman, Sabine Janssen, Kevin Shepherd, et Victor Sparrow. 2017. « Aviation Noise Impacts: State of the Science ». *Noise & Health* 19 (87): 41-50.
- Brainard, Julii, Andy Jones, Ian Bateman, Andrew Lovett, et Peter Fallon. 2002. « Modelling environmental equity: Access to air quality in Birmingham, England ». *Environment and Planning A* 34 (février): 695-716.
- Brajer, Victor, et Jane V. Hall. 1992. « Recent Evidence on the Distribution of Air Pollution Effects ». *Contemporary Economic Policy* 10 (2): 63-71.
- Brooker, Peter. 2004. « The UK Aircraft Noise Index Study: 20 Years On. »
- Chaix, Basile, Susanna Gustafsson, Michael Jerrett, Håkan Kristersson, Thor Lithman, Ake Boalt, et Juan Merlo. 2006. « Children's Exposure to Nitrogen Dioxide in Sweden: Investigating Environmental Injustice in an Egalitarian Country ». *Journal of Epidemiology and Community Health* 60 (3): 234-41.
- Cohen, Marie. 2005. « Etude bruit et santé en Ile-de-France ». 2005.
- Collet, F., et J. Delol. 1980. « The French method (of representing noise annoyance) ». *Voies Aviation Civile Fall Winter*, juin.
- Daniau, C., F. Dor, D. Eilstein, A. Lefranc, P. Empereur-Bissonnet, et W. Dab. 2013. « Étude de la santé déclarée par les personnes riveraines de sources locales de pollution environnementale : une revue de la littérature. Première partie : les indicateurs de santé déclarée ». *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique* 61 (4): 375-87.
- Dorier-Apprill, Elisabeth. 2006. *Ville et environnement*. Editions Sedes.
- Faburel, Guillaume. 2003a. « Le bruit des avions, facteur de révélation et de construction de territoires ». *LEspace géographique* tome 32 (3): 205-23.

- Faburel, Guillaume 2003b. « Les conflits liés au bruit des avions aux USA et en Europe. Repenser la place des territoires locaux dans l'environnement des aéroports ». *Les Cahiers Nantais*, n° 60 (b): 19-29.
- Faburel, Guillaume, F Chatelain, J Gobert, L. Lévy, Théa Manola, et F Mikiki. 2006. « Les effets des trafics aériens autour des aéroports franciliens, Tome 1 : Etat des savoirs et des méthodes d'évaluation sur les thèmes d'environnement ». Research Report. CRETEIL, Autorité de Contrôle des Nuisances Sonores Aéroportuaires (ACNUSA), Aéroports de Paris (ADP), Direction Générale de l'Aviation Civile des Aéroports de Paris (DGAC). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01890874>
- Floud, Sarah, Federica Vigna-Taglianti, Anna Hansell, Marta Blangiardo, Danny Houthuijs, Oscar Breugelmans, Ennio Cadum, et al. 2010. « Medication use in relation to noise from aircraft and road traffic in six European countries: Results of the HYENA study ». *Occupational and environmental medicine* 68 (novembre): 518-24.
- François, J. 1976. « Les répercussions du bruit des avions sur l'équilibre des riverains des aéroports, recherche menée autour de Roissy et d'Orly ». CidB. 1976. <https://www.bruit.fr/en-pret-au-cidb/sondages-les-effets-du-bruit-ambiant>
- Hansell, Anna L., Marta Blangiardo, Lea Fortunato, Sarah Floud, Kees de Hoogh, Daniela Fecht, Rebecca E. Ghosh, et al. 2013. « Aircraft Noise and Cardiovascular Disease near Heathrow Airport in London: Small Area Study ». *BMJ* 347 (octobre). <https://doi.org/10.1136/bmj.f5432>
- Huss, Anke, Adrian Spoerri, Matthias Egger, Martin Röösli, et Swiss National Cohort Study Group. 2010. « Aircraft Noise, Air Pollution, and Mortality from Myocardial Infarction ». *Epidemiology (Cambridge, Mass.)* 21 (6): 829-36.
- Hygge, Staffan, Gary W. Evans, et Monika Bullinger. 2002. « A Prospective Study of Some Effects of Aircraft Noise on Cognitive Performance in Schoolchildren ». *Psychological Science* 13 (5): 469-74.
- Jarup, Lars, Wolfgang Babisch, Danny Houthuijs, Göran Pershagen, Klea Katsouyanni, Ennio Cadum, Marie-Louise Dudley, et al. 2008. « Hypertension and Exposure to Noise Near Airports: the HYENA Study ». *Environmental Health Perspectives* 116 (3): 329-33.
- Jaworski, Véronique. 2012. « Le bruit et le droit ». *Communications* n° 90 (1): 83-94.
- Jerrett, Michael, Richard T. Burnett, Pavlos Kanaroglou, John Eyles, Norm Finkelstein, Chris Giovis, et Jeffrey R. Brook. 2001. « A GIS - environmental justice analysis of

