

Le Bruit, Effets Sanitaires et Réglementations

REDACTEUR : PATRIC KRUISSEL

EDITION DU : 6 JANVIER 2010

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	2	
1. INTRODUCTION	4	
2. LE BRUIT, UNE NUISANCE MAJEURE IMPACTANT LA SANTE	5	
2.1. LE BRUIT EST UNE NUISANCE MAJEURE	5	
2.2. <i>LE BRUIT IMPACTE LA SANTE</i> :	5	
2.2.1. Les effets physiologiques :		5
2.2.2. Les effets psychologiques		6
3. LES PATHOLOGIES DU BRUIT	8	
3.1. PRINCIPALES PATHOLOGIES, ETUDES EPIDEMIOLOGIQUES DE REFERENCE	8	
3.2. PARAMETRES EPIDEMIOLOGIQUES DU BRUIT	10	
3.3. EFFETS DU BRUIT SUR LE SOMMEIL	11	
3.3.1. Description		11
3.3.2. L'habituatation au bruit nocturne		13
3.3.3. Les différences interindividuelles de la susceptibilité au bruit nocturne		13
3.3.4. Les effets chroniques de la perturbation du sommeil		13
3.4. LES EFFETS DU BRUIT SUR LA SPHERE VEGETATIVE	13	
3.5. LES EFFETS DU BRUIT SUR LE SYSTEME ENDOCRINIEN	14	
3.6. LES EFFETS DU BRUIT SUR LE SYSTEME IMMUNITAIRE	15	
3.7. LES EFFETS DU BRUIT SUR LA SANTE MENTALE	15	
3.8. L'EXPOSITION AU BRUIT ET LA CONSOMMATION DE MEDICAMENTS	16	
3.9. LES EFFETS DU BRUIT SUR LE RELATIONNEL	17	
4. EFFETS DU BRUIT SUR LES ATTITUDES ET LE COMPORTEMENT SOCIAL	18	
4.1. LES FACTEURS DE MANIFESTATION DE LA GENE PSYCHOLOGIQUE INDUITE PAR LE BRUIT	18	
4.2. LES EFFETS DU BRUIT SUR LES PERFORMANCES	20	
4.2.1. Les tâches affectées par le bruit		20
4.2.2. Les tâches non affectées par le bruit		20
4.3. LES EFFETS DU BRUIT SUR LA COMMUNICATION	20	
4.4. LES EFFETS DU BRUIT SUR L'APPRENTISSAGE	21	
4.4.1. Enquêtes menées		21
4.4.2. Aspects techniques et réglementaires du contrôle du bruit dans les écoles		22
4.4.3. Quelques résultats d'études		23
4.5. COUTS ECONOMIQUES DES IMPACTS SANITAIRES DU BRUIT	25	
4.6. SYNTHESE DES EFFETS DU BRUIT	26	

5.	LES REGLEMENTATIONS	27
5.1.	RAPPEL DES DESCRIPTEURS EXISTANTS	27
5.1.1.	Concept d'émergence	27
5.1.2.	Unité de mesure, descripteurs et indicateurs acoustiques	27
5.1.3.	Réglementations en matière de fixation des valeurs limites	31
5.2.	DIRECTIVE EUROPEENNE 2002/49/CE DU 25 JUIN 2002	31
5.3.	LES RECOMMANDATIONS	32
5.3.1.	Les différents acteurs	32
5.3.2.	Recommandations de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale	33
5.3.3.	RECOMMANDATIONS DE L'OMS	36
5.3.4.	Recommandations de l'Action 21 des Nations-Unis	37
6.	LES NUISANCES AERIENNES	38
6.1.	LES PRATIQUES AU NIVEAU INTERNATIONAL	38
6.1.1.	Cas du bruit aérien	38
6.1.2.	Indicateurs acoustiques de la gêne liée au bruit à proximité des aéroports	38
6.1.3.	L'usage d'un indicateur acoustique complémentaire au Lden	39
6.1.4.	Les indicateurs de la Directive européenne 2002/49/CE (2002)	40
6.1.5.	Pertinence sur le plan sanitaire	40
6.2.	PERSPECTIVES DE REDUCTION DU BRUIT	41
6.3.	ÉTAT DES LIEUX DE LA SITUATION FRANÇAISE.....	42
6.4.	AMELIORATIONS DES TECHNIQUES ET PROCEDURES.....	44
6.4.1.	Les critères d'un bon indicateur d'exposition au bruit	44
6.4.2.	La composition spectrale et la présence de sons purs	44
6.4.3.	La prise en compte du nombre d'évènements bruyants et de leur niveau de crête	45
6.4.4.	Construction d'un indicateur intégré dans le temps (LAeq)	45
7.	REFERENCES	46
7.1.	SITES INTERNET	46
7.2.	BIBLIOGRAPHIE	479

1. INTRODUCTION

Ce rapport élaboré par les associations de protection de la santé des populations subissant les nuisances aériennes, est une compilation de comptes-rendus d'études épidémiologiques et de méta-analyses, c'est-à-dire d'analyses comparatives des études internationales sur l'impact sanitaire du bruit, notamment celle de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire et Environnementale¹ et celle de Jean-Philippe Camard du l'Observatoire Régional de Santé d'Ile-de-France².

La compilation de ces résultats montre qu'il est nécessaire de poursuivre certaines études pour confirmer certaines conclusions à la marge. Mais surtout elle démontre que les éléments, qui font consensus au sein des plus grands experts internationaux, notamment ceux de l'OMS, sont suffisamment irréfutables, pour que les pouvoirs publics au plus haut niveau prennent des décisions à la hauteur de l'impact sanitaire provoqué par le trafic aérien.

2. LE BRUIT, UNE NUISANCE MAJEURE IMPACTANT LA SANTE

2.1. LE BRUIT EST UNE NUISANCE MAJEURE

Le bruit figure parmi les nuisances majeures ressenties par les Français dans leur vie quotidienne et leur environnement de proximité. L'enquête réalisée en 2001 par l'IFEN montre que 36 % des Français sont gênés dans leur vie quotidienne par le bruit. Ils sont 49 % dans les communes de 100 000 habitants et plus et 61 % dans l'agglomération parisienne³. Ces résultats rejoignent ceux obtenus par l'INSEE où le bruit est la nuisance ressentie à domicile la plus citée (54 %) par les ménages vivant dans les grandes agglomérations⁴. Parmi les Français, qui se disent gênés par le bruit (51 %), 66 % évoquent en premier lieu la circulation automobile et 45 % les deux roues. Viennent ensuite les nuisances du voisinage (21 %) et le bruit des avions (17 %)⁵. Une personne interrogée sur cinq considère que le bruit constitue un risque « très élevé » pour la santé, près d'une personne sur deux (48 %) l'estime « plutôt élevé ». Seuls 27 % d'entre l'estiment « plutôt faible »⁶.

Deux autres facteurs déterminants sont l'émergence du bruit perturbateur par rapport au bruit ambiant, et le fait que le consommateur *subisse ou recherche* ce bruit. Un spectateur de course de formule 1 se délectera du bruit au passage des bolides pendant que les riverains pourtant moins exposés ne pourront endurer ce supplice.

Dans les années 70, 33 % des résidents vivant à moins de 8 km de l'aéroport Kennedy à New-York se plaignaient des nuisances nocturnes⁷. 30 ans plus tard, malgré une amélioration technique des avions, l'étude de Franssen en 2006, réalisée sur des populations résidant dans un rayon de 25 km autour de l'aéroport de Schiphol d'Amsterdam, a confirmé l'impact de l'exposition au bruit des avions sur la santé perçue parmi les riverains. Lorsque l'on interroge les riverains d'une plate-forme, sur laquelle sont autorisés les vols de nuit, sur la qualité de leur sommeil, on constate qu'entre 20 et 40 % des personnes sont réveillées la nuit ou le matin de bonne heure⁸.

2.2. LE BRUIT IMPACTE LA SANTE

Le bruit induit deux types d'effets sur la santé : les effets physiologiques et les effets psychologiques. La conception de la santé correspond à la définition de l'OMS, très large et en partie subjective : « *la santé est un état de complet bien-être physique, mental et social, et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité* »⁹. L'examen des effets du bruit sur les élèves, les étudiants et les enseignants, à tous niveaux, fait apparaître le bruit comme un facteur de nuisance, parfois de santé publique. Un chapitre sera donc consacré aux conséquences du bruit sur l'apprentissage en milieu scolaire.

Les effets subjectifs de l'exposition au bruit peuvent entraîner une gêne, définie par l'OMS comme « *une sensation de désagrément, de déplaisir provoquée par un facteur de l'environnement dont l'individu ou le groupe connaît ou imagine le pouvoir d'affecter sa santé* » et donnant lieu à une déclaration individuelle. Les effets objectifs peuvent être mesurés, évalués selon des critères applicables à tous les individus. La difficulté dans ce cas consiste à pouvoir relier de manière certaine le facteur suspecté à l'effet sanitaire observé. Car corrélation ne signifie pas causalité, de nombreux facteurs de confusion tels que les données socioéconomiques pouvant laisser croire à une relation causale.

2.2.1. LES EFFETS PHYSIOLOGIQUES :

La soumission au bruit de l'appareil auditif se traduit par la fatigue auditive et la perte auditive, qui sont évaluées par une audiométrie tonale liminaire sur la gamme des fréquences audibles. Les effets physiologiques les mieux identifiés sont les lésions auditives, les pathologies cardiovasculaires et la perturbation du sommeil. Ces effets peuvent être quantifiés de façon objective par la mesure de différents paramètres (acuité auditive, dosages biologiques, pression artérielle...). Les lésions auditives provoquées par le trafic aérien sont rares. Une

étude taïwanaise a mis en évidence une relation entre des atteintes de l'audition chez des enfants et la proximité de l'aéroport Kaohsiung¹⁰. Des lésions auditives peuvent être provoquées chez des salariés travaillant sur une plate-forme aéroportuaire n'ayant pas utilisé les protections acoustiques obligatoires. La prévention et correction de ces risques sont effectuées dans le cadre de la médecine du travail.

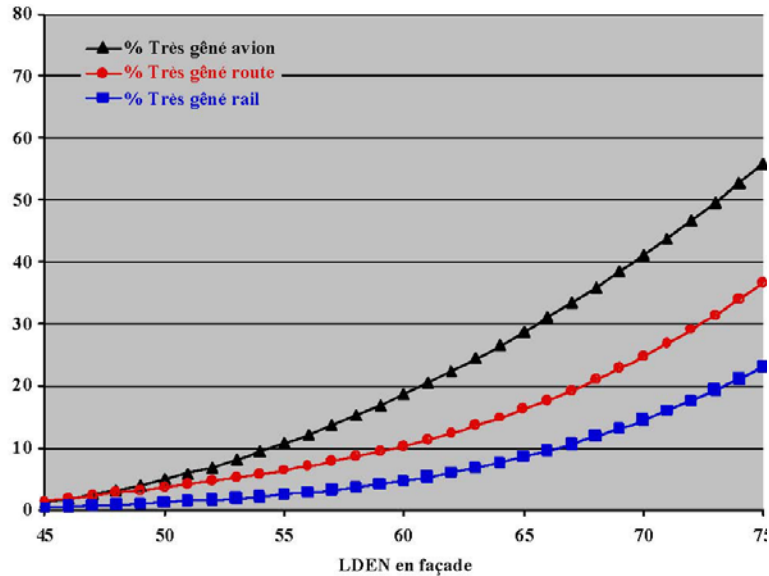
Les effets extra-auditifs du bruit, nombreux, sont difficiles à attribuer de façon indéniable et univoque au bruit en raison de l'existence de nombreux facteurs de confusion. Ils sont appréciés soit par des mesures *objectives* (par exemples les mesures électro physiologiques : électroencéphalographie, électro-oculographie et/ou des paramètres des systèmes végétatifs : fréquences cardiaque et respiratoire ; les modifications de concentrations hormonales...) ; soit par des mesures *subjectives* (appréciation de la qualité du sommeil par des questionnaires appropriés...). L'OMS a proposé en 2000 et 2005 des valeurs guides (exposition mesurée à travers deux descripteurs : un descripteur énergétique et un descripteur évènementiel) relatives aux effets du bruit sur la santé et dans des environnements spécifiques (intérieur des logements, intérieur des chambres à coucher, salles de classe et jardins d'enfants, etc.).

2.2.2. LES EFFETS PSYCHOLOGIQUES

L'établissement des liens entre effets sanitaires *subjectifs* et niveaux d'exposition au bruit est difficile. Les paramètres utilisés pour la mesure physique des bruits (intensité énergétique, durée, fréquence, etc.) sont insuffisants pour exprimer la grande variabilité des réactions individuelles^{11 12}. Les réponses individuelles aux bruits sont en effet éminemment subjectives, variant en fonction de prédispositions physiologiques et psychologiques individuelles et selon les diverses sources. De nombreuses enquêtes socio-acoustiques ont été menées depuis près de 60 ans afin d'étudier la gêne due au bruit. Fields en a recensé 521 sur la période 1943-2000¹³. Or « *l'utilisation de différents types d'échelle ainsi que des formulations variées ont rendu difficile la comparaison des résultats d'enquêtes, surtout sur le plan international* ». Pour ces raisons, l'ICBEN¹⁴ a lancé en 1993 des travaux afin de faire des recommandations concernant la conception des enquêtes sur la gêne due au bruit et plus particulièrement sur le choix des échelles de gêne ainsi que sur la formulation et la structure des questions à poser aux personnes enquêtées. Le groupe de travail de l'ISO a proposé en 2003 un projet de recommandation relatif à l'évaluation de la gêne due au bruit¹⁵. Ces enquêtes ont montré pour la plupart « *qu'il est difficile de fixer le niveau précis où commence l'inconfort et ont souligné le caractère variable du lien existant entre les indices de gêne et l'intensité physique du son* ».

Des relations « dose-réponse » ont cependant pu être établies entre niveaux d'exposition au bruit du transport et gêne individuelle¹⁶. L'indicateur utilisé dans ces travaux est le Lden en façade. Cependant les corrélations entre niveaux d'exposition et gêne individuelle, bien que significatives¹⁷, ne sont que partielles. Ainsi le bruit n'expliquerait au mieux que 30 à 40 % de la gêne exprimée, bien d'autres facteurs non acoustiques de modulation intervenant dans la réaction individuelle.

Les relations entre bruit et troubles du comportement sont étudiées soit sur le terrain, soit par des travaux en laboratoire. Les mécanismes de ces phénomènes ne sont aujourd'hui pas élucidés. La gêne peut apparaître à de faibles niveaux de bruit. Dans le cas du trafic aérien, la corrélation gêne – intensité sonore n'existe pas. Il semble que la répétitivité, la gamme de fréquence et l'impossibilité de pouvoir contrôler la source sonore soit plus déterminante que son intensité. On constate sur la figure suivante que le rail bénéficie d'un « bonus » significatif par comparaison avec les transports routier et aérien.



Gêne due au bruit des différents moyens de transport

La directive européenne 2002/49/CE tient compte de ces différences pour l'élaboration des cartes de bruit. La transposition en droit français a été faite par le décret du 26 mars 2006. L'arrêté du 4 avril 2006 en donne les valeurs limites suivantes :

Valeurs limites dB(A)				
Indicateurs de bruit	Aérodromes	Route et/ou ligne à grande vitesse	Voie ferrée conventionnelle	Activité industrielle
Lden	55	68	73	71
Ln		62	65	60

Ces valeurs limites concernent les bâtiments d'habitation ainsi que les établissements d'enseignement et de santé.

3. LES PATHOLOGIES DU BRUIT

3.1. PRINCIPALES PATHOLOGIES, ETUDES EPIDEMIOLOGIQUES DE REFERENCE

Les impacts sanitaires de l'exposition au bruit sont divers, comprenant l'impact sur l'audition, les effets dits « extra auditifs » (effets sur le sommeil, sur la sphère végétative, sur le système endocrinien, sur le système immunitaire, sur la santé mentale), les effets subjectifs (effets du bruit sur les attitudes et le comportement social, gêne due au bruit, effets sur les performances, effets sur la communication). Les effets liés aux multi-expositions au bruit (expositions cumulées) et aux expositions combinées du bruit avec d'autres sources de nuisances (bruit et agents ototoxiques, bruit et chaleur) demeurent mal connus. Certaines populations présentent une vulnérabilité particulière à l'exposition au bruit : enfants en milieu scolaire en phase d'apprentissage¹⁸, travailleurs exposés simultanément à des nuisances ou médicaments de différents types (solvants aromatiques, monoxyde de carbone et acide cyanhydrique, antibiotiques, diurétiques, acide acétylsalicylique, anti-tumoraux...), personnes âgées et personnes touchées par une déficience auditive, appareillées ou non. Les coûts économiques des impacts sanitaires du bruit comprennent le coût des réductions, voire des suppressions de bruit, jusqu'au coût des traitements médicamenteux pouvant être associés à une exposition au bruit.

Les impacts du bruit sur le système cardiovasculaire se manifestent à court terme par une modification de la tension artérielle, une augmentation transitoire du rythme cardiaque (bruit intense), une augmentation de sécrétion des hormones de stress. A long terme, plusieurs études montrent une augmentation de certaines maladies cardiovasculaires (angine de poitrine, hypertension, infarctus du myocarde...).

Les effets du bruit sur la perturbation du sommeil sont étudiés de manière expérimentale en laboratoire et par des études épidémiologiques. Les effets à court terme se traduisent par une difficulté d'endormissement, des éveils au cours de la nuit et des troubles du sommeil. A plus long terme, ces troubles du sommeil peuvent nuire à l'efficacité au travail, à l'apprentissage (surtout chez l'enfant), à une perte de vigilance. Des accidents du travail et des accidents de la route sont donc liés à ces troubles du sommeil.

Les nombreux effets de la gêne peuvent se regrouper en deux grands types : les impacts sanitaires proprement dits (pathologies psychosomatiques, anxiété, dépression...) et les effets en termes de comportements (volonté de déménager, obligation d'insonoriser son logement, être obligé de fermer la fenêtre pour suivre une émission, une conversation...).

L'institut national de santé publique et de l'environnement des Pays-Bas a publié, en 2002, un important bilan à partir de plus de cinq cents publications et quarante-trois études épidémiologiques effectuées entre 1970 et 1999 sur la relation entre l'exposition au bruit, la pression artérielle et l'insuffisance coronaire¹⁹. Les auteurs notent une association significative entre l'hypertension artérielle et l'exposition aux nuisances sonores du trafic aérien avec augmentation du risque par augmentation du bruit.

De nombreux travaux épidémiologiques ont été effectués aux alentours des aéroports^{20 21 22 23 24}. L'étude de Meecham et Shaw²⁵ a analysé sur une période de 10 ans la population proche de l'aéroport de Los Angeles. Un accroissement de 18 % des décès cardio-vasculaires a été constaté au-delà de 75 ans et un accroissement de 5 % de la mortalité dans la population générale comparé à une population témoin. L'étude démontre même une augmentation de 100 % des suicides de la tranche des 45 – 54 ans, confirmé par une autre étude à Sydney²⁶. Les mêmes auteurs confirment l'augmentation de la mortalité dans une étude plus récente²⁷. Les études en 1979 autour de l'aéroport de Sydney ont trouvé une surmortalité chez les plus de 65 ans et les enfants de moins de 5 ans²⁸. Par contre, une étude de 1980 autour de l'aéroport de Los Angeles ne mettait plus en évidence de surmortalité après la prise en compte de facteurs sociologiques tels que l'âge, l'ethnie, le sexe²⁹.

Les études épidémiologiques comparant la gêne rapportée par les individus à leur exposition réelle montrent que s'il existe bien une relation globalement positive entre l'exposition et la gêne, de nombreux facteurs de confusion dont les facteurs socio-économiques, la sensibilité individuelle au bruit, l'âge... interviennent dans cette relation. Le trafic aérien est particulièrement emblématique de cette caractéristique. Des individus moyennement exposés se plaignent souvent plus de la gêne occasionnée par le bruit des avions que ceux très exposés, qui eux cumulent cette gêne avec des préoccupations souvent plus importantes^{30 31 32}.

Le bruit altère la communication, rend nécessaire un effort soutenu pour la compréhension et provoque des difficultés de concentration. Ces effets entraînent une diminution des performances^{33 34} lors de travaux intellectuels et d'apprentissage.

Trois études épidémiologiques en Ile-de-France ont rendu leurs conclusions. La première ETADAM³⁵ en 2000, a mis en évidence l'existence de liens entre exposition au bruit des avions et certaines pathologies ou indicateurs de l'état de santé (manifestations d'angoisse, consommations de médicaments à visée neuropsychiatriques. Dans les zones très exposées aux bruits d'avions, les indicateurs d'angoisse sont 4 fois plus importants et le nombre de prescriptions de médicaments pour les nerfs double (antidépresseurs, tranquillisants...).