- particulate air pollution in Hamilton, Canada ». *Environment and Planning A* 33 (6): 955-73.
- Kempen, Elise E. M. M. van, Irene van Kamp, Rebecca K. Stellato, Isabel Lopez-Barrio, Mary M. Haines, Mats E. Nilsson, Charlotte Clark, et al. 2009. « Children's annoyance reactions to aircraft and road traffic noise ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 125 (2): 895-904.
- Korc, Marcelo E. 1996. « A Socioeconomic Assessment of Human Exposure to Ozone in the South Coast Air Basin of California ». *Journal of the Air & Waste Management Association* 46 (6): 547-57.
- Kryter, K. D. 1960. « The Meaning and Measurement of Perceived Noise Level ». *Noise Control* 6 (5): 12-27.
- Lalloué, Benoît, Jean-Marie Monnez, Cindy Padilla, Wahida Kihal, Nolwenn Le Meur, Denis Zmirou-Navier, et Séverine Deguen. 2013. « A statistical procedure to create a neighborhood socioeconomic index for health inequalities analysis ». *International Journal for Equity in Health* 12 (1): 21.
- Liu, F. 1996. « Urban Ozone Plumes and Population Distribution by Income and Race: A Case Study of New York and Philadelphia ». *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)* 46 (3): 207-15. <https://doi.org/10.1080/10473289.1996.10467454>.
- Mackenbach, Johan P, et Anton E Kunst. 1997. « Measuring the Magnitude of Socio-Economic Inequalities in Health: An Overview of Available Measures Illustrated with Two Examples from Europe ». *Social Science & Medicine, Health Inequalities in Modern Societies and Beyond*, 44 (6): 757-71.
- Mankiewicz, René H. 1977. « Organisation de l'Aviation civile internationale ». *Annuaire Français de Droit International* 23 (1): 625-47.
- McLeod, H., I. H. Langford, A. P. Jones, J. R. Stedman, R. J. Day, I. Lorenzoni, et I. J. Bateman. 2000. « The Relationship between Socio-Economic Indicators and Air Pollution in England and Wales: Implications for Environmental Justice ». *Regional Environmental Change* 1 (2): 78-85.
- Melquiot, Pierre. 2004. *Mémento de la réglementation environnementale française et européenne*. Librairie Environnement.
- Mitchell, Gordon, et Danny Dorling. 2016. « An Environmental Justice Analysis of British Air Quality ». *Environment and Planning A*, juillet. <https://doi.org/10.1068/a35240>.