La deuxième INSOMNIA³⁶ en 2004 financée par le CSNA³⁷ et l'ADVOCNAR a permis l'étude des troubles du sommeil des riverains de l'aéroport de Roissy CDG. A partir d'un questionnaire standard international spécifique des troubles du sommeil (MOS-sleep GHQ 28), l'étude montre notamment un nombre plus important de ces troubles et dans une moindre mesure un accroissement du stress et de l'angoisse parmi les populations survolées. Cette première étude française confirme l'impact sanitaire des mouvements aériens nocturnes déjà démontré dans d'autres pays.

La troisième étude dirigée par Jean-Marie Cohen du cabinet Open Rome a été menée en 2005 sur 4 391 patients chez 78 médecins franciliens³⁸. Cette étude a mis en évidence les troubles de la tension artérielle chez les personnes les plus exposées, c'est-à-dire pour le bruit aérien le fait d'être survolé à moins de 2 000 mètres, soit plus de 2 millions de franciliens concernés. Elle relie aussi l'exposition au bruit à une fréquence plus importante des états anxieux, à une augmentation du nombre de médicaments prescrits, à une plus grande fréquence des hospitalisations et des arrêts de travail.

Contrairement au système oculaire, le système auditif demeure actif pendant le sommeil, et les sons perçus pendant cette période sont évalués par le cortex cérébral. Les études ayant montré une altération du sommeil à partir de 30 dB(A), l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) préconise de ne pas dépasser ce seuil dans la chambre à coucher. Les troubles du sommeil ne sont pas simplement représentés par la situation de réveil. En deçà du seuil de réveil, on constate des perturbations des cycles du sommeil pouvant aboutir à des troubles de santé.

Les auteurs de la récente étude HYENA ont démontré qu'il existe une association positive entre le niveau de bruit aérien nocturne (L_{night} supérieur à 35 dB) et l'hypertension artérielle d'une part et l'augmentation des pressions diastolique et systolique³⁹. Ce travail visait à mesurer l'impact sur la tension artérielle et les maladies cardiovasculaires du bruit généré par les trafics aériens et la circulation routière induite auprès de 4 800 personnes vivant depuis au moins 5 ans autour de 6 aéroports européens majeurs (Londres, Stockholm, Milan, Berlin, Amsterdam et Athènes). Alors que les nuisances du trafic routier n'ont pas augmenté, les résultats d'une actualisation de cette étude en novembre 2009⁴⁰ montrent que le taux de nuisances générées par le trafic aérien est plus élevé que celui prévu par les courbes de prédiction standard, avec une différence estimée entre 5 et 7 décibels. D'autres données suggèrent également que l'attitude des Européens vis-à-vis du bruit aérien a évolué au cours des années et que le modèle de prévision de la Commission, fondé sur des études datant de

plus de 25 ans, doit être modifié. Aux yeux des auteurs, « *des mesures doivent être envisagées pour réduire le bruit nocturne à proximité des aéroports, dans le but de protéger la santé des riverains* ». Matthias Basner en Allemagne a décrit le modèle de transition de Markov en six étapes de sommeil construit pour évaluer quantitativement l'effet sur la structure du sommeil d'un couvre-feu à l'aéroport de Francfort⁴¹. L'objectif est d'optimiser les profils de trafic dans les aéroports et de guider les décideurs.

Dans le cadre de sa mission d'information envers le particulier, l'ACNUSA a également lancé une étude intitulée "**Discussion sur les effets du bruit des aéronefs touchant la santé**" (**DEBATS**), afin d'améliorer les connaissances sur l'impact réel des nuisances sonores sur la santé. Elle regrette cependant la lenteur du ministère de la santé à débloquent les crédits nécessaires.

Le Préfet de région d'Ile-de-France préside le comité de pilotage de l'étude d'impact sanitaire (bruit et pollution) du trafic aérien de Paris-Charles-de-Gaulle, Paris-Orly et Paris-Le Bourget, intitulée SURVOL. L'étude de surveillance menée sur les trois plates-formes aéroportuaires franciliennes a été confiée en décembre 2007 par le Préfet de région, 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). Le comité de pilotage est composé de 53 membres représentant à parité les collectivités (Conseil régional, conseils généraux, Association des Maires d'Ile-de-France, CESR), les associations de riverains, les usagers et l'Etat. AIRPARIF et BRUITPARIF font partie de l'équipe projet. L'Autorité de contrôle des nuisances sonores aéroportuaires (ACNUSA) participe à cette démarche dans le comité scientifique.

3.2. PARAMETRES EPIDEMIOLOGIQUES DU BRUIT

La nocivité du bruit est liée à certain nombre de paramètres.

- *La qualité du bruit* : les bruits de fréquence aiguë (fréquences élevées) sont, à intensité égale, plus nocifs que les bruits graves. Par contre les sons graves provoquent une gêne plus importante.
- *La pureté* : un son pur de forte intensité est plus traumatisant pour l'oreille interne qu'un bruit à large spectre. Mais il faut noter que les sons purs sont peu fréquents en milieu industriel ou dans l'environnement.
- *L'intensité du bruit* : le risque de dommages irréversibles croît avec l'augmentation de l'intensité. Il existe une limite au-dessous de laquelle aucune fatigue mécanique n'apparaît. Dans ces conditions, l'oreille peut supporter un nombre quasi infini de sollicitations. Par exemple, les expositions de longue durée à des niveaux sonores inférieurs à 70-80 dB n'induisent pas de lésions. En revanche un son très intense procure une sensation désagréable, voire même douloureuse. Au delà de 120 dB, les tympanes et les structures ciliaires de l'oreille interne peuvent subir des lésions importantes.
- *L'émergence et rythme du bruit* : un bruit impulsionnel ayant un caractère soudain et imprévisible est plus nocif qu'un bruit continu de même énergie.
- *La durée d'exposition* : pour une même ambiance sonore, plus la durée d'exposition est longue, plus les lésions auditives de l'oreille interne seront importantes. La succession des expositions professionnelle et extraprofessionnelle (discothèques, concerts, baladeurs...) augmente la durée d'exposition, donc le risque de lésions auditives.
- *La vulnérabilité individuelle* : l'âge, les antécédents d'étiologie infectieuse de la sphère ORL, les antécédents de traumatisme crânien, certains troubles métaboliques ou de la tension artérielle peuvent potentialiser l'effet délétère du bruit. L'importance de la variation interindividuelle de la susceptibilité de l'homme vis-à-vis du traumatisme acoustique est connue depuis des décennies ; elle est multifactorielle. Sans entrer dans les détails, on sait que cette susceptibilité peut être corrélée avec l'état de santé général

physique et mentale (l'état cardiovasculaire, le taux d'agrégation plaquettaire, le diabète, l'hypertension, les hypo-magnésies sévères, l'état neuropsychique...). Par conséquent, l'âge est aussi un facteur de fragilité cochléaire notamment au-delà de 50 ans⁴². Les effets du bruit en fonction de l'âge de sujets exposés ont été étudiés à l'aide de plusieurs modèles expérimentaux : le chinchilla⁴³, la gerbille⁴⁴ et le rat⁴⁵. Quel que soit le modèle expérimental considéré, il apparaît qu'un sujet âgé est plus vulnérable au bruit qu'un sujet jeune⁴⁶.

→ *L'association avec d'autres expositions à risque* : l'exposition au bruit associée aux vibrations et à des agents chimiques ou médicamenteux ototoxiques peut augmenter le risque de traumatisme auditif.

3.3. EFFETS DU BRUIT SUR LE SOMMEIL

3.3.1. DESCRIPTION

Les perturbations du sommeil sont souvent présentées comme étant la plainte majeure des personnes exposées au bruit en complément de la gêne exprimée. La sensibilité et la fragilité du sommeil méritent qu'on leur accorde une attention particulière. Le sommeil et la veille sont les deux états physiologiques fondamentaux qui rythment notre vie quotidienne. Le sommeil occupe en moyenne un tiers de notre vie et il nous est indispensable pour récupérer de l'épuisement momentané, tant de nos capacités physiques que de nos capacités mentales.

Le sommeil n'est pas un état unique mais une succession d'états (on parle de stades ou de cycles de sommeil) qui s'organisent de façon quasiment identique et relativement ordonnée pour une classe d'âge déterminée. C'est ainsi que l'on distingue des stades de sommeil plus ou moins profonds (selon l'intensité de la stimulation qu'il faut produire pour réveiller le dormeur) ou encore des stades de sommeil qui sont associés ou non aux rêves. Le sommeil est essentiel pour la survie de l'individu et une forte réduction de sa durée entraîne des troubles plus ou moins marqués, dont le principal est la réduction du niveau de vigilance de l'individu éveillé, avec toutes les conséquences possibles en termes de fatigue, de mauvaises performances et même de survenue d'accidents.

La qualité du sommeil peut être appréciée par des mesures objectives (mesures électro physiologiques : électroencéphalographie⁴⁷, électro-oculographie et/ou mesures végétatives : fréquences cardiaque et respiratoire) ainsi que par des mesures subjectives (appréciation de la qualité du sommeil par des questionnaires appropriés). La structure physiologique du sommeil est quantifiée par divers paramètres tels que la latence d'endormissement, les éveils et les changements de stades, ainsi que les modifications des rythmes propres aux stades de sommeil.

Les études sur l'impact du bruit sur le sommeil sont très nombreuses. La structure du sommeil est perturbée en allant vers un allègement de celui-ci jusqu'à un stade de réveil^{48 49 50 51 52}. La probabilité qu'un bruit agisse sur l'éveil dépend de son intensité, mais aussi de l'intervalle qui le sépare du bruit qui l'a précédé⁵³.

Le temps total de sommeil peut être diminué par une plus longue durée d'endormissement, par des éveils nocturnes prolongés ou encore par un éveil prématuré non suivi d'un rendormissement. Il a ainsi été montré que des bruits intermittents ayant une intensité maximale de 45 dB(A) et au-delà (L_{Amax} mesuré à l'intérieur des locaux), peuvent augmenter la latence d'endormissement de quelques minutes à près de 20 minutes⁵⁴. De même, au cours des heures matinales, les bruits ambiants peuvent plus facilement éveiller un dormeur et l'empêcher de retrouver le sommeil. Ce réveil prématuré peut, par conséquent, entraîner une forte réduction du temps de sommeil total.

Il est évident que l'exposition au bruit entraîne des éveils. Le seuil de bruit à partir duquel de tels éveils sont

observés, varie en fonction du stade de sommeil dans lequel se trouve plongé le dormeur. Ce seuil d'éveil est plus élevé lorsque le sommeil est profond et il diminue au fur et à mesure que le temps cumulé de sommeil augmente. Ce seuil dépend par ailleurs des caractéristiques physiques du bruit et également, très fortement, de la signification de celui-ci. Ainsi le nom du dormeur prononcé à voix basse a un pouvoir éveillant que n'a pas un bruit neutre. Un bruit d'alarme réveille plus facilement le dormeur qu'un bruit n'ayant pas de signification particulière.

La perturbation d'une séquence normale de sommeil (sans qu'un éveil soit nécessairement provoqué) peut être observée pour un niveau sonore momentané de l'ordre de 50 dB(A)⁵⁵. Des changements de stades de sommeil ont été reproduits en laboratoire pour des niveaux sonores de 40 à 45 dB(A)⁵⁶. Dans une même population générale, des éveils nocturnes peuvent être provoqués à partir de 55 dB(A). Cela ne signifie toutefois pas que pour des niveaux sonores inférieurs, mesurés à proximité immédiate du dormeur, il ne soit pas observé d'effets perturbateurs. Des réactions cardiovasculaires (accélérations cardiaques ou vasoconstrictions artériolaires) peuvent s'observer pour des niveaux nettement inférieurs, démontrant ainsi que l'organisme du dormeur a perçu la stimulation sonore, même si son comportement n'a pas changé de façon significative et qu'il n'en a aucune conscience immédiate ou lors du réveil matinal^{57 58}.

Sous l'effet du bruit, des changements immédiats dans la structure intime du sommeil, et notamment des changements de stades de sommeil, se font toujours dans le sens d'un allègement de ce dernier. Ces modifications ne sont pas perceptibles par le dormeur et il faut utiliser des enregistrements polygraphiques pour pouvoir les mettre en évidence. Ces changements de stades sont souvent accompagnés de mouvements corporels⁵⁹ et ils se font au détriment des stades de sommeil les plus profonds et au bénéfice des stades de sommeil les plus légers. Bien qu'encore non déterminées de façon irréfutable, les fonctions du sommeil à ondes lentes et du sommeil paradoxal semblent être essentielles pour la croissance et le développement harmonieux de l'organisme ainsi que pour la récupération de la fatigue physique ou mentale. Carter indique, par exemple, que la quantité de sommeil à ondes lentes peut être sensiblement réduite chez le jeune dormeur exposé à des nuisances sonores au cours de son sommeil⁶⁰. La rythmicité interne du sommeil paradoxal peut être notablement perturbée lors d'une exposition nocturne au bruit^{61 62}. Ainsi, l'instabilité du sommeil provoquée par le bruit entraîne une fragmentation de sa structure et, par là même, un amoindrissement de sa qualité ; caractéristiques que l'on peut retrouver, avec une intensité variable, dans des cas d'insomnie chronique.

Une étude montre qu'avant et après une intervention visant à réduire le trafic des transports, la qualité du sommeil des personnes concernées a été améliorée de façon objective (actimétrie) et subjective, suite à la réduction des niveaux sonores⁶³. Les études épidémiologiques concernant les effets du bruit sur la qualité du sommeil sont le plus souvent des études transversales, c'est-à-dire des études faisant le cliché d'un groupe de personnes souffrant d'une même pathologie. L'une de ces études combine le bruit aérien à d'autres nuisances sonores⁶⁴.

Les éveils nocturnes et les modifications de la structure interne du sommeil ne sont pas les seuls effets liés à la présence des bruits. Si, pour la population générale, les éveils peuvent être obtenus pour des intensités supérieures à 55 dB(A), la perturbation d'une séquence normale de sommeil peut apparaître dès le niveau de 45 dB(A). Notons que les valeurs recommandées par l'OMS à l'intérieur de la chambre à coucher sont de $L_{Aeq, 8h} = 30$ dB et de $L_{Amax} = 45$ dB⁶⁵.

Le nombre de modifications du processus hypnique ou d'éveil nocturnes augmente avec le nombre de bruits nocturnes, mais pas toujours de façon proportionnelle. Toutefois, lorsque le nombre de bruit est important ou que le niveau sonore de ceux-ci est élevé, le moindre éveil nocturne peut se prolonger en raison de la persistance de la perturbation et, dans ce cas, la fragmentation du sommeil peut être très marquée. Une telle perturbation du sommeil nocturne peut alors entraîner une fatigue notable⁶⁶ au cours de la journée suivante, se

traduisant par des épisodes d'hypovigilance ou des capacités de travail réduites.

Même s'il n'y a pas de *perception consciente* par le dormeur, chaque son est traité par le système sensoriel et les signaux nerveux sont conduits vers la région du cerveau qui traite les informations auditives. A partir de là, des fibres nerveuses peuvent véhiculer des informations spécifiques vers d'autres régions cérébrales et entraîner des réponses partielles ou globales⁶⁷.

3.3.2. L'HABITUATION AU BRUIT NOCTURNE

Un certain degré d'habituation aux conditions sonores nocturnes existe car il n'est pas rare de voir disparaître progressivement les plaintes subjectives de mauvaise qualité de sommeil après plusieurs jours ou semaines d'exposition au bruit. Cependant, l'habituation de l'organisme reste incomplète et les effets mesurés au cours du sommeil (notamment les effets cardio-vasculaires) montrent que les fonctions physiologiques du dormeur restent affectées par la répétition des perturbations sonores⁶⁸. Cette non habituation physiologique au bruit est préoccupante, car on ne peut négliger les effets possibles à long terme de la répétition, nuit après nuit, des perturbations sonores sur la santé des personnes exposées.

Ainsi, les accélérations cardiaques initiées de façon réflexe et observées en réponse à la plupart des bruits intenses se répètent journallement et sont toujours mesurables après des mois et des années d'exposition au bruit alors que les personnes exposées disent souvent ne plus être gênées par le bruit⁶⁹. Il est indéniable que ces réactions répétées sollicitent de façon permanente son système cardio-vasculaire.

3.3.3. LES DIFFERENCES INTERINDIVIDUELLES DE LA SUSCEPTIBILITE AU BRUIT NOCTURNE

Parmi les facteurs individuels les plus fréquemment évoqués, on trouve l'âge, le sexe ou le profil psychologique des personnes exposées.

En utilisant les stimulations sonores, on constate l'existence d'une nette hypo-réactivité électro-encéphalographique de l'enfant et les seuils d'éveil sont chez lui de 10 dB(A) plus élevés en moyenne que chez les adultes⁷⁰. En d'autres termes, l'enfant réagit peu aux perturbations sonores une fois endormi et il se plaint rarement d'avoir mal dormi en raison du bruit ambiant. Cette sensibilité réduite au niveau subjectif contraste toutefois avec une réactivité cardio-vasculaire qui est identique à celle que l'on peut observer chez l'adulte.

3.3.4. LES EFFETS CHRONIQUES DE LA PERTURBATION DU SOMMEIL

Il est évident qu'une perturbation du sommeil entraîne une réduction de la durée de celui-ci. La question la plus critique, pour les praticiens de la médecine, concerne les répercussions à long terme sur la santé d'une réduction quotidienne de la durée du sommeil, répétée jour après jour pendant des mois ou des années. Selon certains auteurs, le coût le plus important de la privation de sommeil pour la santé est la réduction de la qualité de vie. Pour ces auteurs, la privation de sommeil entraîne une fatigue chronique excessive et de la somnolence, une réduction de la motivation de travail et une baisse des performances conduisant souvent à un sentiment de frustration et à des conflits avec l'entourage. Pour des travailleurs qui ont besoin de maintenir un très haut niveau de vigilance, tels que les contrôleurs du trafic aérien, l'anxiété liée à la privation chronique de sommeil peut être particulièrement marquée car ils savent que cette dernière affecte leurs possibilités de concentration sur la tâche et entraîne des baisses momentanées de l'attention. Cet état anxieux peut également se traduire par une augmentation des erreurs et peut générer des plaintes médicales associées à l'anxiété chronique.

Les « absences », les fausses réponses, le ralentissement intellectuel, les problèmes de mémorisation et la diminution rapide de l'état de vigilance sont des manifestations classiques des effets de la privation de sommeil évalués à l'aide de tests de courte durée. De même, plus la somnolence consécutive à la privation de sommeil

est grande et plus le fonctionnement cérébral est dépendant des influences environnementales et sensibles à la monotonie ambiante. C'est ainsi que certaines pertes de vigilance et toutes les conséquences que celles-ci entraînent, peuvent être accentuées par l'existence d'une privation chronique de sommeil. Il est donc nécessaire de s'interroger sur les répercussions exactes que peut entraîner la perturbation chronique du sommeil par le bruit, sur la qualité des activités diurnes et notamment sur les risques d'incidents voire d'accidents liés à l'activité professionnelle.

3.4. LES EFFETS DU BRUIT SUR LA SPHERE VEGETATIVE

La sphère végétative comprend divers systèmes dont le fonctionnement n'est pas placé sous la dépendance de la volonté. C'est le cas du système cardio-vasculaire⁷¹, du système respiratoire ou encore du système digestif. Ainsi, le bruit entraîne une réponse non spécifique au niveau du système cardio-vasculaire en accélérant la fréquence cardiaque et en provoquant une vasoconstriction (diminution du calibre des petites artères). Kahn et Rebuffat ont mesuré, chez les enfants, une accélération cardiaque pouvant atteindre 20 à 30 battements par minute⁷². Ces modifications cardio-vasculaires sont propices à l'élévation de la pression artérielle⁷³. Le bruit entraîne également une accélération du rythme respiratoire sous l'effet de la surprise. La stimulation acoustique provoque également des modifications au niveau du système digestif. Les plus fréquentes sont une diminution de la fonction salivaire et du transit intestinal. Les modifications de la sécrétion et de la composition du suc gastrique peuvent constituer le lit de troubles graves tels que l'ulcère gastrique ou l'ulcère du duodénum.

L'effet de l'exposition au bruit sur le système cardio-vasculaire est fortement plausible⁷⁴, car les diverses manifestations allant d'une légère augmentation de la pression artérielle à la pathologie cardio-vasculaire avérée sont consistantes avec la progression connue des pathologies dans ce domaine de santé et sont confortées par les résultats des études de laboratoire sur les réactions au stress et la dynamique vasculaire. Certaines études ont bien mis en évidence une relation entre l'exposition au bruit et le risque d'infarctus myocardique^{75 76}. Certaines études se sont intéressées à la relation infarctus et exposition au bruit des avions^{77 78}. La méta analyse de van Kempen en 2002 a montré une augmentation faible, mais significative du risque de maladies cardiaques. Une étude transversale, autour de l'aéroport de Stockholm Arlanda, indique que le risque de développer une hypertension artérielle est augmenté de 60 % pour une exposition à des bruits de trafic aérien moyenne de 55 dB(A) par rapport à une population non exposée, et de 80 % pour des bruits dépassant 72 dB(A)⁷⁹. Ces données sont confirmées par deux études plus récentes, l'une autour de l'aéroport de Stockholm Arlanda⁸⁰, la seconde à Istanbul⁸¹. Une méta-analyse reprenant l'ensemble des résultats publiés entre 1970 et 1999 montre une augmentation significative (intervalle de confiance à 95 % : 1,05 – 1,13) du risque de maladies cardiaques ischémiques en relation avec le bruit des transports⁸².

3.5. LES EFFETS DU BRUIT SUR LE SYSTEME ENDOCRINIEN

Le système endocrinien est composé par l'ensemble des glandes qui possèdent une fonction de sécrétion d'hormones. L'exposition au bruit entraîne une modification de la sécrétion des hormones liées au stress que sont l'adrénaline et la noradrénaline⁸³. Les concentrations de ces hormones surrénaliennes sont augmentées de façon significative lors de l'exposition au bruit au cours du sommeil et ceci se traduit par une excrétion urinaire accrue de leurs produits de dégradation⁸⁴. L'élévation du taux nocturne de ces hormones peut entraîner des conséquences sur le système cardio-vasculaire tels que l'élévation de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle ou encore des arythmies cardiaques, des agrégations plaquettaires ou encore une augmentation du métabolisme des graisses⁸⁵. Plusieurs études rapportent également une élévation du taux nocturne de cortisol sous l'effet du bruit⁸⁶. Le cortisol est une hormone qui traduit le degré d'agression de l'organisme et qui joue un rôle essentiel dans les défenses immunitaires de ce dernier. Une étude émet l'hypothèse que cette augmentation du cortisol puisse entraîner une atrophie de l'hippocampe au niveau cérébral⁸⁷.

Dans une étude réalisée autour de l'aéroport de Munich, il a été montré que les adultes et les enfants exposés au bruit des avions présentent une élévation du taux des hormones du stress associée à une augmentation de

leur pression artérielle. Ces observations confirment l'impact non négligeable du bruit sur le système cardiovasculaire dans son ensemble. Chez les enfants, cette augmentation des taux hormonaux est accompagnée par une détérioration des capacités cognitives de mémorisation et de réalisation de tâches complexes.

Plusieurs études se sont attachées à mesurer l'impact possible du bruit sur le système hormonal de l'enfant. Les modifications des taux de cortisol (urinaire et salivaire) de même que les taux des catécholamines⁸⁸ (adrénaline et noradrénaline) ont été mesurées dans le cas du bruit des avions⁸⁹. Hygge note une augmentation des catécholamines chez les enfants exposés de façon nouvelle au bruit des avions⁹⁰. Evans trouve une augmentation du cortisol urinaire chez les enfants exposés à des niveaux de bruit Lden 60 dB(A)⁹¹.

3.6. LES EFFETS DU BRUIT SUR LE SYSTEME IMMUNITAIRE

La stimulation acoustique entraîne des modifications au niveau endocrinien. L'une des conséquences majeures de ces effets est l'atteinte des défenses immunitaires de l'individu agressé. Tout organisme subissant une agression répétée peut avoir des capacités de défense qui se réduisent fortement, que ces dernières soient acquises ou qu'elles soient naturelles. Ainsi, une plus forte exposition au bruit peut se traduire par une réduction des défenses acquises et, par conséquent, par une plus grande fragilité de l'organisme aux diverses agressions subies. Cette diminution des capacités immunitaires semble être liée aux modifications des taux des corticoïdes sous l'influence du stress et des conflits auxquels l'individu est soumis. Des données récentes indiquent même que le stress prolongé pourrait entraîner une atrophie de l'hippocampe, structure nerveuse d'importance majeure, du fait de la sécrétion excessive de glucocorticoïdes (cortisol) qu'il provoque.

Le sang contient de nombreux éléments parmi lesquels on trouve des cellules sanguines (globules rouges, globules blancs, plaquettes), des sucres, des protéines, des graisses, des ions métalliques, ou encore des hormones. Le rôle du sang est de transporter ces différentes substances vers les différents organes et groupes de tissus du corps humain, mais également d'assurer une constance du milieu intérieur (température, pH, concentrations ioniques) et une défense générale de l'organisme contre les agressions extérieures. Sous l'effet du stress, la composition sanguine en ces divers éléments peut être modifiée. Ainsi, la concentration des hormones réagissant à l'agression (catécholamines) ou encore les taux de cortisol et de cholestérol sont augmentés sous l'effet du stress. Certains résultats indiquent également que la concentration intracellulaire de magnésium peut être diminuée ou encore que des modifications de la viscosité sanguine et de la concentration en fibrinogène du sang pourraient constituer des facteurs aggravant le risque de troubles cardiaques ischémiques⁹², c'est-à-dire une insuffisance d'apport d'oxygène du muscle cardiaque. Le rôle des globules blancs est très important dans la défense de l'organisme et leur atteinte peut causer de graves dommages dans le fonctionnement du système immunitaire.

3.7. LES EFFETS DU BRUIT SUR LA SANTE MENTALE

Des études ont été consacrées aux répercussions psychiatriques de l'exposition au bruit des avions^{93 94}, même pour des enfants⁹⁵. Le bruit est considéré comme la nuisance principale chez les personnes présentant un état anxiodépressif. La présence de ce facteur joue un rôle déterminant dans l'évolution et le risque d'aggravation de cette maladie⁹⁶. La sensibilité au bruit est très inégale dans la population, mais le sentiment de ne pouvoir « échapper » au bruit auquel on est sensible, constitue une cause de souffrance accrue qui accentue la fréquence des plaintes subjectives d'atteinte à la santé.

Des études conduites en Angleterre indiquent que le pourcentage des personnes admises dans un service psychiatrique augmente en même temps que l'exposition au bruit de trafic⁹⁷. Des résultats similaires ont été observés au Danemark, autour de l'aéroport de Copenhague, où les consultations et les hospitalisations en service psychiatrique sont nettement plus nombreuses dans les zones exposées au bruit que dans les zones témoins. D'autres études confirment l'augmentation des consultations et hospitalisations psychiatriques parmi

les riverains d'aéroports⁹⁸. Une étude transversale concernant les populations adultes autour de l'aéroport de Roissy CDG⁹⁹ a permis de mettre en évidence des différences d'état de santé mentale entre les individus très exposés au bruit aérien et les individus moins exposés, en termes de prescriptions d'un médicament à visée neuropsychiatrique, notamment.

En France, la mise en place d'un « Observatoire d'Épidémiologie Psychiatrique » a permis de mettre en évidence la grande permanence des états anxiodépressifs et le rôle particulier des nuisances dans leur déclenchement et leur entretien. Ainsi, il apparaît que 27 % des patients en consultation présentent de tels troubles, parmi lesquels 21 % ressentent fortement les nuisances. 59 % des patients anxiodépressifs évoquent le bruit comme facteur de nuisance. Une enquête récente faite par questionnaire autour de l'aéroport de Schiphol entre 2002 et 2005 confirme le lien anxiodépressif avec le niveau de plainte vis-à-vis du bruit¹⁰⁰.

Stansfeld et Haines pensent que le bruit n'est probablement pas associé à l'existence de troubles mentaux marqués chez l'enfant, mais il peut toutefois affecter son bien-être et contribuer à l'état de stress chez celui-ci¹⁰¹. Dans une étude plus large, les mêmes auteurs ont relevé des niveaux plus élevés de détresse psychique chez des enfants qui sont exposés au bruit de façon chronique¹⁰².

Une mise en garde est toutefois nécessaire : il reste toujours difficile dans ces études de dissocier les effets liés au statut socio-économique des populations exposées au bruit et ceci, même si des facteurs correctifs sont utilisés pour ajuster les réponses en tenant compte de ces particularités.

3.8. L'EXPOSITION AU BRUIT ET LA CONSOMMATION DE MEDICAMENTS

Bien qu'imprécises en raison de leur complexité, plusieurs études semblent indiquer qu'il existe une augmentation de la consommation de médicaments à proximité des grandes sources de bruit. Au niveau européen, il a été noté que dans les zones où le bruit atteignait un LAeq de 55 ou 60 dB, 15 % des résidents touchés prenaient des somnifères ou des sédatifs presque tous les jours ou plusieurs fois par semaine, alors que seuls 4 % de la population totale consomment de tels produits. Au-delà de 65 dB(A), l'utilisation de bouchons d'oreilles augmente de façon significative⁶⁵.

Une étude réalisée dans la province canadienne de l'Ontario¹⁰³ et une autre conduite autour de l'aéroport d'Amsterdam aux Pays-Bas¹⁰⁴ montrent également une corrélation entre consommation de médicaments et exposition aux nuisances sonores. L'étude néerlandaise indique que les taux de consultation et de prescription médicale étaient de 9,5 % dans les zones exposées au bruit alors qu'ils n'étaient que de 5,7 % dans les zones plus calmes. De la même façon, la consommation des médicaments traitant l'hypertension artérielle et les troubles gastro-intestinaux, appréciée par le volume total des achats annuels, augmente autour de l'aéroport d'Amsterdam en fonction de son activité. Une telle variation n'a pas été observée pour une population témoin non exposée au bruit. De tels résultats montrent que l'exposition au bruit se traduit également en termes de consommation médicale. Elle traduit une qualité de vie amoindrie et une recherche de soutien, notamment médical, en raison de l'inconfort créé par l'exposition permanente au bruit.

Une étude plus récente a été menée à Brême par le professeur Greiser¹⁰⁵ sur 809 000 assurés sociaux et 1,8 million d'actes et observations médicales. Ces données ont été croisées avec les statistiques de décollages et d'atterrissages sur l'aéroport de Cologne – Bonn. Par rapport à une population soumise à un bruit inférieur à 40 dB la nuit, l'étude montre que le risque de se faire soigner pour hypertension augmente de 24 % pour les hommes et 66 % pour les femmes, lorsque le bruit nocturne est compris entre 46 dB et 61 dB. L'étude montre également que la prise de médicaments pour traitement cardiaque augmente de 27 % pour les hommes et 116 % pour les femmes, lorsque le bruit nocturne est compris entre 46 dB et 61 dB.

L'étude de Relster menée à Copenhague autour de l'aéroport montre que 25 % de la population consomme des

tranquillisants, soit 47 % de plus que dans les zones reculées¹⁰⁶. La dernière étude de Franssen en 2006 faite autour de l'aéroport international d'Amsterdam montre, après prise en compte des variables de confusion potentielle, une augmentation de 70 % de l'automédication, pour une augmentation de 10 dB(A) entre 22h et 23h (heure du coucher).

3.9. LES EFFETS DU BRUIT SUR LE RELATIONNEL

Si les médecins peuvent décrire un son ou un bruit, les paramètres qu'ils utilisent semblent tout à fait insuffisants pour exprimer la très grande variabilité des réactions individuelles. En effet, le bruit a un caractère éminemment subjectif, car on qualifie généralement de bruits des sons qui apparaissent comme indésirables, inacceptables, ou qui provoquent une sensation désagréable. Les effets du bruit sont ainsi difficiles à saisir en raison de la diversité des situations : le bruit provient de sources très différentes et les effets sont plus ou moins marqués selon la prédisposition physiologique ou psychologique de la personne qui le subit. On peut regrouper ces effets en quatre catégories : les effets sur les attitudes et le comportement social, la gêne psychologique, les effets sur les performances, les effets sur la communication.

4. EFFETS DU BRUIT SUR LES ATTITUDES ET LE COMPORTEMENT SOCIAL

En Angleterre, une étude sur les riverains d'aéroports¹⁰⁷, indique que ces derniers gardent les fenêtres fermées pour dormir, quelle que soit la saison, dans une proportion qui varie de 10 % à 46 dB(A) (en Leq de 23h à 7h) à 50 % pour un niveau de 70 dB(A). Les directives de l'OMS préconisent un niveau maximum de 45 dB(A) à ne pas dépasser à l'extérieur à environ un mètre des façades des chambres à coucher, de sorte que les gens puissent dormir avec les fenêtres ouvertes.

Que ce soit chez les enfants ou les adultes, au domicile ou au travail, on évoque régulièrement les méfaits du bruit sur les relations interpersonnelles : le bruit serait à l'origine d'une agressivité accrue, d'une augmentation du nombre de conflits... Il apparaît difficile de parler d'effets directs du bruit sur les troubles du comportement et de l'équilibre mental ; les recherches menées dans ce domaine tendent à montrer que le bruit ne provoque pas une augmentation des cas pathologiques mais semble plutôt aggraver les problèmes psychologiques préexistants.

4.1. LES FACTEURS DE MANIFESTATION DE LA GÊNE PSYCHOLOGIQUE INDUITE PAR LE BRUIT

Selon la définition de l'OMS, la gêne est « *une sensation de désagrément, de déplaisir provoquée par un facteur de l'environnement (ex : le bruit) dont l'individu ou le groupe connaît ou imagine le pouvoir d'affecter sa santé* »¹⁰⁸. Il est ainsi possible d'évaluer l'inconfort provoqué par le bruit en comptabilisant les plaintes déposées auprès des services compétents, mais l'on ne dispose pas là d'un critère fiable car nombre de personnes incommodées n'utilisent pas cette procédure. Celles qui le font sont généralement issues d'un milieu socioculturel assez élevé. Elles ne sont pas forcément plus gênées que les autres, mais connaissent simplement mieux leurs droits et s'attendent à être écoutées¹. La gêne rapportée ne peut donc être considérée comme un indicateur fiable du niveau d'exposition ; en revanche, elle constitue, en particulier pour les pathologies se rapportant aux effets psychologiques, un bon indicateur de ses effets^{109 110}. Si le bruit des transports représente 55 % de la gêne éprouvée par la population française au domicile, le bruit des trains n'en représente que 2 % d'après une étude de 2003¹¹¹. Le baromètre Santé Environnement en 2007 précise que 49 % se disent gênés par la circulation routière, 10 % par les avions, 5 % par les trains. Caractérisé par une somme d'événements sonores irréguliers provoquant une gêne sonore, le bruit des avions s'est affirmé comme un enjeu de santé publique, du fait d'une conscience grandissante de ses impacts sanitaires¹¹².

Les facteurs non-acoustiques qui viennent moduler la gêne sont nombreux et peuvent être regroupés en trois catégories : les facteurs individuels, les facteurs contextuels, relativement stables dans le temps mais qui varient suivant les individus, et les facteurs socioculturels^{113 114 115}. Les effets de la gêne peuvent être regroupés en deux grands types : les impacts sanitaires proprement dits, telle l'apparition de pathologies psychosomatiques, et les effets en termes de modification des comportements (fermeture des fenêtres, déménagement...)¹¹⁶. Autour de Paris CDG et Orly, une étude portant sur la gêne a été réalisée en 1999 parmi quelque 1 500 riverains de 36 communes¹¹⁷. 48 % des personnes se disaient gênées ou très gênées. 51 % des répondants éprouvaient une difficulté à suivre une conversation. 30 % renonçaient à ouvrir la fenêtre la nuit, même en cas de forte chaleur. 44 % des personnes interrogées envisageaient un déménagement. Le niveau de la gêne est corrélé avec les représentations négatives de la plate-forme (bruit des avions, pollution, dépréciation des biens immobiliers...). « *Cet effet de représentation de la gêne n'a toujours pas été considéré par les gestionnaires et les décideurs comme un problème de santé à part entière*¹¹⁸ ».

Les facteurs individuels

Les facteurs individuels sont nombreux. On les classe généralement en deux catégories : les facteurs sociodémographiques (sexe, âge, niveau de formation, statut d'occupation du logement, dépendance professionnelle vis-à-vis de la source de bruit, usage de la source ...), et les facteurs d'attitude (sensibilité au bruit, peur de la source, capacité à surmonter, à faire face au bruit, confiance dans l'action des pouvoirs publics...).

- L'activité en cours

Le vécu positif ou négatif des sons dépend de ce que nous sommes en train de faire, de ce que nous voulons entreprendre et de notre état personnel du moment. Ainsi ce ne sont pas les mêmes sons dont on se plaint selon que l'on est chez soi, à son travail, sur un lieu de loisirs. On fait souvent moins attention au bruit sur son lieu de travail que dans son habitat où l'attente de calme est très forte. Certaines activités de loisirs (discothèques, karaoké...) où animation et gaîté riment avec sonorités fortes souvent excessives sont recherchées par ceux qui y participent.

- Représentation de la source

On s'aperçoit que bien souvent la gêne due aux moyens de transport (ferroviaire, aérien, automobile) est fonction des attitudes que l'on a vis-à-vis de la source, de l'utilité de ce moyen de transport dans l'économie de la région, de la peur des accidents, de la croyance à des effets nocifs pour la santé. Bien souvent la gêne vis-à-vis du bruit est liée à la peur des accidents plus qu'au niveau sonore, comme en témoigne la prolifération des réclamations vis-à-vis du bruit dans le cas dramatique d'un accident d'avion (par exemple, le Concorde). De même, le fait que l'on soit soi-même utilisateur ou non de ce moyen de transport semble influencer la gêne. Le sentiment de gêne s'accroît également si l'on estime que les auteurs de la nuisance se préoccupent peu du sort des riverains. Dans le même ordre d'idée, on est généralement plus enclin à accepter les bruits provenant de la nature (eau, vent, chants des oiseaux...) que ceux émis par des sources artificielles.

- L'investissement affectif

On ne vit pas de la même façon l'environnement sonore selon que l'on est propriétaire ou locataire de son logement. De même, les enquêtes menées dans des ateliers parfois très bruyants ont montré que souvent les personnes qui y travaillent ne se plaignent pas du bruit ; celui-ci est accepté, car il participe à l'investissement de l'homme avec son milieu professionnel, avec un métier qui représente son moyen de subsistance. Le bruit au travail renvoie à l'image du métier. Il est un élément de l'identité de chacun, de sa position sociale.

Les facteurs contextuels

- Bruits choisis / bruits subis

On s'aperçoit également que le fait de détenir un contrôle sur le bruit ou au contraire d'être totalement démunie influe sur le vécu plus ou moins négatif de celui-ci. Les enquêtes sur le terrain confirment le fait que si l'on se sent exclu des prises de décision, si l'on n'a pas l'occasion d'être en contact ou d'appartenir à des associations de plaignants, on supporte d'autant moins les nuisances de notre environnement, dont le bruit.

- Bruit imprévisibles / réguliers

Les bruits imprévisibles, inattendus, auxquels on ne peut échapper, perturbent plus que ceux qui sont répétitifs,

réguliers. Ces observations de la vie de tous les jours ont été confirmées par des recherches en laboratoire. On a ainsi comparé la gêne exprimée ainsi que les résultats sur le travail d'un groupe de sujets exposés au bruit avec ceux d'un autre groupe également exposé mais à qui l'on avait signalé qu'ils pouvaient échapper au bruit en quittant la salle ou en appuyant sur un bouton. Même si cette option a rarement été prise, on s'est aperçu que les troubles ressentis par ceux qui pensaient pouvoir partir ou mettre fin au bruit étaient beaucoup moins importants que pour ceux qui estimaient qu'ils ne disposaient d'aucun choix possible¹¹⁹.

Les facteurs socioculturels

- La sensibilité excessive au bruit

A l'examen des plaintes exprimées, on remarque souvent des cas de sensibilités excessives au bruit, par exemple dans le cas de personnes dépressives¹²⁰; de même certaines des plaintes vis-à-vis du bruit peuvent être liées à des problèmes divers, - soit dans la vie professionnelle : mauvaise ambiance de travail, perte d'emploi, mise à la retraite, chômage - soit dans la vie privée : mésentente familiale, isolement, solitude. Il semble donc que la plainte relative au bruit cristallise d'autres problèmes rencontrés. Les différences de rythme de vie des groupes ethniques qui cohabitent peuvent provoquer des réactions d'intolérance.

4.2. LES EFFETS DU BRUIT SUR LES PERFORMANCES

4.2.1. LES TACHES AFFECTEES PAR LE BRUIT

De manière générale, le bruit semble affecter les tâches complexes, c'est-à-dire qui requièrent une attention régulière et soutenue par rapport à des détails, ou à des indicateurs variés : on peut évoquer les épreuves de vigilance, de coordination multi sensorielle, de doubles tâches ou qui font appel à la mémorisation. On cite le plus souvent parmi les tâches de vigilance celles relatives à la détection de signaux visuels, de type surveillance d'écrans. On sait que, dans ce type d'épreuve, le bruit serait à l'origine de moments d'inattention. Dans le cas de ce que l'on appelle l'apprentissage incident, c'est-à-dire dans lequel une personne doit effectuer un travail, mais est interrogée parallèlement sur un point qui ne lui avait pas été signalé au départ, on observe une détérioration de cette dernière épreuve. Ces résultats ont été confirmés par de nombreux chercheurs : ainsi lors d'une présentation visuelle de mots dans le bruit, les sujets ont reconnu aisément ces mots par la suite, mais étaient moins performants que ceux qui n'étaient pas exposés pour localiser la place où étaient situés ces mots sur l'écran. De même, on a observé des post-effets de l'exposition au bruit, c'est-à-dire des effets qui s'opèrent sur diverses tâches de type résolution de problèmes ou sur l'aide à autrui à la suite d'une exposition.