- Pampalon, R, D Hamel, P Gamache, et G Raymond. 2009. « A Deprivation Index for Health Planning in Canada ». *Chronic Diseases in Canada* 29 (4): 15.
- Pampalon, Robert, et Guy Raymond. 2003. « Indice de défavorisation matérielle et sociale: son application au secteur de la santé et du bien-être ». *Santé, Société et Solidarité* 2 (1): 191-208.
- Paunović, Katarina, Stephen Stansfeld, Charlotte Clark, et Goran Belojević. 2011. « Epidemiological Studies on Noise and Blood Pressure in Children: Observations and Suggestions ». *Environment International* 37 (5): 1030-41.
- Pieret, Julien. 2008. « Du bruit des avions au silence de la loi ». *Pyramides. Revue du Centre d'études et de recherches en administration publique*, n° 15 (janvier): 9-50.
- Pope, C., Joel Schwartz, et Michael Ransom. 1992. « Daily Mortality and PM 10 Pollution in Utah Valley ». *Archives of environmental health* 47 (juin): 211-17.
- Pornet, Carole, Cyrille Delpierre, Olivier Dejardin, Pascale Grosclaude, Ludivine Launay, Lydia Guittet, Thierry Lang, et Guy Launoy. 2012. « Construction of an Adaptable European Transnational Ecological Deprivation Index: The French Version ». *J Epidemiol Community Health* 66 (11): 982-89.
- Rey, Grégoire, Eric Jouglu, Anne Fouillet, et Denis Hémon. 2009. « 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* 9 (janvier): 33
- Schade, Wolfgang. 2003. « Le bruit du transport : un défi pour la mobilité durable ». *Revue internationale des sciences sociales* n° 176 (2): 311-28.
- Schultz, Theodore J. 1982. *Community Noise Rating*. Subsequent edition. London ; New York : New York: Elsevier Applied Science.
- Seabi, Joseph, Kate Cockcroft, Paul Goldschagg, et Mike Greyling. 2012. « The Impact of Aircraft Noise Exposure on South African Children's Reading Comprehension: The Moderating Effect of Home Language ». *Noise & Health* 14 (60): 244-52.
- Stansfeld, S. A., B. Berglund, C. Clark, I. Lopez-Barrio, P. Fischer, E. Öhrström, M. M. Haines, et al. 2005. « Aircraft and Road Traffic Noise and Children's Cognition and Health: A Cross-National Study ». *The Lancet* 365 (9475): 1942-49.
- Stansfeld, Stephen, et Charlotte Clark. 2015. « Health Effects of Noise Exposure in Children ». *Current Environmental Health Reports* 2 (2): 171-78.

- Stevens, K. N., W. A. Rosenblith, et R. H. Bolt. 1955. « A Community's Reaction to Noise: Can It Be Forecast? » *Noise Control* 1 (1): 63-71. <https://doi.org/10.1121/1.2369121>.
- Stroh, Emilie, Anna Oudin, Susanna Gustafsson, Petter Pilesjö, Lars Harrie, Ulf Strömberg, et Kristina Jakobsson. 2005. « Are associations between socio-economic characteristics and exposure to air pollution a question of study area size? An example from Scania, Sweden ». *International Journal of Health Geographics* 4 (1): 30.
- Townsend, Peter. 1987. « Deprivation* ». *Journal of Social Policy* 16 (2): 125-46.
- Vallet, M., et Stephen M. Cohen. 2000. « Etude Épidémiologique Des Troubles Anxio-Dépressifs Autour Des Aéroports ». *Developmental Cell*.
- Woodruff, Tracey J, Jennifer D Parker, Amy D Kyle, et Kenneth C Schoendorf. 2003. « Disparities in exposure to air pollution during pregnancy. » *Environmental Health Perspectives* 111 (7): 942-46.

Table des matières

Avant-propos	2
Remerciements.....	3
Résumé	4
Glossaire.....	2
INTRODUCTION.....	4
1 Première Partie : Le bruit et la qualité de l'air, des nuisances environnementales pour la société.....	5
1.1 La notion de bruit.....	6
1.1.1 Définition.....	6
1.1.2 Le bruit des aéronefs : Etat de connaissance	6
1.1.3 Les indicateurs utilisés pour évaluer le bruit des avions.....	12
1.1.4 L'impact sanitaire du bruit des avions	14
1.2 La qualité de l'air	18
1.2.1 Définition.....	18
1.2.2 Les polluants dégradant la qualité de l'air.....	21
1.3 Les principaux indicateurs de la pollution des aéronefs	23
1.3.1 Surveillance de la qualité de l'air autour des aéroports franciliens.....	24
1.3.2 L'impact sanitaire des polluants sur la population.....	26
2 Deuxième Partie : Méthodologie d'étude et d'analyse	29
2.1 Terrain d'étude.....	29
2.2 Le concept de défaveur sociale	30
2.3 Les indices de défaveur sociale	31
2.3.1 L'indice de Townsend exprimant la défaveur sociale	31
2.3.2 L'indice de Pampalon.....	32
2.3.3 L'indice de défavorisation multiple	33
2.3.4 L'indice européen de défavorisation.....	34
2.3.5 L'indice socio-économique (SES).....	35
2.3.6 L'indice de défaveur sociale FDep	36
2.4 Choix et construction de l'indicateur de défaveur sociale, et données environnementales utilisées pour l'analyse	36
2.4.1 Choix de l'indicateur de défaveur sociale.....	36
2.4.2 Mobilisation des sources de données.....	39
2.4.3 Réalisation de l'Analyse en Composantes Principale (ACP)	39
2.4.4 Données d'exposition au bruit : utilisation des cartographies existantes	41