4.2.2. LES TACHES NON AFFECTEES PAR LE BRUIT

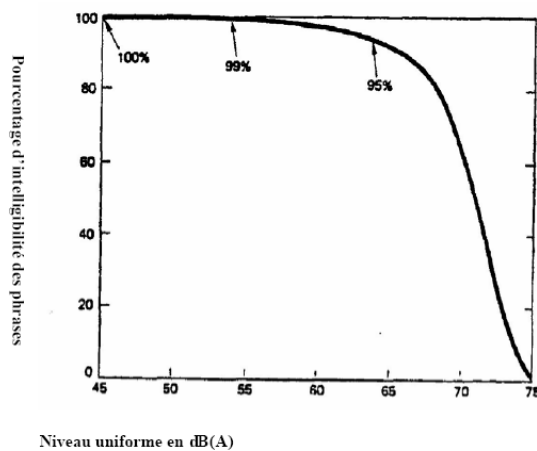
Les épreuves faciles, répétitives (de type recopiage de textes), ou de coordination motrice, dans lesquelles les personnes peuvent s'automatiser ne semblent généralement pas affectées par le bruit. Si le travail requis nécessite le traitement d'informations nombreuses, c'est-à-dire s'il s'agit de tâches complexes, le bruit en augmentant le niveau d'attention aurait un effet négatif sur leur réalisation. On sait en effet que l'élévation du niveau de vigilance et de l'attention conduit à limiter le nombre d'informations que l'on est capable de traiter, en contraignant la personne à se focaliser sur les éléments les plus pertinents.

4.3. LES EFFETS DU BRUIT SUR LA COMMUNICATION

Le bruit a comme autre effet nocif celui de nuire à la qualité des communications orales (conversations, écoute de la télévision) car il est susceptible de provoquer un effet de masque, phénomène qui se produit lorsque deux sons d'intensité différente sont émis. A ce moment, le bruit le plus fort peut masquer partiellement ou totalement le second. L'effet de masque est d'autant plus grand que les fréquences sont voisines et les sons

graves masquent mieux les sons aigus. Or les bruits extérieurs de trafic, correspondant à des sonorités graves, masquent largement la voix humaine et peuvent causer ainsi une gêne importante. Pour une communication compréhensible, il faut que le bruit de fond provenant de l'extérieur soit au moins inférieur de 10 dB(A) à celui des conversations. Or le niveau des conversations normales est de l'ordre de 55 dB(A) et ce n'est pas en élevant la voix que l'on se fait mieux comprendre. Plus on crie, plus sont méconnaissables les syllabes que nous prononçons et plus sont importantes les altérations de la parole. Le contenu informatif du message ne passe plus. Pourtant, il n'est pas besoin d'entendre toutes les syllabes d'une phrase pour en comprendre le sens. La personne adulte parvient aisément à reconstituer les éléments manquants. On a pu ainsi montrer qu'il était possible de comprendre un nombre considérable de phrases et leur signification sans identifier toutes les syllabes séparément.

L'intelligibilité dépend également des capacités individuelles et de la familiarité avec le langage écouté ; ainsi l'on perçoit beaucoup mieux un mot si on le connaît ; en revanche dans des situations d'apprentissage comme c'est le cas chez les enfants qui n'ont pas acquis de familiarité avec le langage employé et le contenu de ce qui est dit, l'intelligibilité est moins bonne. En effet, elle augmente avec l'âge car la langue pour les jeunes est moins redondante que pour les adultes dans la mesure où leur vocabulaire est plus limité et qu'ils n'ont pas acquis une maîtrise grammaticale et syntaxique pour « combler les vides » de ce qui n'est pas entendu et pour retrouver le sens d'une phrase dont certains sons sont masqués. Les tests de reconnaissance de la parole ont ainsi montré qu'elle croît avec l'âge et qu'elle progresse de 4 à 25 ans pour décliner légèrement après. Ainsi certains bruits de fond, qui interfèrent peu avec la communication orale chez l'adulte, peuvent interférer significativement chez l'enfant. La figure suivante montre les limites de compréhension des conversations en fonction des bruits ambiants dans un salon ayant des conditions de réverbération standard.



Source : Etats-Unis, Environmental Protection Agency, 1974.

La courbe montre qu'au-delà de 65 dB(A) de bruit de fond, la conversation entre deux personnes placées à 1 m l'une de l'autre n'est plus possible à voix normale. Pour obtenir 100 % de compréhension, le niveau sonore ambiant ne doit pas dépasser 45 dB (A).

4.4. LES EFFETS DU BRUIT SUR L'APPRENTISSAGE

4.4.1. ENQUETES MENEES

Que ce soit en Angleterre¹²¹, en Suède¹²², au Portugal¹²³, en Suisse¹²⁴ ou à Hong Kong, les enquêtes ont toutes fait ressortir que les professeurs doivent hausser la voix de manière sensible, avec pour contrepartie une fatigue

vocale importante¹²⁵. Cette fatigue apparaît pour des niveaux acoustiques extérieurs relativement modestes¹²⁶. En Angleterre et au Pays de Galles, une estimation de l'impact du bruit en milieu scolaire a montré que dans 18 % des écoles secondaires, les élèves étaient exposés à des niveaux de bruit supérieurs à 65 dB(A). Une étude expérimentale¹²⁷ a montré que l'exposition au bruit des avions était associée à de plus faibles performances cognitives, qui s'amélioraient lorsque l'exposition au bruit disparaissait. A Londres, il a été remarqué que les enfants exposés au bruit des avions étaient significativement plus hyperactifs que les non exposés¹²⁸. Les études menées aux Pays-Bas ont mis en évidence la perte d'intelligibilité du contenu de l'enseignement lorsque le niveau de discours du professeur dépasse le niveau ambiant intérieur de la nuisance de moins de 15 dB(A). Les auteurs préconisent de ne pas dépasser le niveau maximum extérieur de 57 dB(A) en Leq.

Le taux signal / bruit de 15 dB(A) est préconisé par l'OMS dans les salles de classe. Comme un niveau moyen de voix atteint 60 dB(A), le niveau du bruit de fond ne devrait pas excéder 45 dB(A) à l'intérieur, soit 60 dB(A) en façade si la fenêtre est ouverte, 70 dB(A), si celle-ci est fermée. Le bruit est le facteur de mécontentement le plus couramment indiqué par les enseignants dans les évaluations qu'ils donnent de la qualité des salles de classe. Ainsi, une enquête concernant 2 000 élèves du primaire à Londres¹²⁹ montre que les passages d'avions et les voies routières sont les bruits extérieurs les plus gênants. L'étude de Regecova a analysé 1 542 enfants âgés de 3 à 7 ans confrontés à une pollution sonore diurne et observé une augmentation significative de la pression artérielle en fonction du bruit¹³⁰. Les performances des enfants sont mesurés au moyen de tests adaptés, et l'exposition au bruit est mesurée dans chaque école, soit évaluée par modélisation à partir des données des couloirs aériens. Ces études ont démontré les impacts suivants :

- les niveaux acoustiques externes et internes influencent les résultats de tests de performance ;
- les enfants sont sensibles au bruit extérieur, et gênés par des bruits spécifiques ;
- un bruit de fond fort affecte les performances aux tâches académiques qui nécessitent l'usage du langage ;
- les enfants qui présentent des besoins éducatifs particuliers sont très vulnérables au bruit de fond ;
- les niveaux de bruit mesurés excèdent les recommandations de l'OMS.

4.4.2. ASPECTS TECHNIQUES ET REGLEMENTAIRES DU CONTROLE DU BRUIT DANS LES ECOLES

L'OMS précise : « *Il est évident que les garderies et les écoles ne devraient pas être situées à proximité de sources de bruit importantes, telles que des autoroutes, des aéroports, et des sites industriels¹³¹* ». En évitant de construire des établissements scolaires près des axes de circulation, pour des raisons de sécurité routière, on évite aussi l'exposition aux nuisances ; pollution et bruit. S'efforcer de construire des locaux scolaires, les crèches, les hôpitaux dans des zones à l'abri des nuisances routières est un aspect élémentaire de l'urbanisme permettant d'éviter dans le coût des constructions les contraintes d'isolation acoustique. Pour ce qui concerne nuisances du trafic aérien d'une plate-forme internationale comme Roissy CDG, dont le Plan d'Exposition au Bruit étend son emprise sur 127 communes réparties sur 5 départements, la seule solution reste la réduction à la source par l'élimination des avions les plus bruyants et la limitation du trafic, en priorité la nuit.

Les recommandations internationales sur le bruit ambiant intérieur.

Toutes les recommandations européennes expriment un niveau de bruit à ne pas dépasser à l'intérieur des locaux. Ces objectifs de qualité sont modulés selon la nature et l'usage des locaux dont la variété est finalement assez grande. Dans une salle de classe ou une bibliothèque, l'objectif de qualité est compris entre 30 et 40 LeqA. La réglementation allemande est la seule qui prenne en compte l'isolement, par rapport à l'espace extérieur, pour atteindre un niveau intérieur acceptable. Elle préconise d'adapter l'isolation en fonction du niveau sonore existant à l'extérieur du bâtiment.

La maîtrise du bruit dans l'environnement scolaire, de la maternelle à l'université, constitue un véritable enjeu de société, assez mal connu et peu pris en compte, alors que les conséquences du bruit sur le développement des enfants et la fatigue des enseignants sont sérieuses.

En Europe, on estime que le niveau de bruit supérieur à 65 dB en Leq 8-20 h nécessite qu'une action soit entreprise. En France, les experts s'accordent pour estimer que 10% de la population, soit 6 millions de personnes, vivent dans un environnement bruyant ; parmi eux, 2 000 000, dont 450 000 enfants sont concernés par des niveaux de bruit très élevés, supérieurs à 70 dB¹³². Pour ces enfants, non seulement le bien-être n'est pas assuré, mais le bruit leur fait courir des risques en termes de développement intellectuel et d'acquisition du langage et de la lecture. Les enfants n'expriment pas de réaction de gêne au bruit comme le font les adultes ; la gêne n'apparaît que vers 16-18 ans, mais le bruit provoque néanmoins plusieurs effets objectifs :

- le masquage de la parole et la diminution de l'intelligibilité des enseignements ;
- la diminution de l'attention et la fatigue;
- il en découle un retard d'apprentissage de la lecture;
- des troubles du comportement peuvent apparaître : agitation ou désintérêt en cas d'absence de signal ;
- la fatigue vocale des professeurs, avec un glissement des fréquences vocales, pouvant conduire à un découragement, à des absences.

4.4.3. QUELQUES RESULTATS D'ETUDES

Une liste actuelle des problèmes de santé liés au bruit chez les enfants figure dans le rapport de PINCHE¹³³, qui recommande en particulier expressément de réduire le bruit ambiant durant la nuit. Le CRETEIL¹³⁴ et le CSNA³⁵ ont fourni en août 2007 un riche inventaire sur les effets des nuisances aériennes sur la scolarité et la santé des enfants¹³⁵. Cette bibliographie confirme l'étude de Hygge⁹⁰ faite autour de l'aéroport de Munich, montrant que les enfants exposés aux nuisances sonores depuis plus de 5 ans avaient des performances amoindries. Le bruit des avions provoque des interférences dans l'émission et la compréhension du discours de l'enseignant, ce qui empêche une bonne acquisition du langage¹³⁶. L'étude multicentrique RANCH¹³⁷ faite sur 2 000 enfants de 89 écoles autour de 3 aéroports internationaux (Amsterdam, Madrid et Londres) a mis en évidence une relation entre l'exposition au bruit et une baisse des performances scolaires, notamment en lecture. Les auteurs précisent qu'en comparaison avec un bruit routier, qui est plus constant, le bruit du trafic aérien, souvent de courte durée, est beaucoup plus gênant ; il surprend et distrait davantage les élèves. Autre facteur aggravant : les élèves soumis au bruit aérien le sont également au domicile, notamment la nuit en l'absence de couvre-feu nocturne.

Crook et Langdon ont noté les niveaux de crête qui obligent les enseignants à suspendre leur cours¹³⁸. Finitzo-Hieber a estimé que le score de reconnaissance des mots est de 95 % quand le rapport signal / bruit, c'est-à-dire du rapport entre l'intensité du bruit ambiant et celle du signal analysé, est de 12 dB dans la classe et de 46 % quand il est de 0 dB¹³⁹. En termes de niveaux absolus, une expérience conduite à Bordeaux¹⁴⁰ précise l'impact du bruit sur la reconnaissance des mots : sachant que le professeur prononce des phrases de 27 mots en moyenne, on constate d'abord que les élèves ne comprennent plus le sens général de la phrase à partir du moment où 5 mots ne sont plus ou mal entendus. On observe aussi que les taux d'erreurs sont différents selon l'environnement sonore dans lequel le cours est donné :

- niveau sonore ne dépassant pas 55 dB(A) : taux d'erreurs 4 %
- niveau sonore de 60 dB(A) ou plus : taux d'erreurs 15 %

L'étude des mécanismes de la perturbation a montré que dans le bruit, les enfants confondent certaines consonnes et que la distorsion des sons rend peu intelligibles certaines parties de mots, spécialement les fins de mots. L'absence de référence à un savoir ne permet pas aux jeunes élèves de reconstruire, comme le font les

adultes, les bribes de phrases masquées par le bruit.

Lukas et Dupree ont conduit une étude dans 14 établissements scolaires de Los Angeles, situés à différentes distances de voies autoroutières, qui montre que les différences de distances par rapport à l'autoroute ont pour conséquence des différences de niveau de bruit de fond allant jusqu'à 19 dB entre les salles de classe les plus bruyantes et les plus calmes. Les scores de lecture et de mathématiques des classes de niveau équivalent, et des données de comportement général dans les salles ont été évalués dans 74 salles de classe. Les résultats de cette étude indiquent que pour un rang équivalent, les scores étaient fonction du niveau de bruit ambiant filtré par pondération de type C dans la classe¹⁴¹.

Dans une étude effectuée dans la zone d'Orly exposée au bruit des avions, Moch a analysé les résultats de tests passés en début et en fin d'année par deux groupes d'élèves de cours préparatoire¹⁴². Ses résultats confirment ceux des travaux précédents : les enfants qui fréquentent une école exposée au bruit ont des acquisitions de lecture en fin d'année moins bonnes que les enfants dont l'école est insonorisée. En outre, ils se montrent plus agités et plus instables que les autres durant les épreuves exigeant de l'attention. Le comportement des enfants en classes bruyantes est altéré¹⁴³ et lorsque ces classes sont insonorisées, la participation des élèves est très améliorée.

Dumaurier a chiffré le retard d'acquisition de la lecture chez des enfants de 6 ans, qui s'établit à 3 mois, toutes conditions étant égales par ailleurs¹⁴⁴. Une recherche très détaillée sur la gêne spécifique subie par les enfants a été menée auprès des enfants riverains de l'ancien et du nouvel aéroport de Munich¹⁴⁵, afin d'examiner chez les premiers l'effet de la diminution du bruit, et d'évaluer chez les seconds les conséquences de l'apparition du bruit. Les investigations comportent des mesures biochimiques¹⁴⁶ et physiologiques ainsi qu'un examen des capacités intellectuelles des jeunes. Les enfants nouvellement exposés au bruit présentent des niveaux élevés d'hormones liées au stress (adrénaline). Ils montrent une bonne adaptation perceptive au bruit mais également un déficit dans la lecture et dans les exercices de mémoire. Ces difficultés augmentent lorsque les tâches deviennent plus complexes. On voit apparaître des manifestations d'agressivité, d'irritabilité, de fatigue, d'agitation psychomotrice, qui détériorent le climat des classes et peuvent être la source de conflits, de heurts et de bagarres.

Des chercheurs de l'Université de Londres ont mené une série d'études dans les écoles primaires autour de l'aéroport de Heathrow, à Londres, examinant les effets du bruit des avions sur la santé des enfants et sur leurs performances (1998-2000). Ils comparent la performance scolaire et la santé des enfants dans des écoles exposées à des niveaux élevés de bruit d'avions (parfois un survol toutes les 90 secondes) et celles d'enfants peu exposés au bruit d'avions. Les enfants exposés présentent une capacité plus faible en lecture (certains affichent un retard de lecture de 6 mois) et une irritabilité plus forte que les enfants se trouvant dans une école moins bruyante. Ces résultats britanniques, obtenus en tenant compte d'autres facteurs pouvant influencer la santé et la performance, tels que le niveau socio-économique des parents, leur niveau d'éducation, les facteurs d'exclusion sociale, la qualité de l'école, les autres facteurs de l'environnement) confirment ceux des autres travaux européens¹⁴⁷.

Dans le cas des bruits d'avions, les enfants subissent le niveau de bruit dans l'enceinte scolaire comme au domicile. Les effets à court terme de la perturbation du sommeil de l'enfant surviennent dès le lendemain (sommolence à l'école, sensation de fatigue, difficultés de concentration, problèmes d'apprentissage...). Ces troubles des fonctions cognitives et du comportement chez l'enfant ont été rappelés dans un rapport au ministère de la Santé et des Solidarités en 2006¹⁴⁸.

Il ressort d'une étude anglaise de grande ampleur, portant sur les patients des médecins généralistes¹⁴⁹, que les variables sociodémographiques ne sont pas distribuées identiquement selon l'exposition au bruit. Il faut donc

tenir compte dans les résultats du fait que les classes sociales défavorisées sont en général plus exposées au bruit.

Il a été suggéré que les enfants pouvaient être plus sensibles au bruit que les adultes en raison de leur exposition au bruit lors de périodes critiques de leur développement et de leur moindre capacité de se protéger ou de se soustraire à l'influence du bruit ambiant. Les effets connus de l'exposition des enfants au bruit sont les troubles de l'audition, des effets somatiques liés au stress et des perturbations de leur apprentissage scolaire¹⁵⁰. Des atteintes du système cardiovasculaire et du système endocrinien ont également été évoquées. En fait, très peu d'études se sont intéressées aux effets du bruit sur le système cardio-vasculaire chez l'enfant. Dans la plupart de celles-ci, l'augmentation de la pression artérielle était relativement modérée (de l'ordre de 2 à 5 mm de mercure), alors qu'elle était plus marquée dans l'ancienne étude de Karsdorf and Klappach¹⁵¹.

4.5. COUTS ECONOMIQUES DES IMPACTS SANITAIRES DU BRUIT

Le bruit, et plus particulièrement celui des transports, représente un coût pour la collectivité : coût pour le réduire, voire le supprimer, par exemple 1,5 milliard € pour la réalisation en France du programme de résorption des points noirs relatifs au bruit des transports terrestres¹⁵². Il convient d'ajouter le coût des atteintes au patrimoine immobilier, le bruit étant à l'origine d'une perte de valeur des logements. L'évaluation de l'impact du bruit sur le marché immobilier s'effectue à partir de l'analyse des prix immobiliers. L'objectif est d'estimer la dépréciation de la valeur des logements qu'occasionne une situation sonore particulièrement dégradée. Il faut prendre en compte le coût des nuisances sonores du fait des atteintes à la santé et plus généralement au bien-être des individus dont les effets perçus peuvent être appréhendés au travers de la notion de gêne¹⁵³.

Ces pertes de bien-être pour les riverains d'infrastructures de transport s'évaluent de plusieurs façons¹⁵⁴. L'évaluation économique de la gêne due au bruit s'effectue à partir d'enquêtes auprès de la population (méthode d'évaluation contingente, par exemple). Ces enquêtes visent à estimer le prix que les riverains accordent à un environnement sonore acceptable (prix qu'ils se déclarent prêts à payer pour une diminution voire une suppression de la gêne).

Sur la base d'études de ce type, le Commissariat Général du Plan (CGP) a proposé en 2001¹⁵⁵ des évaluations du coût social du bruit (tableau ci-dessous).

Bruit en façade exprimé en Leq de jour (6h-22h)	Taux de dépréciation	Dommage annuel pour un logement de 100 m ²
55 dB(A)	0 %	0 euro
60 dB(A)	2 %	132 euros
65 dB(A)	6 %	395 euros
70 dB(A)	10,5 %	691 euros
75 dB(A)	17 %	1 120 euros
80 dB(A)	24, 15 %	1 591 euros

Si l'on applique ces coûts unitaires à l'ensemble des habitations exposées au bruit des transports en France, on obtient un coût total des dommages estimé à 0,26 % du PIB, dont 84 % sont imputables à la circulation routière, 8 % au trafic ferroviaire et 8 % au trafic aérien¹⁵⁶. Même si ces estimations s'appuient sur des données anciennes concernant l'exposition des Français au bruit des transports, elles indiquent très clairement l'ampleur

de la gêne que représente cette nuisance pour la collectivité.

4.6. SYNTHÈSE DES EFFETS DU BRUIT

Le bruit, et notamment le bruit des transports, est la nuisance environnementale dont se plaint le plus la population française. Parallèlement aux effets sur la santé, comme les perturbations du sommeil et les réactions de stress, le bruit est souvent ressenti comme une gêne, car il empêche l'homme d'accomplir ses activités quotidiennes dans des conditions satisfaisantes et peut être vécu comme une véritable agression. Mais le bruit a également un impact sur le climat social : il serait à l'origine d'une agressivité accrue, d'une diminution de la sensibilité et de l'intérêt de l'individu à l'égard d'autrui, manifeste dans certains comportements. Le bruit vient aussi renforcer certaines inégalités sociales dans la mesure où il touche en premier les personnes les plus défavorisées qui peuvent plus difficilement s'y soustraire.

Son coût économique est certain, même s'il est mal chiffré. Les états européens et la France en particulier ont pris des mesures pour réglementer la construction des locaux scolaires nouveaux ; cependant il existe encore sans doute beaucoup d'établissements où les conditions acoustiques sont très médiocres, qu'il convient d'améliorer, pour limiter l'impact du bruit dans le domaine de l'éducation.

Les répercussions sur la santé sont réelles et ne peuvent être négligées par les autorités politiques et les responsables médicaux qui sont garants de la santé des citoyens. Les conséquences médicales sont encore plus inquiétantes dans le cas d'exploitation nocturne des aéroports et cela a bien été mis en évidence à Strasbourg¹⁵⁷ où les autorités ont refusé de prendre la responsabilité de ce développement.

Pour ce qui concerne les risques d'hypertension, d'atteintes cardiovasculaires et d'augmentation de mortalité, les études ne sont pas toutes convergentes. Certaines études attribuent au bruit un effet sanitaire incontestable, d'autres émettent l'hypothèse que des facteurs de confusion autres que le bruit puissent biaiser les résultats. Le groupe d'experts médecins de l'OMS préconisent donc des études complémentaires afin de lever ces doutes. Si l'impact sanitaire se limitait aux quelques points cités ci-dessus, les pouvoirs publics devraient prendre des mesures qui s'imposent au nom du principe de précaution. Il n'est pas nécessaire d'appliquer ce principe, puisque les impacts sanitaires qui sont consensuels dans le groupe d'experts sont probants et irréfutables.

En effet dans leur rapport en juin 2007, les médecins experts de l'OMS ont analysé les études épidémiologiques existantes de l'impact sanitaire du bruit, et estiment que le niveau de preuves est suffisant pour les troubles du sommeil, pour la gêne et pour la baisse des fonctions cognitives et des performances scolaires des enfants. Ces trois domaines n'exigent donc pas d'études complémentaires pour faire les recommandations qui s'imposent (niveau de bruit à ne pas dépasser dans la chambre à coucher, dans les salles de classes, les hôpitaux...).

5. LES REGLEMENTATIONS

5.1. RAPPEL DES DESCRIPTEURS EXISTANTS

Il existe un grand nombre de descripteurs acoustiques permettant de décrire l'environnement sonore. On peut cependant les regrouper en deux principales catégories :

- ceux qui caractérisent un *évènement sonore*, tel le passage d'un véhicule automobile isolé, d'un train ou d'un avion. Sur le plan international le niveau maximum (L_{max}) est le plus répandu, qu'il soit exprimé en dB(A) (cas du bruit routier ou ferroviaire) ou en PNdB (*Perceived Noise Decibel* bruit au passage d'un avion). Cet indicateur nécessite une décomposition du spectre du bruit en tiers d'octave puis un calcul de correction selon les fréquences et les intensités des bandes de ce spectre. Chacune des 24 bandes se voit attribuer un niveau (N_i) reflétant la gêne sonore dans cette bande de fréquence. D'autres descripteurs peuvent être utilisés comme le SEL (*Sound Exposure Level*) qui, *a contrario* du L_{max}, intègre la durée de l'évènement ou, dans le cas du bruit des avions, le LEPN exprimé en EPNdB (*Effective Perceived Noise Decibels*) et non en dB(A) ; l'EPNDB est le descripteur de bruit pour la certification acoustique des avions. Mais le bruit perçu par un riverain, lorsqu'il est situé à un kilomètre ou plus de la trajectoire de l'avion, subit des modifications spectrales qui rendent ce bruit plus grave et plus gênant.
- ceux qui caractérisent une *exposition de long terme*, c'est-à-dire qui prennent en compte le cumul des bruits sur une période donnée (le jour, la nuit, 24h ou plus). Les descripteurs les plus utilisés dans le domaine des bruits de transport terrestres sont le LAeq et ses dérivés comme le L_{dn} (avec pondération pour la nuit) ou le L_{den} (avec pondération pour la soirée et la nuit). Dans le domaine du bruit des avions, les descripteurs d'exposition sont beaucoup plus nombreux et complexes.

5.1.1. CONCEPT D'EMERGENCE

Le concept d'émergence repose sur l'hypothèse qu'un phénomène est d'autant plus gênant qu'il se distingue du bruit existant. Cette situation est souvent rencontrée dans les environnements industriels ou de voisinage pour lesquels l'origine de la gêne se trouve souvent dans l'apparition d'une nouvelle source de bruit identifiable, qui vient modifier la situation existante. Pour estimer l'importance de cette modification, on choisit d'abord une période temporelle caractéristique, sur laquelle on mesure le LAeq ambiant en présence du bruit perturbateur puis le LAeq résiduel en l'absence de celui-ci. L'émergence est donnée par la différence entre les valeurs relevées. Pour les bruits de voisinage, la réglementation considère comme tolérable une émergence de 5 dB durant le jour et de 3 dB pour la nuit¹⁵⁸.

5.1.2. UNITE DE MESURE, DESCRIPTEURS ET INDICATEURS ACOUSTIQUES

Le décibel reste à ce jour l'*unité de mesure* exprimant un niveau énergétique la plus utilisée pour la mesure du son, comme phénomène physique simple. Le PNdB est une autre unité destinée à mesurer les bruits aériens. A partir de ces grandeurs sont calculés des indicateurs plus complexes censés modéliser la gêne ressentie (laquelle varie en fonction de l'heure, mais aussi de la source).

Le Décibel (dB). Echelle logarithmique facilitant notre appréhension du niveau sonore en réduisant les ordres de grandeur. En effet, une échelle de 20 micro-Pascal à 200 Pascal est difficile à lire (étant donné le rapport de 1 pour 10 millions) mais on peut comprendre et visualiser des valeurs de 0 à 140 dB. On ne peut pas ajouter arithmétiquement des valeurs en décibel les unes aux autres car ce sont des grandeurs

logarithmiques. Pour donner une échelle de valeur 0 dB représente une pression de 20 micro-Pascal, 94dB représente 1 Pascal et 140dB, 200 Pascal.

La pondération fréquentielle dB(A) : l'oreille répond aux fréquences de manière non linéaire : certaines tonalités sont plus facilement perçues que d'autres. Pour cette raison, des filtres sont appliqués aux niveaux sonores. La pondération fréquentielle "A", la plus généralement employée, en atténuant les basses fréquences, s'approche plus de la sensibilité de l'oreille humaine. Le symbole pour le décibel pondéré par A est dB(A).

L_{Aeq, T} : niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A, en décibels, déterminé pour un intervalle de temps T. C'est la valeur moyenne énergétique du bruit fluctuant mesuré sur la durée T, qui donne plus d'importance aux valeurs élémentaires élevées.

L_{den} : niveau sonore continu équivalent pondéré A, pondéré par 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, prenant en compte un critère de gêne en fonction de la période de la journée.

L_{max} : indique l'intensité maximale d'un événement sonore

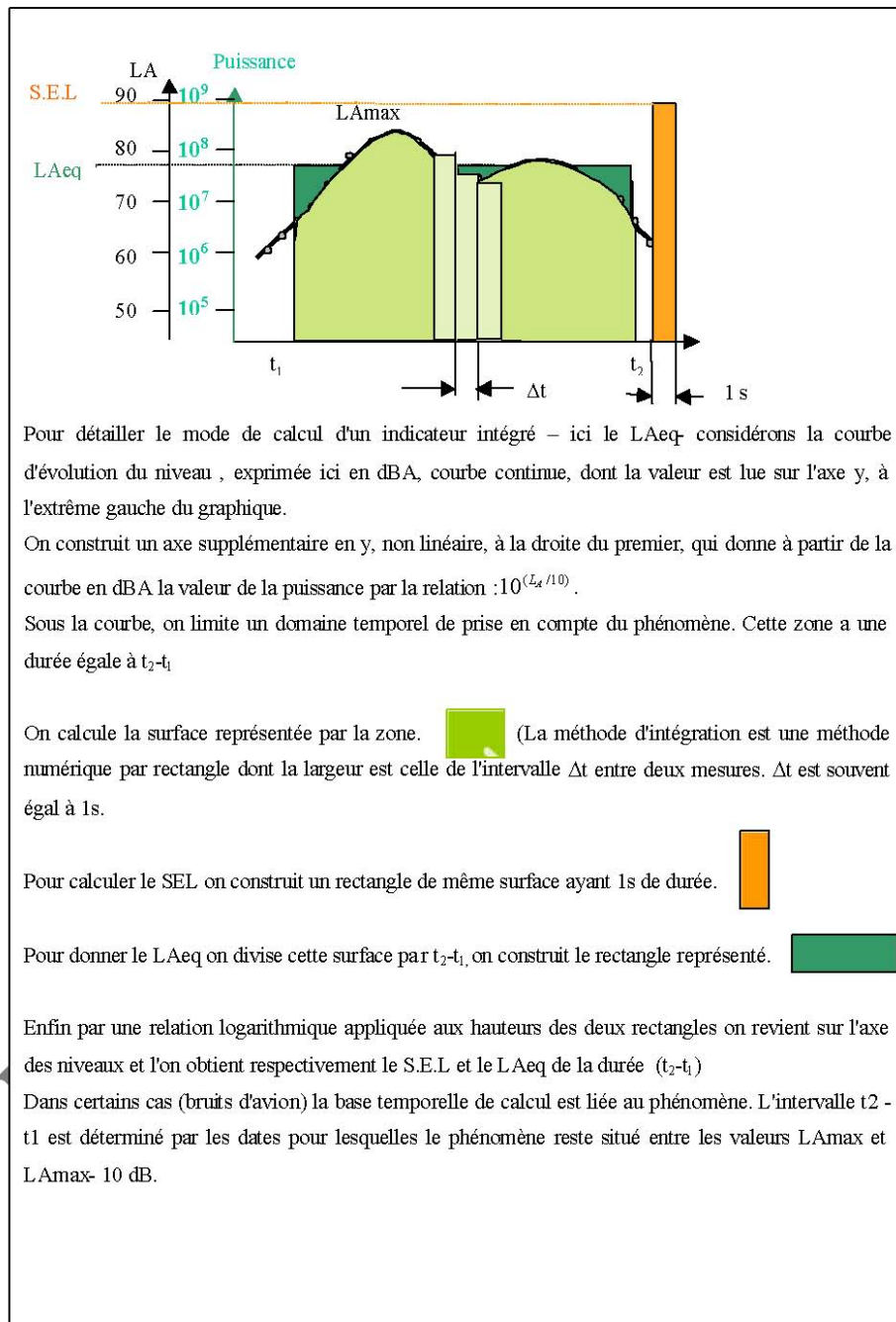
L_{Amax} : L_{max} qui tient compte de la pondération A.

L_{AE} ou SEL (*Sound Exposure Level*) : niveau de pression acoustique pondéré A d'un son fictif qui, maintenu constant pendant 1 seconde, aurait la même énergie acoustique que l'évènement considéré.

L'émergence E : l'émergence est définie comme une modification temporelle du niveau de bruit ambiant induite par l'apparition ou la disparition d'un bruit particulier. Elle est obtenue en comparant le niveau de pression acoustique continu équivalent du bruit ambiant, en présence du bruit particulier à caractériser [L_{Aeq, T, part}], au niveau de pression acoustique continu équivalent du bruit résiduel [L_{Aeq, res}] tel que déterminé sur l'intervalle d'observation.

L'émergence évènementielle est l'émergence se caractérisant par la différence entre un niveau sonore décrivant le bruit avant l'apparition de l'évènement aéronautique et un niveau maximal mesuré pendant cet évènement.

L_{AX} : niveau de pression acoustique pondéré atteint ou dépassé pendant X % de l'intervalle de temps considéré, appelé aussi niveau acoustique fractile. Par exemple L_{A90}, niveau dépassé pendant 90 % de l'intervalle de mesure, L_{A10}, niveau dépassé pendant 10 % de l'intervalle de mesure.



Divergence géométrique

L'atténuation des ondes sonores en fonction de la distance dépend de la divergence géométrique et de l'effet de sol, et dans une moindre mesure des propriétés de l'atmosphère. L'onde sonore se déplace de manière concentrique. Ces cercles sont de plus en plus grands car l'énergie est de plus en plus diluée. L'intensité acoustique locale décroît inversement à la surface de ces sphères, donc elle décroît comme l'inverse du carré de la distance.

Dans le cas d'une source sonore ponctuelle, la dispersion géométrique prévoit une atténuation sonore de 6 dB

par doublement de distance. En revanche, dans le cas d'une source linéaire telle qu'un bruit routier en trafic homogène, l'atténuation n'est que de 3 dB par doublement de distance.

5.1.3. REGLEMENTATIONS EN MATIERE DE FIXATION DES VALEURS LIMITES

- Des valeurs limites pour quel(s) objectif(s) ?

Les pays européens pour la plupart disposent et appliquent des réglementations ou des recommandations nationales permettant, à travers le respect de valeurs limites d'exposition, une protection des riverains contre le bruit d'environnement. Ces réglementations sont apparues tout d'abord dans les pays du nord de l'Europe (Pays-Bas, Allemagne) au cours des années 1970 et 80, puis plus récemment dans les pays du sud de l'Europe (Italie, Portugal par exemple). Ces dispositions réglementaires sont de plus en plus parties intégrantes d'une loi nationale sur le bruit (Pays-Bas, Suisse, Allemagne, Italie, France, Portugal).

- Les critères pour l'établissement de valeurs limites

Les deux principaux critères pris en compte pour fixer des valeurs limites dans la population générale sont la gêne psychologique et les perturbations du sommeil. C'est donc sur la base de travaux de recherche portant sur ces effets que les valeurs limites sont la plupart du temps établies. A ces critères viennent s'ajouter ceux de la perturbation de la communication, particulièrement importants en milieu scolaire.

Les **valeurs limites** d'exposition résultent le plus souvent de compromis entre les exigences humaines découlant des effets du bruit (gêne ressentie, effets du bruit sur le sommeil notamment) et des conséquences économiques et financières induites par la mise en œuvre des protections phoniques. Ce compromis, réalisé le plus souvent par les autorités gouvernementales, tend à évoluer dans le temps, dans la mesure où les exigences humaines semblent plus marquées actuellement que dans le passé (plus grande sensibilité des populations au bruit, pression sociale accrue, inquiétude vis-à-vis de la réduction du "capital silence") et les coûts de protection mieux intégrés dans les projets d'infrastructures nouvelles.

Outre la période de la journée, les valeurs limites d'exposition dépendent de la sensibilité de la zone où elles s'appliquent (hôpitaux, écoles, zone résidentielle, zone mixte : résidentielle et commerciale, zone industrielle) ou du stade de développement des infrastructures et des bâtiments (existant, en projet, planifié notamment). Des différences de 10 à 15 dB(A) sont couramment rencontrées entre les valeurs limites d'exposition des zones considérées comme les plus sensibles (hôpitaux, écoles) et des zones les moins sensibles (zones industrielles). Les situations sont donc très diverses et parfois difficilement comparables. Néanmoins, on peut considérer que la limite de 60-65 dB(A) mesurée en Leq de jour en façade d'habitation et 50-55 dB(A) la nuit semble, dans bon nombre de pays, être la règle de base pour ce qui concerne la prise en compte du bruit aux abords des voies routières nouvelles dans les zones résidentielles. Des différences de 5 à 10 dB(A) sont aussi couramment observées entre les valeurs limites d'exposition concernant les situations nouvelles (action de prévention) et celles concernant les situations existantes (action de rattrapage)¹.

Bruit ferroviaire

Comme pour le bruit routier, des valeurs limites d'exposition au bruit sont appliquées dans un grand nombre de pays industrialisés. Ces valeurs limites d'exposition dépendent souvent de la sensibilité de la zone concernée par le bruit. Dans le cas de création de voies nouvelles, en habitat résidentiel, les valeurs limites en façade d'habitation sont comprises entre : 62 et 69 dB(A) de jour, 53 à 62 dB(A) la nuit, 60 à 63 si on considère la période de 24h. Quant au L_{Amax} autorisé, il se situe entre 75 et 85 dB(A) pour la période nocturne (en fait 50 dB(A) en niveau intérieur).

Un grand nombre de pays applique un « bonus ferroviaire », c'est-à-dire une valeur limite plus élevée que pour le bruit routier. Ce bonus compris entre 3 et 5 dB(A) semble se justifier à la lumière d'une moindre gêne

ressentie pour le bruit ferroviaire.

Bruit d'avion

A l'inverse du bruit routier ou du bruit ferroviaire, les descripteurs d'exposition utilisés dans les réglementations relatives au bruit des avions sont très nombreux. Compte tenu de la diversité des indicateurs utilisés, il est bien difficile de comparer les valeurs limites d'exposition, d'autant que les niveaux sonores sont exprimés tantôt en unité dB(A), tantôt en EPNDB.

5.2. DIRECTIVE EUROPEENNE 2002/49/CE DU 25 JUIN 2002

La directive 2002/49/CE du Parlement Européen et du Conseil, relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement, vise à établir une approche commune aux pays membres de la communauté en matière de prévention et de réduction des effets nuisibles de l'exposition au bruit. Cette approche consiste à

- évaluer l'exposition des populations, par une cartographie du bruit établie selon des méthodes communes,
- informer le public en matière de bruit dans l'environnement et ses effets,
- adopter des plans d'action fondés sur les résultats de la cartographie afin de prévenir et de réduire si nécessaire le bruit dans l'environnement, lorsque les niveaux peuvent entraîner des effets nuisibles pour la santé.

La directive vise particulièrement à fournir une base pour mettre au point des méthodes de mesures communes destinées à réduire les émissions sonores provenant des principales sources, en particulier des infrastructures routières et ferroviaires, des aéroports, des matériels industriels et engins mobiles. Les Etats membres désignent les autorités compétentes et les organismes chargés de la collecte des informations et de l'établissement des cartes de bruit, de l'élaboration des plans d'action, en particulier pour les agglomérations, les axes routiers et ferroviaires ainsi que les grands aéroports.

Deux échéances pour la réalisation des cartes stratégiques du bruit et la production des plans d'action¹⁵⁹ sont fixées par la directive européenne en fonction de la taille des infrastructures et des agglomérations concernées :

- 30 juin 2007 et 18 juillet 2008 pour les cartes stratégiques de bruit puis les plans d'actions relatifs aux grandes infrastructures (axes routiers dont le trafic dépasse les 6 millions de passages de véhicules par an, axes ferroviaires dont le trafic dépasse les 60 000 passages de trains par an, aéroports comptant plus de 50 000 mouvements par an) et aux agglomérations de plus de 250 000 habitants,
- 30 juin 2012 et 18 juillet 2013 pour les cartes stratégiques de bruit puis les plans d'actions relatifs aux autres grandes infrastructures (axes routiers dont le trafic dépasse les 3 millions de passages de véhicules par an, axes ferroviaires dont le trafic dépasse les 30 000 passages de trains par an) et aux agglomérations comprises entre 100 000 et 250 000 habitants.

Les cartes et plans devront être révisés lorsque surviendra un effet modifiant la situation et au minimum tous les 5 ans.

La France avait plus d'un an de retard pour l'élaboration des cartes de bruit, retard dû au fait que les pouvoirs publics ont choisi les communes, comme autorités compétentes pour établir ces cartes. Or les nuisances des infrastructures ferroviaires, des principaux axes routiers et des grands aéroports s'étendent sur de nombreuses communes. Par exemple, le périmètre du plan d'exposition au bruit de Roissy CDG concerne 127 communes, 5 départements et 2 régions. L'agglomération parisienne englobe 396 communes. La Région Ile-de-France aurait été l'entité cohérente pour élaborer ces cartes de bruit, concernant les grandes infrastructures de transport.

Les bruits émis par les différents modes de transport sont de mieux en mieux connus, mais la connaissance des expositions cumulées subies par les riverains des infrastructures est encore faible. Il n'existe à ce jour aucune norme ou réglementation en France et en Europe en matière de nuisances dues aux transports. Dans le domaine des bruits aériens, les données de l'ACNUSA pour la région francilienne sont nuancées : selon les zones concernées, le bilan résultant de la réorganisation des couloirs aériens est favorable ou non, et si le nombre d'habitants survolés en dessous de 3000 m a diminué, la situation se serait dégradée en ce qui concerne les survols à basse altitude (moins de 1000 m), les plus gênants. Avec la directive 2002/49/CE, le bruit autour des aéroports est davantage surveillé.