2.4.5	Données socio-économiques	43
2.4.6	Données sur la pollution atmosphérique (NO ₂ , PM10).....	44
2.5	Croisement des variables socioéconomiques avec les données d'exposition au bruit	44
2.6	Croisement des données liées à la qualité de l'air (NO ₂ , PM10) et aux nuisances sonores avec les variables socio-économiques (indice FDep).....	45
2.7	Croisement des données relatives aux bruits et à la qualité de l'air (NO ₂ , PM10, PM2.5) avec celle des Etablissements sensibles	47
3	Troisième Partie : Discussions des résultats.....	49
3.1	Exposition des populations au bruit.....	49
3.2	Exposition des populations aux polluants atmosphériques (NO ₂ et PM10)	50
3.3	Exposition des établissements sensibles situés dans le Plan de Gêne Sonore	51
3.4	Discussion des résultats.....	53
CONCLUSION.....		55
Bibliographie.....		56
Liste des Tableaux		63
Liste des figures		63
ANNEXES		64

Liste des Tableaux

Tableau 1: Source : Association de Défense Contre les Nuisances Aériennes	24
Tableau 2: Exposition des populations à une forte nuisance sonore (Zone II du PGS).....	49
Tableau 3: Exposition des populations à une forte nuisance sonore (Zone III du PGS)	50
Tableau 4: Exposition des populations à une concentration moyenne annuelle en PM10	50
Tableau 5: Exposition des populations à une concentration moyenne annuelle en NO2.....	51
Tableau 6 : Exposition des établissements sensibles situés dans le Plan de Gêne Sonore	52
Tableau 7: Exposition des établissements sensibles au polluant PM10.....	52
Tableau 8: Exposition des établissements sensibles au polluant NO2	53

Liste des figures

Figure 1 : résultats de l'enquête sur les nuisances sonores en Allemagne	7
Figure 2 : le cycle landing take-off - ACNUSA	20
Figure 3: les sources d'émissions polluantes aéroportuaires - ACNUSA	21
Figure 4: Pyramide des effets à long terme sur la santé respiratoire de la pollution atmosphérique et de leurs conséquences sur la prise en charge et le recours aux soins	28
Figure 5: Situation du domaine de l'étude	29
Figure 6 : Nombre de mouvement enregistré à l'aéroport de Paris-Orly source : Direction des services de la navigation aérienne	30
Figure 7: Avantages et inconvénients des indicateurs source : Haut conseil de la santé Publique 2013	38
Figure 8 : Cercle de corrélation des variables de l'ACP finale	39
Figure 9: Représentation graphique des différentes classes.....	40
Figure 10: Répartition spatiale de la classe de défaveur sociale	41
Figure 11: Plan de Gêne Sonore de l'aérodrome de Paris-Orly	43
Figure 12 : Population exposée au Plan de gêne sonore.....	45
Figure 13: Population exposée à une concentration moyenne annuelle de NO2 au critère de 40 μm^3	46
Figure 14: Population exposée à une concentration moyenne annuelle en PM10 au critère de 40 μm^3	46
Figure 15 : Identification des établissements sensibles situés dans le Plan de Gêne Sonore	47
Figure 16: Identification des établissements sensibles exposés au polluant PM10.....	48
Figure 17: Identification des établissements sensibles exposés au polluant NO2.....	48
Figure 18 : Représentation des trois pistes de l'aérodrome de Paris-Orly Source : Bruitparif.....	64
Figure 19 : Liste des aéroports acnusés Source : ACNUSA	65

ANNEXES

Annexe 1 : Plan de piste de l'aérodrome de Paris – Orly

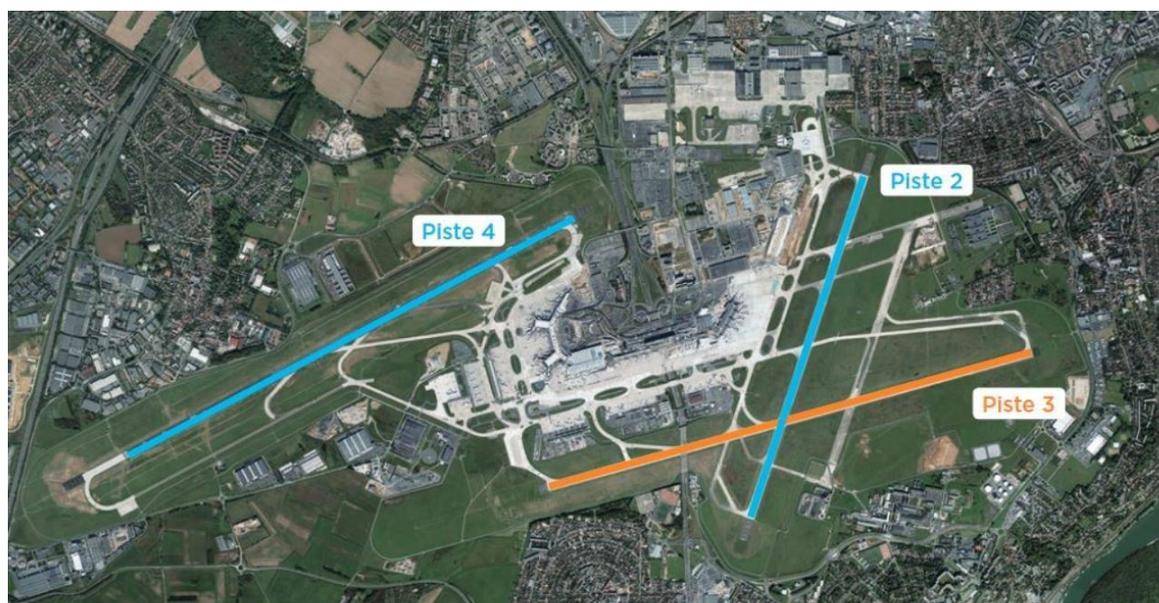


Figure 18 : Représentation des trois pistes de l'aérodrome de Paris-Orly Source : Bruitparif

Annexe 2 : Liste des aéroports acnusés

Aérodrome	Niveau de certification ACA
Bâle - Mulhouse	2
Beauvais - Tillé	Non engagé
Bordeaux - Mérignac	Non engagé
Lyon - Saint-Exupéry	3+
Marseille - Provence	3
Nantes - Atlantique	1
Nice - Côte-d'Azur	3+
Paris - Charles-de-Gaulle	3
Paris - Le Bourget	3
Paris - Orly	3
Toulouse - Blagnac	2