Si l'arsenal réglementaire, qui était éparpillé, a été très utilement intégré et complété avec la loi n°92-1444 du 31 décembre 1992, la mise en application de cette loi reste, à ce jour, insuffisante. A la demande des responsables politiques, de nombreux rapports et travaux, conduits en France au cours des dernières années, ont établi régulièrement un état des lieux de l'application des textes réglementaires au plan national et ont fourni de nombreuses propositions visant à améliorer la lutte contre les nuisances sonores. Mais leurs résultats et recommandations n'ont souvent que partiellement été pris en compte et mis en application¹⁶⁰.

5.3. LES RECOMMANDATIONS

5.3.1. LES DIFFERENTS ACTEURS

Il faut souligner la multiplicité des acteurs en matière de lutte contre les nuisances sonores. Sont notamment impliqués dans la lutte contre le bruit les ministères en charge de : Développement Durable, la santé, l'intérieur, l'équipement et le logement (y compris la DGAC), la justice, la défense, la culture, la jeunesse et les sports, l'économie les finances et l'industrie. Sont également impliqués en matière de lutte contre les nuisances sonores :

- les directions des grands aéroports nationaux (définition des PEB)
- le Conseil National du Bruit
- le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France
- l'Agence de l'Environnement et la Maîtrise de l'Énergie (action de recherche et développement)
- le comité français d'Éducation pour la santé (actions de communication et d'éducation)
- les services déconcentrés de l'État : DDASS (directions départementales des affaires sanitaires et sociales), DRASS (directions régionales des affaires sanitaires et sociales), DRIRE (directions régionales de l'industrie, de la recherche et de l'environnement), DIREN (Directions régionales de l'Environnement), DDE (directions départementales de l'équipement)
- les pôles de compétence bruit (département ; ces pôles sont en grande majorité pilotés par les DDASS).
- l'ANAH : agence nationale de l'amélioration de l'habitat
- l'ACNUSA pour les nuisances sonores aériennes
- les associations spécialisées dans la lutte contre le bruit ou contre les nuisances (application de la réglementation, problèmes particuliers)
- BruitParif : Observatoire du bruit en Ile-de-France créée à l'automne 2004 à l'initiative de la Région
- les associations de défense des consommateurs ou des particuliers
- les associations d'information en matière de bruit, d'environnement ou d'écologie (diffusion d'information, éducation, sensibilisation, etc.), y compris le CIDB (centre d'information et de documentation sur le Bruit, créé en 1978, qui dispose d'une bibliothèque de 12 000 documents, de fiches pratiques pour les particuliers et de plaquettes grand public)
- les élus

→ les services techniques des Collectivités Locales

Un programme de rattrapage des points noirs devait être engagé dès l'an 2000 et porter en priorité sur la protection des habitations exposées à des nuisances sonores excessives et des bâtiments publics sensibles. Rappelons qu'un point noir du bruit est une habitation, un établissement d'enseignement social ou sanitaire exposés à plus de 70 dB le jour et 65 dB la nuit. En février 2002, le bilan restait mitigé : le recensement, par les préfets, des zones fortement exposées au bruit n'était pas complet ; les reports des informations de classement dans les PLU étaient rarement réalisés. 37% des collectivités locales interrogées dans le cadre d'une enquête conduite par le CIDB déclaraient en 2002 que le recensement des points noirs n'avait pas été fait dans leur département ; 30 % des collectivités locales ne savaient pas que ce recensement devait avoir lieu ! Seules 30 % des CL déclaraient que les opérations de rattrapage avaient été programmées sur leur territoire ; et 30 % ne se prononçaient pas. On peut donc estimer qu'il y a un manque d'engagement suivi de l'État dans la politique de réduction des nuisances sonores, et en particulier en ce qui concerne la résorption des points noirs.

Les bâtiments d'habitation, les établissements d'enseignement et de santé, ainsi que les hôtels venant s'édifier dans ces secteurs devront présenter des isolements acoustiques (qui caractérisent la « résistance » de la façade, fenêtres fermées, à la transmission du bruit provenant de l'extérieur) compris entre 30 et 45 dB(A) afin que les niveaux de bruit résiduels intérieurs ne dépassent pas 35 dB(A) de jour et 30 dB(A) de nuit.

Les opérations de protection contre le bruit doivent privilégier les solutions de protection à la source (écrans antibruit, parements acoustiques, actions de réduction du bruit de roulement) par rapport à l'insonorisation des locaux qui doit rester le dernier recours. Ces solutions techniques sont conçues de manière à ce que les contributions sonores extérieures soient si possible inférieures à 65 dB(A) de jour et à 60 dB(A) de nuit, et qu'en tout cas, les contributions sonores intérieures résiduelles soient inférieures à 40 dB(A) de jour et à 35 dB(A) de nuit.

5.3.2. RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE FRANÇAISE DE SECURITE SANITAIRE ENVIRONNEMENTALE

Recommandations sur les indicateurs Bruit - Santé

Une première « recommandation » d'ordre général consisterait à préciser, préalablement à la définition des mesures de santé publique, ce que l'on entend par « santé » lorsque l'on tente de quantifier les effets des facteurs environnementaux sur l'homme. La définition large donnée par l'OMS de la santé n'est en effet pas toujours admise par les « décideurs » et les notions de « bien-être physique, mental et social » sont difficiles à définir. Il serait donc fort utile de préciser quelles sont les atteintes à l'intégrité humaine qui doivent être considérées comme inacceptables, et ce choix devrait être fait en fonction du facteur considéré et du contexte dans lequel il se manifeste. La réponse à cette question doit guider l'intervention des pouvoirs publics et la mise en œuvre des politiques de santé publique.

La traduction des effets du bruit sur la santé, à l'aide d'indicateurs, mérite un important travail d'amélioration des connaissances des impacts sanitaires du bruit. Si pour le trafic routier, la gêne exprimée est bien connue et représentée à travers les courbes dose-réponse, il existe une grande variabilité, en ce qui concerne le trafic aérien, variabilité suivant les aéroports et la période de consultation. Pour répondre à la question des effets à long terme de l'exposition au **bruit nocturne**, il conviendrait de réaliser une large enquête épidémiologique centrée sur l'exposition au bruit nocturne et dans laquelle seraient comparées deux populations de personnes ayant une même exposition au bruit au cours de la journée et qui ne diffèreraient que par le niveau d'exposition au bruit au cours de la nuit. De tels travaux permettraient de déterminer la part liée à l'exposition bruit nocturne dans les effets de l'exposition cumulée au bruit.

La diminution des **performances scolaires** liée à une exposition au bruit dans les salles de classes. Les

connaissances actuelles montrent qu'une exposition excessive au bruit dans le cadre de l'enseignement primaire diminue la compréhension du discours de l'instituteur, augmente l'irritabilité et la fatigue des élèves et des enseignants, entraîne un retard d'acquisition de la lecture. Certains travaux laissent à penser que les facteurs socio-économiques constituent un facteur de confusion important, ce qu'il conviendrait de vérifier.

Indices de bruit et indicateurs bruit-santé (intégrés ou évènementiels)

Les descripteurs acoustiques de l'exposition au bruit sont multiples, ce qui n'est pas un facteur de transparence en matière de gestion des nuisances sonores. On distingue les indices *intégrés* (énergétiques ou statistiques) et les indices *évènementiels*. Dans le premier cas, les valeurs données sont globalement plus faibles (car moyennées sur une longue période de temps) et elles ne devraient pouvoir être mises en relation qu'avec une évaluation globale, tandis que, dans le second cas, les valeurs peuvent être mises en relation avec des effets immédiatement observables sur la santé.

Un descripteur ou indice *intégré* peut sans doute rendre compte de la *gêne globale* exprimée par des individus pour une période d'exposition telle que la journée. En revanche, les perturbations du sommeil sont vécues inconsciemment par le dormeur et toute interruption de son processus hypnique peut entraîner un éveil prolongé et une réduction du temps de sommeil, chaque évènement bruyant doit donc être quantifié. Un indice intégré sur les 8 heures nocturnes est insuffisant pour rendre compte des perturbations biologiques subies du fait de la survenue d'évènements bruyants ponctuels au cours de la nuit.

Les indicateurs retenus dans la directive européenne 2002/49/CE relative au bruit de l'environnement (Lden et Lnight) sont fondés sur l'évaluation de l'énergie équivalente développée sur de longues périodes (niveau LAeq sur la période jour, soirée, nuit). Ils ne traduisent pas de façon pertinente toutes les situations et notamment l'émergence des sources évènementielles dans un bruit de fond faible (bruit nocturne par exemple). Ils sont donc insuffisants comme outil de gestion des niveaux de bruit dans la perspective de protéger la santé des populations.

Il est essentiel de préciser systématiquement quelle catégorie d'indices (intégrés ou évènementiels) est utilisée pour quantifier l'environnement ou l'évènement sonore.

Afin de prendre en considération plusieurs paramètres en plus du niveau énergétique total, il convient de compléter, dans la réglementation française, les indicateurs énergétiques imposés dans la directive 2002/49/CE, en tenant compte :

- de l'*émergence* du bruit (le Lmax mais celui-ci n'est pas pleinement satisfaisant) ;
- du *nombre d'évènements sonores* ;
- de la *période* pendant laquelle les évènements bruyants se produisent, en particulier la nuit.

Il est ainsi souhaitable que les indices *évènementiels* soient introduits dans les indices déjà mis en place de manière prendre en compte les effets sur le sommeil de l'exposition au bruit. Cependant, il convient de s'en tenir à un petit nombre d'indicateurs pertinents appliqués à l'ensemble des sources en supprimant les indicateurs spécifiques à certains types de sources.

Pour ce qui concerne les indicateurs intégrés de la directive européenne 2002/49/CE, les pondérations (pénalités) du Lden, retenues à ce jour pour les périodes de soirée et de nuit, méritent d'être reconsidérées de façon approfondie et validées. Dans le cadre du programme Santé Publique initié par le Conseil du Parlement Européen¹⁶¹, l'OMS (Bureau Régional Européen à Bonn) a déposé récemment le projet *Night Noise Guidelines* (NNGL). Les deux principaux objectifs de ce projet consistent à :

- proposer des recommandations (valeurs limites) en matière de bruit nocturne, pour des expositions de courte comme de longue durée, dans le but de protéger la santé des populations ;
- valider la pondération (+10 dB) affectée à la période nocturne dans le calcul du Lden. Ces travaux pourraient être suivis et pris en compte dans la réglementation nationale.

Recommandations pour les pouvoirs publics

Intégrer les objectifs de réduction des nuisances sonores dans la politique d'aménagement du territoire et de la ville ;

Un dispositif de surveillance des impacts sanitaires du bruit pourrait être coordonné par l'Institut de veille sanitaire (InVS), dont la mission serait de surveiller l'état de santé de l'ensemble de la population et d'alerter les pouvoirs publics en cas de menace pour la santé publique.

Les Observatoires Régionaux de la Santé (en liaison avec BruitParif pour l'Ile-de-France) peuvent fournir des données spécifiques à leur région. Par exemple, dans les régions où se trouvent les dix plus grands aéroports bénéficiant du dispositif d'aide à l'insonorisation au voisinage des aéroports (pour lesquels un Plan de Gêne Sonore est établi), les ORS peuvent fournir des marqueurs de l'exposition de la population régionale aux nuisances sonores aériennes, parmi ceux qui sont définis plus haut.

Les effets du bruit sur la santé sont particulièrement marqués pour les périodes de nuit et soirée. Les pouvoirs publics pourraient être amenés à renforcer les limitations et exigences pour les périodes de soirée et nuit en termes d'exposition de la population au bruit des transports.

Recommandations pour les élus locaux

Le bruit reste une compétence de la seule commune, voire de l'Etablissement Public de Coopération Intercommunale, lorsque cette compétence lui a été transférée, et l'on peut regretter que les nuisances sonores ne fassent pas l'objet d'actions plus globales. Une politique globale et cohérente de lutte contre le bruit serait plus efficace au niveau de l'agglomération avec la mise en place de moyens financiers et humains plus importants.

Recommandations pour les professionnels

Actuellement, les *matériaux* mis en œuvre dans un site urbain sont réfléchissants (façades des bâtiments, rues piétonnes, voies circulées, mobilier urbain,...), entraînant une amplification des signaux sonores émis, pouvant aller de 2 à 8 dB(A).

L'évolution probable de la motorisation thermique actuelle vers l'hybridation (électrique / thermique) semble constituer une avancée en termes d'émissions sonores. La recherche dans le domaine du « véhicule propre » hybride mais aussi tout électrique se légitime donc également sur le plan acoustique.

D'autres recommandations

Dans un avis du 6 mai 2004, le **Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF)** a émis des recommandations relatives aux expositions des populations au bruit aérien. Il préconise ainsi :

- de ne pas dépasser, en façade des habitations un niveau de Lden de 60 dB(A), toutes sources confondues

- de respecter pendant la période 22h – 6h en façade des habitations, les critères suivants, correspondant aux recommandations de l’OMS, en prenant en compte un isolement de façade de 25 dB(A)
 - $L_{aeq} < 55$ dB(A) toutes sources confondues
 - Moins de 10 événements sonores, toutes sources confondues, avec un $L_{Amax} > 70$ dB(A)

Le Conseil a rappelé la nécessité de l’optimisation du ciel et que soit affinée la connaissance de la situation sanitaire française résultant de l’exposition au bruit des avions, notamment pour les enfants.

Les experts d’un travail de synthèse pour le ministère de la santé en 1999 ont préconisé une limite de 15 à 20 bruits par nuit n’excédant pas 45 dB(A) (L_{max}) dans la chambre du dormeur¹⁶².

L’Observatoire Régionale de Santé d’Ile-de-France place le bruit comme un enjeu de santé publique, précisant qu’un francilien sur 4 déclare avoir ressenti des effets du bruit sur sa santé dans une région à forte densité urbaine et forte densité d’infrastructures de transport. L’Observatoire affirme que les études épidémiologiques sous-estiment les effets sanitaires du bruit, car nous n’attribuons pas forcément nos problèmes de santé au bruit, surtout si les effets opèrent à long terme¹⁶³.

Dans le cadre du Grenelle de l’Environnement, le **Conseil National du Bruit** souhaite que la fiscalité soit plus dissuasive pour réduire les vols de nuit et que, parallèlement, les conditions pour l’instauration d’un couvre-feu au niveau européen soient recherchées.

5.3.3. RECOMMANDATIONS DE L’OMS

Pour la mise en œuvre des directives, l’OMS recommande que :

- Les gouvernements assument la protection de la population contre le bruit de la collectivité, et la considère comme partie intégrante de leur politique de protection de l’environnement.
- Les gouvernements envisagent la mise en œuvre de plans d’action avec des objectifs à court terme, à moyen terme et à long terme, pour réduire des niveaux de bruit.
- Les gouvernements adoptent les valeurs des Directives de santé pour le bruit dans les collectivités comme objectifs à long terme.
- Les gouvernements incluent le bruit comme un élément de santé publique important dans les études d’impact sur l’environnement.
- Une législation soit mise en place pour permettre la réduction des niveaux sonores.
- La législation existante soit imposée.
- Les municipalités développent des plans de mise en œuvre de la limitation du bruit.
- La rentabilité et les analyses coûts-avantages soient considérées comme des instruments potentiels pour des décisions de gestion significatives.
- Les gouvernements apportent leur soutien à la recherche orientée vers la mise en place de politiques.

Les valeurs guides de l’OMS

Des valeurs guides relatives aux effets spécifiques du bruit sur la santé et dans des environnements spécifiques ont été proposées par l’OMS en 2000⁶⁵.

Environnement spécifique	Effet critique sur la santé	L _{Aeq} [dB(A)]	Base de temps [heures]	L _{Amax}
Zone résidentielle extérieure	Gêne sérieuse pendant la journée et la soirée	55	16	-
	Gêne modérée pendant la journée et la soirée	50	16	-
Intérieur des logements	Intelligibilité de la parole et gêne modérée pendant la journée et la soirée	35	16	-
Intérieur des chambres à coucher	Perturbation du sommeil, la nuit	30	8	45
A l'extérieur des chambres à coucher	Perturbation du sommeil, fenêtre ouverte	45	8	60
Salles de classe et jardins d'enfants, à l'intérieur	Intelligibilité de la parole, perturbation de l'extraction de l'information, communication des messages	35	Pendant la classe	-

Recommandations du groupe d'experts de l'OMS

L'étude de la bibliographie internationale atteste l'existence d'un impact sanitaire des nuisances sonores aéroportuaires en matière de troubles du sommeil et de gêne notamment, effets pour lesquels les experts s'accordent sur un niveau de preuves suffisant.

En dépit de l'utilisation d'avions moins bruyants depuis quelques années entraînant une baisse du niveau global de bruit, attesté par l'indice global mesuré pondéré (IGPM) de bruit annuel, les nuisances persistent. Les améliorations techniques sont neutralisées par l'augmentation du trafic aérien et le rapprochement des vols. C'est pourquoi les plaintes des riverains sont nombreuses et légitimes. Cela implique que le principe de prévention soit appliqué.

Des questions subsistent telles que la relation entre le bruit et l'HTA, la relation dose-réponse sur certains effets objectifs (cardiopathies ischémiques) ou subjectifs (neuropsychologiques) et l'identification des populations sensibles.

De fait, la Direction générale de la santé pilote actuellement la mise en place d'une étude nationale qui va être réalisée autour de 2 aéroports français (Etude DEBATS). Un comité de pilotage et un comité scientifique ont été constitués et l'étude de faisabilité a débuté. Il semble donc peu pertinent d'envisager actuellement le développement d'une autre étude à visée étiologique. Toutefois, le groupe d'experts souhaite formuler des recommandations en direction des équipes de recherche pour améliorer, dans les futures études épidémiologiques, la connaissance des expositions individuelles.

La revue de la littérature sur l'impact des nuisances aéroportuaires sur la santé des riverains permet d'affirmer que la survenue de certains effets sanitaires est suffisamment étayée

5.3.4. RECOMMANDATIONS DE L'ACTION 21 DES NATIONS-UNIS

Le document Action 21¹⁶⁴ adopté par les Nations-Unis soutient un certain nombre de principes de gestion de l'environnement sur lesquels les politiques des gouvernements peuvent être basées : le **principe de précaution**, quand il existe un risque que la santé publique soit mise en danger, sans attendre que la preuve scientifique soit pleinement établie ; le principe pollueur – payeur pour inciter les acteurs responsables de la nuisance à réduire cette nuisance et à limiter les populations impactées.

6. LES NUISANCES AERIENNES

Pour les avions à réaction en vol, on distingue : le bruit des groupes motopropulseurs et le bruit aérodynamique. A la base du bruit émis par l'ensemble propulsif, on trouve plusieurs sources de bruit directement liées aux composants du moteur : soufflantes amont et aval, compresseur, turbine, chambre de combustion, ainsi que le bruit de jet. Le bruit des parties tournantes est caractérisé par la présence de fréquences pures (bruit de raies) qui se superposent à un bruit à large bande. Ce bruit de raies est plus marqué à l'avant du réacteur. Le bruit de jet est dû à la génération de fortes turbulences dans la zone où les gaz chauds à haute pression sont éjectés dans la tuyère du moteur et se mélangent à l'air ambiant. Ce bruit est un bruit large bande, sa directivité est maximale à l'arrière et il est fonction de D^2V^8 (D étant le diamètre de la tuyère et V la vitesse d'écoulement du jet). L'introduction dans les années 1970 de moteurs à taux de dilution élevé fut à l'origine d'une diminution importante du niveau de bruit des avions commerciaux. Le bruit de jet a été réduit, dans les moteurs modernes à double flux, de grand diamètre et à basse vitesse d'éjection.

6.1. LES PRATIQUES AU NIVEAU INTERNATIONAL

6.1.1. CAS DU BRUIT AERIEN

Pour quantifier le bruit produit par le passage d'un avion, on distingue les descripteurs qui ne retiennent que le niveau maximum du bruit perçu au cours du passage de l'aéronef, comme L_{max} (soit en dB(A) soit en PNdB), et ceux, fondés sur une mesure de l'énergie acoustique, qui intègrent la durée de l'évènement. Pour ces derniers on peut soit considérer l'énergie du survol, en PNdB (c'est alors le EPNdB), avec ou sans corrections pour la présence de sons purs ; soit ramener l'énergie du passage à une durée identique de 1 seconde pour tous les bruits (SEL).

A l'inverse du bruit routier et du bruit ferroviaire, les descripteurs d'exposition utilisés dans les réglementations relatives au bruit des avions sont très nombreux. En fait deux approches semblent coexister : l'une a recours au L_{aeq} ou à ses dérivés (L_{den}), l'autre utilise des indicateurs qui prennent en compte à la fois le nombre de mouvements d'avions et surtout les niveaux de crête au passage avec des pondérations différentes suivant la période de la journée. Les différences entre pays concernent ainsi : l'unité de bruit (pondération A ou EPNDB), la durée des survols, le poids relatif des niveaux maximum et du nombre de vols ainsi que les facteurs de pondération pour le temps des évènements.

6.1.2. INDICATEURS ACOUSTIQUES DE LA GENE LIEE AU BRUIT A PROXIMITE DES AEROPORTS

L'usage d'un indicateur acoustique pour représenter les effets du bruit du trafic aérien sur les riverains procure un fondement technique à la gestion de l'environnement aéroportuaire et représente une méthode plus objective que les luttes d'influence des acteurs industriels auprès des autorités gestionnaires. L'indicateur va être aussi utilisé pour définir des zones autour de l'aéroport et préciser l'urbanisation possible dans ces différents secteurs, c'est-à-dire concilier l'utilisation des sols et l'exploitation des aéroports lors de la création des documents d'urbanisme, pour le long terme. Un tel indicateur va aussi permettre de contrôler la qualité sonore autour des aéroports, à court terme, et de déterminer si un logement exposé a droit à une aide financière pour améliorer l'isolation de son habitat¹⁶⁵.

6.1.3. L'USAGE D'UN INDICATEUR ACOUSTIQUE COMPLEMENTAIRE AU Lden

L'article 5 du texte de la directive européenne 2002/49/CE précise les indicateurs acoustiques retenus : Lden et Ln. Le paragraphe 2 de cet article indique que « *les pays membres peuvent utiliser des indicateurs de bruit supplémentaires, pour des cas particuliers comme ceux cités en annexe* ». La première application possible de cette disposition intervient « *lorsque le bruit apparaît pendant une petite fraction du temps, c'est-à-dire 20% ; la seconde concerne les situations où le nombre moyen d'événements bruyants est bas, un événement durant moins de 5 minutes* ». Dans ce cas « *Lmax ou SEL peuvent être utilisés pour la période de nuit, et la protection contre les crêtes de bruit* ».

Lmax, gêne et perturbation du sommeil

L'indice L_{Amax} a été très utilisé dans les recherches sur la perturbation du sommeil par le bruit ; dans les années 90, Griefahn et Pearsons ont proposé de combiner le nombre d'événements et le L_{Amax} pour évaluer l'impact du bruit des avions sur le sommeil^{166 167}. Une recherche a permis d'observer une modification du décours naturel du sommeil, parmi les riverains de l'aéroport de Los Angeles, en 1973, quand les avions étaient très bruyants : Friedman a pu observer une forte récupération du sommeil lent après la cessation des vols de nuit sur une piste, fermée pour cause de réparation, témoignage d'un déficit antérieur de ce type de sommeil¹⁶⁸.

Le travail d'analyse du TNO¹⁶⁹ découlant des observations réalisées à Schiphol-Amsterdam, montre que les effets du bruit sur la motilité instantanée pendant le sommeil, c'est-à-dire des mouvements corporels spontanés sont mieux liés au L_{Amax} qu'au Leq intérieur aux chambres ; les niveaux de bruit d'avions qui induisent cette motilité commencent à 32 dB(A), ce qui est inférieur aux niveaux généralement pris en compte¹⁷⁰.

Les travaux de l'Institut allemand de l'air ne permettent pas encore de trancher la question : l'exploitation des résultats obtenus en laboratoire montre bien un impact des bruits d'avions sur le sommeil lent et la durée des éveils¹⁷¹. L'utilisation de L_{Amax} paraît bien adaptée pour décrire les effets des bruits d'avions et de trains sur le sommeil.

Lmax et gêne

La limitation du bruit en termes de crête permet de lisser le signal acoustique et de réduire la gêne. Griffiths et Delauzun ont étudié les variations de gêne au cours des saisons ; ils ont observé que pendant l'été, fenêtres ouvertes, la gêne était aussi forte que pendant l'hiver, fenêtres fermées, ce qui correspond approximativement à 15 dB d'écart en Leq¹⁷². Une interprétation possible de ce constat est qu'une partie de la gêne est mémorisée par le cerveau, et que son expression n'est pas proportionnelle au niveau de bruit ; en conséquence un L_{Amax} réduit n'excite pas « l'aire corticale du bruit » qui est la base biologique de la gêne. Cela représente une seconde justification de l'usage d'un descripteur complémentaire au Lden, tel que le L_{Amax}.

Conclusions sur les indicateurs dans le cas des bruits aériens

Le bruit des avions est une question déjà ancienne de qualité de vie autour des aéroports. Il est aujourd'hui pris en compte par les autorités en charge de l'environnement, au plan réglementaire et administratif, avec de nombreuses décisions récentes prises à la fin des années 1990 et surtout depuis l'an 2000. Avec la directive européenne 2002/49/CE relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement, le bruit autour des aéroports est maintenant surveillé. Les conséquences de cette action administrative sont visibles dans la plupart des aéroports, qui ont conscience que leur développement est lié à une action vigoureuse en matière d'ambiance sonore. L'installation de réseaux permanents de mesures acoustiques autour des principales plates-formes permet de noter la diminution des niveaux sonores. Cependant, la protection particulière de la qualité du sommeil des riverains d'aéroport est un problème qui demeure, malgré les diminutions de bruit constatées.

Après avoir soutenu l'usage du Lden et proposé les valeurs limites des zones de protection, l'ACNUSA a suggéré de limiter les niveaux maximaux des survols.

6.1.4. LES INDICATEURS DE LA DIRECTIVE EUROPEENNE 2002/49/CE (2002)

Suite aux travaux du Groupe de Travail « Indicateurs de bruit » de la Commission des Communautés européennes, il a été proposé de retenir, pour décrire le bruit de toutes les sources extérieures (route, fer, avion, équipement extérieur, de façon séparée) et à des fins d'évaluation, de cartographie, de planification et de réduction du bruit, les indicateurs suivants :

1/ le Lden (day - evening – night) qui combine le LAeq de jour (12 heures), le LAeq de soirée (4 heures) et le LAeq de nuit (8 heures) avec une correction de 5 dB pour la soirée, de 10 dB pour la nuit et aucune correction pour le jour. La formule est la suivante :

$$Lden = 10 \lg [(12/24).10^{LD/10} + (4/24).10^{(LE+5)/10} + (8/24).10^{(LN+10)/10}]$$

Par défaut les périodes sont les suivantes :

- jour : 07:00 – 19:00 (période d'activité)
- soirée : 19:00 – 23:00 (période de relaxation)
- nuit : 23:00 – 07:00 (période de sommeil)

La directive laisse le soin aux pays membres de moduler de plus ou moins une heure ces horaires pour tenir compte des décalages horaires et des différences d'habitudes de vie locales. La France a choisi de retirer une heure :

- jour : 06:00 – 18:00 (période d'activité)
- soirée : 18:00 – 22:00 (période de relaxation)
- nuit : 22:00 – 06:00 (période de sommeil)

2/ le LAeq nuit (8 heures), niveau équivalent mesuré en dB(A)

Ces niveaux doivent être mesurés ou calculés sur la façade la plus exposée à 4 mètres du sol et doivent être représentatifs de l'exposition moyenne au cours d'une année (exposition de long terme). Deux critères de santé et de bien-être ont été retenus dans le choix de ces indicateurs : la gêne psychologique (perturbation des activités) ainsi que les effets sur le sommeil.

6.1.5. PERTINENCE SUR LE PLAN SANITAIRE

Se prononcer sur la pertinence des indicateurs existants sur le plan sanitaire nécessite de définir d'abord la « dose » de bruit qu'il faut choisir dans "la famille Décibel" et quel(s) effet(s) sur la santé on considère (gêne, effets sur le sommeil, interférence avec la communication etc.). Les discussions sur ces choix sont très nombreuses et on trouve dans les travaux scientifiques les arguments pour soutenir des propositions très diverses. Les principales questions de débat concernent :

- le choix entre la pondération A des fréquences (dB(A)), qui correspond à la sensibilité de l'oreille et qui abaisse les valeurs dans les fréquences inférieures à 500 Hz, et une pondération qui tient compte de la nature du bruit, par exemple la pondération C pour les bruits contenant beaucoup de basses fréquences ;
- le choix entre un descripteur d'énergie globale du type LAeq (ou Lden) et un descripteur prenant en

compte les crêtes ;

- les bruits intermittents (moins de 20 % du temps par exemple) pour lesquels il est préférable d'utiliser des descripteurs s'appuyant sur le LA_{max} ou le SEL plutôt qu'une moyenne globale de long terme ;
- la considération de la sensibilité différente des activités humaines possibles tout au long de la journée, par exemple le sommeil la nuit ;
- les réglementations recommandent pour la plupart, pour les sources de bruit extérieures, de mesurer le bruit à l'extérieur des logements, en négligeant totalement l'isolation procurée par les fenêtres mais aussi le style de vie. A Séville, on doit vivre plus souvent avec les fenêtres ouvertes qu'à Aberdeen et une réglementation prenant en compte le bruit à l'extérieur introduira une distorsion supérieure.

L'examen des effets du bruit sur l'homme, celui des normes existantes (ISO 1996) et des pratiques à travers le monde conduit ainsi de plus en plus à l'utilisation du niveau énergétique équivalent LA_{eq}. Il est défini comme le niveau d'un bruit continu et stable, sur une période donnée qui serait équivalent (en termes énergétiques) au bruit réel présentant des variations de niveaux et mesurés sur la même période. Le LA_{eq} est calculé à partir de la connaissance du niveau L à chaque instant, mesuré en dB(A). On précise les périodes d'intégration, sur 24 h, ou de jour, de soirée, etc.

L'usage du LA_{eq} peut donner lieu à une correction pour la nuit et parfois la soirée : le niveau moyen jour-nuit (L_{dn}) intègre une correction de 10 dB pour la nuit de 22 à 7 heures. Le niveau moyen jour-soirée-nuit (L_{den}) intègre une correction de 5 dB pour la soirée et 10 dB pour la nuit. Cette façon de caractériser le bruit ne prend pas bien en compte la perturbation apportée par des bruits isolés que des descripteurs comme le LA_{max} ou le SEL permettraient d'intégrer. Ceci concerne deux sources importantes de bruit : les avions et les trains.

6.2. PERSPECTIVES DE REDUCTION DU BRUIT

La **réduction du bruit à la source** est une nécessité pour le développement du transport aérien. L'intégration des nouvelles technologies disponibles dans la conception des moteurs et des avions a permis, en trente ans, de réduire en moyenne d'un peu plus de 20 décibels le bruit des avions à réaction. De nouveaux progrès, moins significatifs, résulteront des efforts entrepris dans deux domaines : la diminution du bruit moteur et la réduction du bruit aérodynamique. Initialement source considérable de nuisances sonores sur les moteurs de génération précédente, le bruit de jet a notablement diminué sur les moteurs subsoniques.

Les recherches de réduction du bruit moteur reposent aujourd'hui principalement sur trois voies :

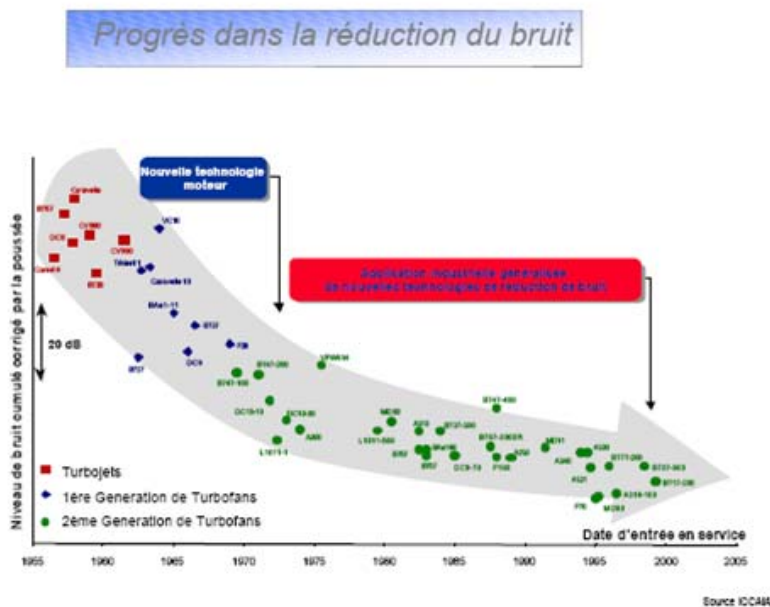
- la réduction du bruit de la soufflante, objectif prioritaire des recherches ;
- la conception d'éléments moteurs plus silencieux tels que l'optimisation du nombre et de l'espacement des aubes fixes et mobiles ;
- l'emploi de structures absorbantes. Les recherches dans ce domaine se poursuivent.

Malheureusement, la recherche dans le domaine de la diminution du *bruit moteur* se limite principalement aux moteurs équipant les avions de plus de 100 places. Un investissement sur l'ensemble de la gamme des moteurs devrait être apporté. De plus, avec les technologies actuelles, un équilibre semble atteint entre le niveau de réduction du bruit et la viabilité économique des solutions mises en œuvre. Un nouveau saut technologique s'avère donc nécessaire.

Le *bruit aérodynamique* est particulièrement notable lors des phases d'approche, où les moteurs sont réduits, et où les volets hypersustentateurs et le train d'atterrissage – principales sources de bruit

aérodynamique – sont sortis. Ce problème devra recevoir une attention particulière dans les années futures, dans la mesure où il apparaît désormais qu'en approche, compte tenu des progrès réalisés sur les moteurs, le bruit aérodynamique est du même ordre de grandeur que le bruit des réacteurs. Les recherches visant à identifier les sources de bruit et à modéliser les mécanismes de génération et de propagation pour les atténuer doivent être encouragées. Par ailleurs, le bruit produit par les aéronefs lors de leur stationnement (essais moteurs) ou de leur roulage au sol peut être une source de nuisances sonores pour les riverains proches des aérodromes.

Les innovations technologiques en matière aéronautiques ont permis, ces vingt dernières années, de réaliser des progrès considérables en termes de diminution de bruit émis par les aéronefs. Mais les derniers décibels gagnés l'ont été à un prix élevé. Les recherches actuelles permettent des gains de quelques dixièmes de décibels, ce qui est imperceptible à l'oreille humaine. La courbe ci-dessous issue des études du groupe SNECMA le confirme. Des gains très importants dans la décennie 1960 – 1970 (-4 dB par an), plus modeste dans la décennie suivante (-1 dB par an). L'asymptote horizontale montre, aujourd'hui, une saturation de ces gains.



Les innovations technologiques ne permettront pas, à court terme, de régler tous les problèmes de nuisances sonores aériennes. Une réglementation stricte des survols, associée à des restrictions opérationnelles, doit accompagner les efforts de recherche en cours.

6.3. ÉTAT DES LIEUX DE LA SITUATION FRANÇAISE

Dans une communication en Conseil des ministres le 17 décembre 2003, le ministre de l'Équipement a présenté les résultats des mesures mises en œuvre pour réduire les nuisances sonores en Île-de-France. Ces mesures avaient comme objectifs le retrait progressif des avions les plus bruyants et la **diminution de plus de 15% du nombre de vols de nuit**, sur la plate-forme de Roissy CDG.

Le graphe ci-dessous fourni par la DGAC montre ce que vaut la promesse d'un ministre.

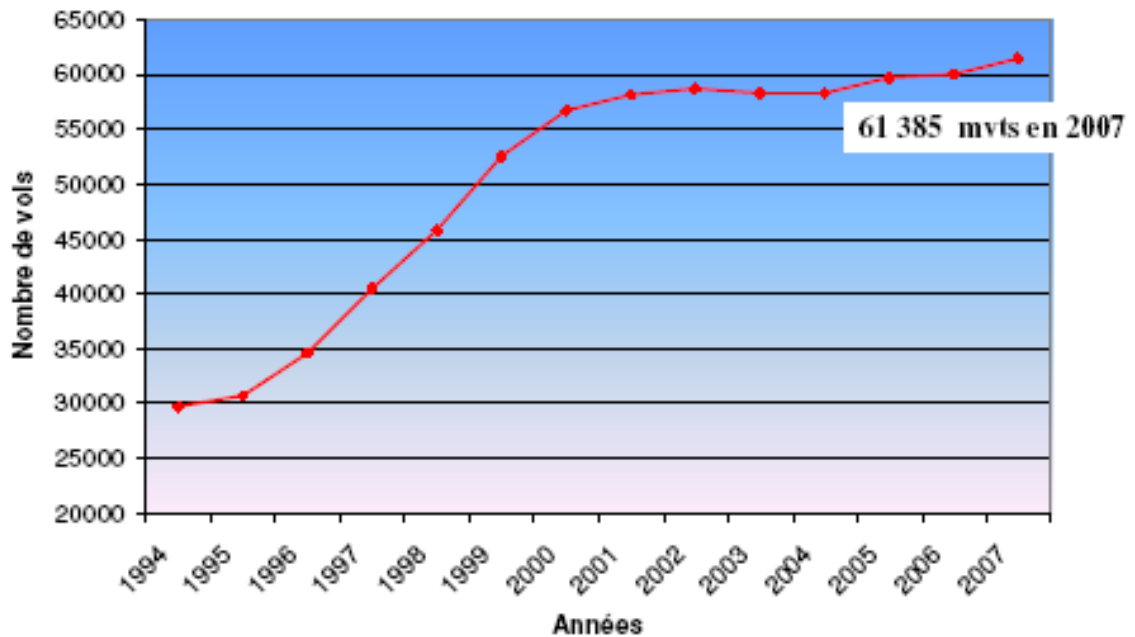

 direction générale
de l'Aviation civile

 direction du Transport
aérien

 sous-direction des Études
de « Statistiques et de la
Prospective

 sous-direction du
Développement durable

Nombre de vols entre 22 h et 6 h (mouvements commerciaux et non commerciaux en heure piste)



Le législateur français, soucieux de réduire les vols de nuit, mais en ménageant globalement les intérêts économiques des acteurs du trafic aérien a limité l'attribution des créneaux de cœur de nuit (0h – 5h) sur la plate-forme de Roissy CDG, qui est la plus chargée d'Europe en termes de vols de nuit. Les compagnies n'obtenant plus de créneaux dans cette tranche horaire ont déplacé leur demande en début de nuit (22h – minuit) et fin de nuit (5h – 6h). De sorte que le nombre de créneaux a effectivement baissé dans le cœur de nuit, et fortement augmenté sur les tranches adjacentes. Les études épidémiologiques montrent que les bruits au moment de l'endormissement et aux heures matinales sont ceux qui réduisent le plus la durée totale et la qualité du sommeil, notamment les travaux menés autour de l'aéroport de Zurich¹⁷³. C'est ainsi que les périodes initiale et finale du sommeil sont considérées comme étant les plus sensibles aux perturbations sonores¹⁷⁴.

Le transport aérien doit aujourd'hui faire face à des demandes contradictoires. D'une part, la demande de transport s'accroît ; le secteur aérien est en fort développement, hormis quelques périodes de décroissance conjoncturelle. D'autre part, la demande environnementale s'affirme ; la croissance du trafic aérien s'accompagne de nuisances sonores et de pollution chimique qui ont été, pendant longtemps, insuffisamment prises en compte par les politiques publiques, malgré les protestations réitérées et justifiées des riverains d'aéroports. Sans une volonté politique forte, nous ne pourrions pas atténuer l'impact sanitaire du bruit.

6.4. AMELIORATIONS DES TECHNIQUES ET PROCEDURES

6.4.1. LES CRITERES D'UN BON INDICATEUR D'EXPOSITION AU BRUIT

Les indicateurs acoustiques à choisir pour caractériser l'exposition des populations au bruit doivent présenter plusieurs qualités. Les trois principaux critères à prendre en compte sont les suivants :

- *Validité*, c'est-à-dire des indicateurs présentant une relation robuste avec les effets du bruit sur la santé et le bien-être, que cela concerne le degré de sévérité de ces effets sur une personne ou leur fréquence d'apparition dans la population. On doit préférer les indicateurs acoustiques qui montrent une bonne corrélation statistique avec les différents effets du bruit sur la santé, même si ces derniers montrent une variabilité interpersonnelle très large. En effet, aux niveaux de bruit faibles, certaines personnes expriment des difficultés et à l'inverse, aux niveaux très forts, certaines personnes montrent une résistance inattendue aux atteintes du bruit. Lorsque cette corrélation statistique existe, on peut obtenir une bonne prévision des effets d'un niveau de bruit donné sur la population et sur sa santé. Cela permet des propositions de niveaux seuils ou valeurs limites à respecter pour protéger la santé de la plus grande partie de la population.

- *Applicabilité pratique*, c'est-à-dire la facilité de mesurer le bruit existant ou de le prévoir dans les situations où la source de bruit n'existe pas encore. En effet, on ne peut guère proposer un indicateur difficile à mesurer ou à prévoir car on se couperait des possibilités d'employer des paramètres simples mais toutefois sensibles aux variations de situation.

- *Transparence*, c'est-à-dire la facilité à expliquer et à être compris par les utilisateurs, en particulier les riverains, les associations de défense de l'environnement et les élus. En effet, les problèmes de bruit sont soulevés par les riverains des lieux bruyants, et il est nécessaire dans leur dialogue avec les pouvoirs publics et les gestionnaires des infrastructures qui génèrent le bruit, que la façon dont le bruit est mesuré ne soit pas la première cause d'incompréhension et parfois même de défiance. A la limite, on pourrait dire qu'un bon indicateur doit être mesurable physiquement par des moyens simples, accessibles financièrement aux associations d'une part et d'autre part compréhensible par les élus, qui sont, la plupart du temps, le trait d'union entre la population et les techniciens.