Figure 19 : Liste des aéroports acnusés Source : ACNUSA

Annexe 3 : Script aboutissant à la réalisation de l'ACP et de la CAH

```
# Charger les packages

if(!require(ade4))
{install.packages("ade4")
library(ade4)}

## Loading required package: ade4

if(!require(factoextra))
{install.packages("factoextra")
library(factoextra)}

if(!require(plyr))
{install.packages("plyr")
library(plyr)}

## Loading required package: plyr

# Importation des données
load("Testfinal.RData")

# Sélection des variables portant sur notre étude
tabsocioeco <- Testfinal[, c(6:7, 11:12)]

# Changement d'échelle de la variable portant sur le revenu médian
tabsocioeco$`Revenu médian` <- 100*(tabsocioeco$`Revenu médian`)/max(tabsocioeco$`Revenu médian`)

# Résumé de la distribution de nos variables
summary(tabsocioeco) # Toutes nos variables ont la même échelle de mesure

## Taux de bacheliers Revenu médian Taux de chomeurs Taux d'ouvriers
## Min. : 0.00 Min. : 17.24 Min. : 0.000 Min. : 0.00
## 1st Qu.: 39.42 1st Qu.: 39.32 1st Qu.: 6.678 1st Qu.: 10.31
## Median : 47.94 Median : 51.19 Median : 8.830 Median : 15.38
## Mean : 48.35 Mean : 49.91 Mean : 9.986 Mean : 16.44
## 3rd Qu.: 56.80 3rd Qu.: 58.72 3rd Qu.: 12.646 3rd Qu.: 21.10
## Max. : 82.98 Max. : 100.00 Max. : 32.979 Max. : 100.00
```

```
# Toutes nos variables étant quantitatives, nous déterminons le coefficient de corrélation linéaire entre chacune de nos variables
```

```
cor(tabsocioeco)
```

```
##          Taux de bacheliers Revenu médian Taux de chomeurs
## Taux de bacheliers      1.0000000  0.7913267  -0.5438032
## Revenu médian          0.7913267  1.0000000  -0.7563841
## Taux de chomeurs      -0.5438032  -0.7563841   1.0000000
## Taux d'ouvriers       -0.8032724  -0.7504013   0.5847477
##          Taux d'ouvriers
## Taux de bacheliers    -0.8032724
## Revenu médian        -0.7504013
## Taux de chomeurs      0.5847477
## Taux d'ouvriers       1.0000000
```

```
# Nos variables étant linéairement corrélées entre elles, nous pouvons donc réaliser une ACP
```

```
ACP=dudi.pca(tabsocioeco, scannf = F, nf=4)
```

```
inertie=inertia.dudi(ACP, col.inertia = T, row.inertia = T)
```

```
## Calcul des inerties totale
```

```
cumul=cumsum(ACP$eig)/sum(ACP$eig)*100
```

```
cumul
```

```
## [1] 78.06844 91.05811 96.52979 100.00000
```

```
inertie$tot.inertia
```

```
##  inertia  cum  cum(%)
## Ax1 3.1227375 3.122737 78.06844
## Ax2 0.5195869 3.642324 91.05811
## Ax3 0.2188674 3.861192 96.52979
## Ax4 0.1388082 4.000000 100.00000
```

```
# L'axe 1 et 2 restituent 91% de l'inertie totale
```

```
# Les 3 premiers axes restituent 96% de l'information
```

```
# Représentation graphique de la part cumulée de variance expliquée
```

```
barplot((ACP$eig)/sum(ACP$eig)*100,  
  xlab = "Axes",  
  ylab = "Pourcentage cumulé de variance expliquée",  
  ylim = c(0,100),  
  names = paste("Axe", seq(1,4, 1)),  
  col = "black",  
  border = "white")
```

```

##### ANALYSE ET INTERPRETATIONS
# Les variables bien représentées
ACP$co

##           Comp1   Comp2   Comp3   Comp4
## Taux de bacheliers -0.8934308 -0.33668635 0.20505581 0.21535057
## Revenu médian    -0.9362036 0.09718177 0.21401203 -0.26129950
## Taux de chomeurs  0.8080919 -0.56559928 0.08695841 -0.13972546
## Taux d'ouvriers  0.8916442 0.27727671 0.35136395 0.06805665

par(mfrow=c(1,2))
s.corcircle(ACP$co,xax=1,yax=2)
layout(1)

# Toutes les variables sont bien représentées sur le 1er plan factoriel

#Interprétation de l'ACP
#Les variables taux d'ouvrier et taux de chômeur sont corrélées positivement au premier axe

#Les variables revenu médian et taux de bachelier sont corrélées négativement au premier axe

# On active le package FactoClass pour réaliser la classification avec la fonction ward.cluster()

if(!require(FactoClass))
{install.packages("FactoClass")
library(FactoClass)}

## Loading required package: FactoClass
## Loading required package: ggrepel
## Loading required package: xtable
## Loading required package: scatterplot3d

# 2 - Realisation de la CAH

table_distance=dist(tabsocioeco)

mon_arbre=hclust(table_distance,method="ward.D2")

layout(1)
plot(mon_arbre)

dendroPCS <- as.dendrogram(mon_arbre)
plot(dendroPCS, leaflab = "none")

tabsocioeco$CLASSE <- paste("Classe", cutree(mon_arbre, k=4))

```

```

# - Description des classes de la CAH
# Pour apprecier le profil type de chaque classe, on prend la moyenne pour chaque variable
# fonction aggregate() : divise le tableau en mini-tableaux sur lesquels on realise des operations
# Ici on utilise aggregate() pour chacun des 4 classes de communes creees

meanClass <- aggregate (tabsocioeco[, 1:4], by = list(tabsocioeco$CLASSE), FUN = mean)

# Donnons un nom a la colonne qui precise les classes
colnames(meanClass) [1] <- "CLASSE"

# barplot() : creer un diagramme en batons (histogramme) pour caracteriser chaque groupe
# utilisation du package ggplot2 pour que ces graphiques figurent sur une seule planche : facet
wrap()
# ggplot2 suppose de travailler sur un tableau en format long...

# Charger les packages reshape2 et ggplot2

if(!require(reshape2))
{install.packages("reshape2")
 library(reshape2)}

## Loading required package: reshape2

if(!require(ggplot2))
{install.packages("ggplot2")
 library(ggplot2)}

classLong <-melt(meanClass, id.vars = "CLASSE")
# argument id.vars : precise la colonne ou figurent les identifiants

ggplot(classLong) +
  geom_bar(aes(x = variable, y = value, fill = CLASSE),
           stat = "identity") +
  scale_fill_hue() +
  facet_wrap(~ CLASSE) +
  coord_flip() + theme_bw()

```

```

# Observation du profil des différentes classes

# La comparaison se fait par rapport à la moyenne de nos variables (car quantitatives)
# L'indicateur choisit est donc la moyenne des variables
summary(tabsocioeco)

## Taux de bacheliers Revenu médian Taux de chomeurs Taux d'ouvriers
## Min. :0.00 Min. :17.24 Min. :0.000 Min. :0.00
## 1st Qu.:39.42 1st Qu.:39.32 1st Qu.:6.678 1st Qu.:10.31
## Median :47.94 Median :51.19 Median :8.830 Median :15.38
## Mean :48.35 Mean :49.91 Mean :9.986 Mean :16.44
## 3rd Qu.:56.80 3rd Qu.:58.72 3rd Qu.:12.646 3rd Qu.:21.10
## Max. :82.98 Max. :100.00 Max. :32.979 Max. :100.00
## CLASSE
## Length:1016
## Class :character
## Mode :character
##

meanClass

## CLASSE Taux de bacheliers Revenu médian Taux de chomeurs Taux d'ouvriers
## 1 Classe 1 42.57447 43.79773 10.748694 19.252746
## 2 Classe 2 55.91947 57.07828 7.516249 10.958827
## 3 Classe 3 27.64641 29.91025 17.353973 32.174001
## 4 Classe 4 70.37140 73.83386 6.775891 5.333509

# Classe 1 iris moyen : taux de bachelier moyen, revenu médian moyen, taux de chomeur moyen,
taux d'ouvrier moyen

# Classe 2 iris favorisé: présence de bachelier assez élevée, revenu médian assez élevé, taux de c
homeurs faible, faible taux d'ouvrier

# Classe 3 iris defavorisé : faible taux de bachelier, faible revenu médian, forte présence de cho
meurs, forte présence d'ouvrier

# Classe 4 iris très favorisé : forte présence de bachelier, revenu médian très élevé, faible taux de
chomeur, faible taux d'ouvrier

tabsocioeco$code_iris <- Testfinal$`Code de l'IRIS`

#Recuperation du tableau en sortie

write.csv(tabsocioeco,file = "testnew.csv")

```