6.4.2. LA COMPOSITION SPECTRALE ET LA PRESENCE DE SONS PURS

Une prise en compte des sons graves à 32-250 Hz est nécessaire pour le bruit des transports mesuré à l'intérieur des logements et pour les bruits générés par les équipements des logements qui produisent des bruits sourds bien que de niveaux peu élevés. L'adaptation de silencieux sur les avions de générations anciennes (hushkit) ne fait que transférer l'énergie vers des fréquences plus basses. Cet ensemble d'observations fait que dans les villes par exemple, il existe une sorte de « brouillard acoustique » de basses fréquences.

6.4.3. LA PRISE EN COMPTE DU NOMBRE D'ÉVÈNEMENTS BRUYANTS ET DE LEUR NIVEAU DE CRÊTE

Le problème se pose lorsque le nombre d'évènements est faible et qu'il n'est pas pertinent d'utiliser un descripteur équivalent de bruit (petit nombre de niveaux de crête). Lorsque le nombre de bruits augmente, la prise en compte de l'énergie de chaque évènement conduit à un calcul similaire au Leq. Des travaux suédois et quelques recherches européennes ont mis en évidence le rôle du nombre d'évènements sur la gêne provoquée par un niveau Leq identique, en laboratoire. Lorsque le niveau global est inférieur à 60 dB(A) en Leq, le nombre d'évènements, s'il est faible, c'est-à-dire compris entre 3 et 10 bruits par heure, minimise la gêne par rapport à 20 ou 30 évènements pendant la même période. À l'inverse, pendant le sommeil, on a constaté que des bruits rapprochés avaient moins d'impact sur la qualité du sommeil que des bruits très espacés. La probabilité la plus forte de réveil apparaît lorsque les bruits sont séparés de 40 minutes.

6.4.4. CONSTRUCTION D'UN INDICATEUR INTÈGRE DANS LE TEMPS (LAEQ)

Conséquences importantes.

Il est important de noter que l'opération d'intégration se fait sur une courbe en Intensité et non pas en Niveaux. Entre les deux existe une fonction de puissance que les dessins illustrent mal. Ceci a pour conséquence de donner une importance très grande aux fortes valeurs de niveau, même si celles-ci sont de durée courte. À titre d'exemple, retenons qu'une seconde passée à 100 dBA est équivalente en énergie à 3 heures d'exposition à 60 dBA.

À titre d'illustration complémentaire, prenons l'exemple du trafic aérien. Si l'on réduit par le choix des types d'avions, l'ensemble des valeurs maximales des survols de 1 dB (indiscernable à l'audition) le trafic peut, à valeur d'indicateur identique, être augmenté de 10 %. Si chaque mouvement est réduit de 3 dB et que le trafic double, l'indicateur intégré n'est pas modifié. D'un autre point de vue, si on enlève dans le trafic d'un aéroport un nombre important d'appareils présentant des SEL faibles vis-à-vis des autres appareils, cette modification passera inaperçue au niveau de l'indicateur intégré. À contrario, ajouter quelques avions très bruyants modifiera substantiellement cet indicateur.

7. REFERENCES

7.1. SITES INTERNET

Agence française de sécurité sanitaire environnementale (AFSSE)

<http://www.afsse.fr>

Ministère de l'écologie et du développement durable

http://www.ecologie.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=327

Ministère des transports : Bruits de circulation, comment isoler votre logement

http://www.logement.equipement.gouv.fr/publi/accesbat/doc_pdf/bruit.pdf

Site bruit de la Commission européenne

<http://www.europa.eu.int/comm/environment/noise/>

Mairie de Paris, carte du bruit de Paris

http://www.paris.fr/FR/environnement/bruit/carto_bruit/

Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires

<http://www.acnusa.fr/index.asp>

Organisation mondiale de la santé

<http://www.who.int/topics/noise/fr/>

Centre d'information et de documentation sur le bruit

<http://www.infobruit.org/FR/info/00>

France nature environnement, dossier bruit et santé

<http://www.fne.asso.fr/PA/sante/publi/LettreRSEn24.pdf>

BruitParif

<http://www.bruitparif.fr/cms/>

Union Française Contre les Nuisances des Aéronefs

<http://www.ufcna.eu/>

Association de Défense contre les Nuisances Aériennes

<http://www.advocnar.fr/>

7.2. BIBLIOGRAPHIE

- ¹ AFSSE « Impacts sanitaires du bruit – Etat des lieux – Indicateurs bruit-santé », mai 2004
- ² Camard JP, Lefranc A, Gremy I, Ferry R « Effets du bruit sur la santé : données épidémiologiques récentes » ORS Environnement, Risques et santé juillet-août 2004.
- ³ http://www.ifen.fr/actualites/presse/detail-d-un-communique-ou-dossier/article/environnement-de-proximite.html?tx_ttnews%5BbackPid%5D=878&cHash=68ecee190c
- ⁴ INSEE « Mesurer la qualité de vie dans les grandes agglomérations » n° 868, octobre 2002.
- ⁵ Alexis Roy, Institut Français de l'Environnement « La sensibilité des Français à leur environnement de proximité », N° 85 août 2003.
- ⁶ Menard C, Girard D, Léon C, Beck F « Baromètre santé environnement 2007 » Editions INPES
- ⁷ Borsky PN « Sociopsychological factors affecting the human response to noise exposure », 1979
- ⁸ François J « Les répercussions du bruit des avions sur l'équilibre des riverains des aéroports », rapports IFOP 1979 et 1982
- ⁹ Cette définition, qui n'a pas été modifiée depuis 1946, figure dans le Préambule à la Constitution de l'Organisation mondiale de la Santé, tel qu'adopté par la Conférence internationale sur la Santé, New York, 19-22 juin 1946; signé le 22 juillet 1946 par les représentants de 61 Etats. 1946; (Actes officiels de l'Organisation mondiale de la Santé, n°. 2, p. 100) et entré en vigueur le 7 avril 1948.
- ¹⁰ Chen TJ, Chen SS « Effects of aircraft noise on hearing and auditory pathway function of school-age children », 1993.
- ¹¹ Levy-Leboyer C, Moser G « Individual differences in noise annoyance: four explanations », 1987
- ¹² Fields JM « Variability in individuals responses to noise », 1983
- ¹³ Fields JM "An updated catalog of 521 social surveys of residents' reactions to environmental noise (1943-2000)", NASA/CR-2001-211257, décembre 2001.
- ¹⁴ International Commission of the Biological Effects of Noise
- ¹⁵ Groupe de travail 49 de l'ISO (ISO/TC43/SC1) en 2003.
- ¹⁶ Commission Européenne, 2002
- ¹⁷ Franssen EAM, van Wiechen CMAG, Nagalkerke NJD, Lebreit E « Aircraft noise around a large international airport and its impact on general health and medication use », 2006.
- ¹⁸ Hygge S « A comparison between the impact of noise from aircraft, road traffic and trains on long-term recall and recognition of a text in children aged 12-14 years », 1993.
- ¹⁹ « Le bruit nous rend malades » La maison écologique octobre – novembre 2004
- ²⁰ Wu TN, Lai JS, Shen CY, Yu TS, Chang PY « Aircraft noise, hearing ability, and annoyance 1995
- ²¹ Vorob'ev OA, Krylov IV, Zaritskii VV, Skrebnev SV, Shcherbachenko GE « Aviation noise an ecological environmental factor, 1995
- ²² Maschke C, Breinl S, Grimm R, Ising H « The influence of nocturnal aircraft noise on sleep and on catecholamine secretion » 1993
- ²³ Belojevic G « The effect of aircraft noise on the health of an exposed population », 1988
- ²⁴ Fidell S, Horonjeff R, Mills J, Baldwin E, Teffeteller S, Pearsons K « Aircraft noise annoyance at three joint air carrier and general aviation airports » 1985
- ²⁵ Meecham WC et Shaw NA 1986 « Jet plane noise effects on mortality rates, Cambridge.
- ²⁶ Taylor R, Lyle D « Third runway proposal draft environmental impact statement Sydney airport », 1980.
- ²⁷ Meecham WC et Shaw NA « Increase in mortality rates due to aircraft noise », 1993.
- ²⁸ « Aircraft flyover and mortality », Environmental Impact Reports, Sydney, 1979.
- ²⁹ Frerichs RR, Beeman BL, Coulson AH « Los Angeles airport noise and mortality », 1980

- ³⁰ Van Wiechen CMAG, Franssen EAM, de Jong RG, Leuret E « Aircraft noise exposure from Schiphol airport ; a relation with complainants » 2002
- ³¹ Bjorkman M, Ahrlin U, Rylander R « Aircraft noise annoyance and average versus maximum noise levels » 1992
- ³² Hiramatsu K, Minoura K, Matsui T, Miyakita T, Osada Y, Yamamoto T « An analysis of the general health questionnaire survey around airports in terms of annoyance reaction » International Congress and Exhibition on noise control engineering, Nice august 2000
- ³³ Gunter TC, van der Zande RD, Wiethoff M, Mulder G, Mulder LJ « Visual selective attention during meaningful noise and after sleep deprivation », 1987
- ³⁴ Le Vere TE, Morlock GW, Hart FD « Waking performance decrements following minimal sleep disruption », 1975.
- ³⁵ Vallet M, Cohen JM 2000, Etude épidémiologique des troubles anxio-dépressifs autour des aéroports INRETS rapport LTE n° 2008
- ³⁶ Nérome S, Enjalbert JP, Bouée S, Lainey E, 2004, Impact des nuisances sonores (maladie et insomnie) à proximité des aéroports, Hôpital Européen Georges Pompidou.
- ³⁷ Collectif Santé Nuisances Aériennes BP6, 95390 Saint-Prix
- ³⁸ Cohen JM « Bruit et santé en Ile-de-France », Open ROME (Réseaux d'Observation des Maladies et des Epidémies), 2007
- ³⁹ Haralabidis AS, Dimakopoulou K, Vigna-Taglianti F, Bluhm G, Babisch W, Velonakis M, Katsouyanni K, Jarup L « Etude HYENA (Hypertension and Exposure to Noise near Airport) Acute effects of night-time noise exposure on blood pressure in populations living near airports » European Heart Journal 29, 658-664 HYENA Consortium 2008.
- ⁴⁰ Babisch W. et al. « Annoyance due to aircraft noise has increased over the years - Results of the Hyena study », Environment International, vol.35 n°8 p. 1169-1176 (novembre 2009)
- ⁴¹ « Ninth international congress on noise as a public health problem » Mashantucket, Connecticut, USA 21-25 juillet 2008
- ⁴² Toppila E., Pyykko I. et Stark J., "Age and noise-induced hearing loss", Scan Audiol, n°30 pp.236-44, 2001.
- ⁴³ Mc Fadden S., Campo P., Quaranta N. et Henderson D., "Effects of noise on inferior colliculus evoked potentials and cochlear anatomy in young and aged chinchillas", Hear. Res., n°117 pp.81-96, 1998.
- ⁴⁴ Prasher D., Henderson D., Kopke R., Salvi R., Hamernik E., Mills J., Schulte B., Boettcher F. et Dubno J., A comparison of age-related hearing loss and noise-induced hearing loss, Noise-Induced hearing loss: Basic mechanisms, prevention and control, London, 497-511, 2001.
- ⁴⁵ Campo P., Pouyatos B., Lataye R. et Morel G., "Is the aged rat ear more susceptible to noise or styrene damage than the young ear ?" Noise & Health, n°5 pp.1-18, 2003.
- ⁴⁶ Prince M.M., Gilbert S.J., Smith R.J. et Stayner L., "Evaluation of the risk of noise-induced hearing loss among unscreened male industrial workers", J Acoust Soc Am, n°113 pp.871-80, 2003.
- ⁴⁷ Libert JP, Bach V, Johnson LC, Ehrhart J, Wittersheim G, Tassi P « Cardiovascular responses and electroencephalogram disturbances to intermittent noises : effects of nocturnal heat and daytime exposure », 1991.
- ⁴⁸ Jong RG « extraaural health effects of aircraft noise », 1993
- ⁴⁹ Libert JP, Bach V, Johnson LC, Ehrhart J, Wittersheim G, Keller D « relative and combined effects of heat and noise exposure on sleep in humans », 1991.
- ⁵⁰ Ettema JH « Sleep and nocturnal air traffic », 1991.
- ⁵¹ Kawada T, Suzuki S, Aoki S, Ogawa M « Effects of noise on sleep », 1989.
- ⁵² Nakagawa Y « Sleep disturbances due to exposure to tone pulses throughout the night », 1987.
- ⁵³ Griefahn B, Muzet A « Noise-induced sleep disturbances and their effects on health », 1978.
- ⁵⁴ Öhrström E., Research on noise since 1988: present state, Noise and man, Nice, I. ed. M. Vallet, vol.3, pp.331-338, 1993.
- ⁵⁵ Muzet A., Schieber J.P., Olivier-Martin N., Ehrhart J. et Metz B., Relationship between subjective and physiological assessments of noise-disturbed sleep, International congress on noise as a public health problem, Dubrovnik - Yugoslavia, U. S. E. Agency, pp.575-586, 1973.

- ⁵⁶ Kawada T « Effects of traffic noise on sleep », 1995.
- ⁵⁷ Muzet A. et Ehrhart J., "Amplitude des modifications cardiovasculaires provoquées par le bruit au cours du sommeil", Cœur et médecine interne, n°17 pp.49-56, 1978.
- ⁵⁸ Carter N.L., Cardiovascular response to environmental noise during sleep, 7th International Congress on Noise as a Public Health Problem, Sydney, Australie, vol.2, pp.439-444, 1998.
- ⁵⁹ Horne JA, Reyner LA, Pankhurst FL, Hume KI « patterns of spontaneous and evoked body movements during sleep », 1995.
- ⁶⁰ Carter N.L., "Transportation noise, sleep, and possible after-effects", Environm. Internat., n°22 pp.105-116, 1996.
- ⁶¹ Naitoh P., Muzet A. et Lienhard J.P., Effects of noise and elevated temperature on sleep cycle. Sleep Research, 2nd International Congress of Sleep Research, Edimburgh, vol.4, pp.174, 1975.
- ⁶² Thiessen G.J., "Effect of traffic noise on the cyclical nature of sleep", J Acoust Soc Am, n°84 pp.1741-1743, 1988.
- ⁶³ Ohrstrom E « Sleep studies before and after : results and comparison of different methods » Noise Health 2002
- ⁶⁴ Horne JA, Pankhurst FL, Reyner LA, Hume K, Diamond ID « A field study of sleep disturbance: effects of aircraft noise and others factors » 1994
- ⁶⁵ Berglund B, Maschke C « Bruit et santé », WHO Local Authorities Health and Environment, 2000.
- ⁶⁶ Fruhstorfer B, Pritsch MG « Effects of daytime noise load on the sleep-wake cycle and endocrine patterns in man », 1988.
- ⁶⁷ AFSSE « Impacts sanitaires du bruit – Etat des lieux – Indicateurs bruit-santé », mai 2004
- ⁶⁸ Muzet A. et Ehrhart J., Habituation of heart rate and finger pulse responses to noise during sleep, Noise as a Public Health Problem. ASHA report, 10, Rockville, Maryland, 401-404, 1980.
- ⁶⁹ Vallet M., Gagneux J.M., Claret J.M., Laurens J.F. et Letisserand D., Heart rate reactivity to aircraft noise after a long term exposure, Noise as a Public Health Problem, Centro Ricerche E Studi Amplifon, Milano, 965-971, 1983
- ⁷⁰ Muzet A., Ehrhart J., Eschenlauer R. et Lienhard J.P., "Habituation and age differences of cardiovascular responses to noise during sleep", Sleep 1980, pp.212-215, 1981.
- ⁷¹ Vera MN, Vila J, Godoy JF « Cardiovascular effects of traffic noise : the rôle of negative self-statements », 1994.
- ⁷² Kahn A, Rebuffat E, Sottiaux M « Effects of body movement restraint on cardiac response to auditory stimulation in sleeping infants », 1992.
- ⁷³ Jonsson A. et Hansson L., "Prolonged exposure to stressful stimulus (noise) as a cause of high blood pressure in man", Lancet, n°8 (86-87), 1977.
- ⁷⁴ Stolbun BM, Karagodina IL, Soldatkina SA, Orlova LG, Bobyleva OV « Effect of transportation noise on the status of the cardiovascular system of the population », 1989.
- ⁷⁵ Elwood PC, Ising H, Babisch W « Traffic noise and cardiovascular disease », 1993
- ⁷⁶ Babisch W « Noise as a risk factor concept in cardiovascular diseases », 1985
- ⁷⁷ Altena K, Biesot NE, van Brederode, van Kamp I, Knottnerus TR, Lako JV, Pulles MPJ, Stewart TE « Environmental noise and health, description of data, models and methods used and the results of the epidemiological survey », 1988.
- ⁷⁸ Knipschild P " Medical effects of aircraft noise: community cardiovascular survey ", 1977.
- ⁷⁹ Rosenlund M, Berglin N, Pershagen G, Järup L, Bluhm G « Increased prevalence of hypertension in a population exposed to aircraft noise » Occup Environ Med 2001
- ⁸⁰ Erikson C, Rosenlund M, Pershagen G, Hilding A, Ostenson CG, Bluhm G « Aircraft Noise and Incidence of Hypertension » Octobre 2007
- ⁸¹ De kluivenaar Yv et al – Internoise, Istanbul, août 2007
- ⁸² Van Kempen EE, Kruize H, Boshuizen HC, Ameling CB, Staatsen BA, de Hollander AE « The association between noise exposure and blood pressure and ischemic heart disease: a meta-analysis. Environ Health Perspect 2002

- ⁸³ Maschke C, Arndt D, Ising H, Laude G, Thierfelder W, Contzen S “ The effect of night time airplane noise on excretion of stress hormones in residents living near airports ”, 1995.
- ⁸⁴ Babisch W, Fromme H, Beyer A, Ising H « Increased catecholamine levels in urine in subjects exposed to road traffic noise » Environ Int 2001
- ⁸⁵ Babisch W « Stress hormones in the research of cardiovascular effects of noise » Noise Health 2003
- ⁸⁶ Ising H, Ising M « Chronic cortisol increase in the first half of the night by road traffic noise » Noise Health 2002
- ⁸⁷ Nguyen V “ Le stress prolongé pourrait entraîner une atrophie de l’hippocampe ”, Le quotidien du médecin 1996.
- ⁸⁸ Carter NL, Hunyor SN, Crawford G, Kelly D, Smith AJ « Environmental noise and sleep : a study of arousals, cardiac arrhythmia and urinary catecholamines », 1994.
- ⁸⁹ Evans G.W., Bullinger M. et Hygge S., "Chronic noise exposure and physiological response : a prospective study of children living under environmental stress." Psychological Science, n°9 (1), pp.75-77, 1998.
- ⁹⁰ Hygge S, Evans GW, Bullinger M 1996 « the Munich airport noise study : cognitive effects on children from before to after the change over airports
- ⁹¹ Evans G, Lercher P, Meis M, Ising H et Kofler W. “ Community noise exposure and stress children “ Journal of the Acoustical Society of America, 2001.
- ⁹² Babisch W, Ising H, Gallacher JE, “ Health status as a potential effect modifier of the relation between noise annoyance and incidence of ischaemic heart disease ” 2003.
- ⁹³ Kryter KD “Aircraft noise and social factors in psychiatric hospital admission rates”, 1990.
- ⁹⁴ Kawada T, Naganuma S, Kiryu Y, Suzuki S “ The effect of noise on sleep: changes in hypnograms of subjects exposed to repeated truck-passing sound ”, 1992.
- ⁹⁵ Schmeck K, Poustka F “ Psychological and psychiatric tests with children and adolescents in a low-altitude flight region ”, 1993.
- ⁹⁶ Stansfeld SA “ Noise sensitivity and psychiatric disorder: epidemiological and psychological studies ”, 1992.
- ⁹⁷ Tarnopolsky A., Watkins G. et Hand D.J., "Aircraft noise and mental health: I. Prevalence of individual symptoms", Psychol. Med, n°10 (4), pp.683-698, 1980.
- ⁹⁸ Abbey-Wickrama I, Brook MF « Mental hospital admission and aircraft noise », 1969.
- ⁹⁹ Cohen JM, Mosnier A, Abramowitch JM, Goldberg P « Etude épidémiologique des troubles anxio-dépressifs autour des aéroports », Paris INRETS 1999.
- ¹⁰⁰ Van Kamp et al – Internoise, Istanbul, août 2007.
- ¹⁰¹ Stansfeld S., Haines M. et Brown B., "Noise and health in the urban environment", Reviews on environmental health, n°15 (1-2), pp.43-82, 2000.
- ¹⁰² Haines M., Brentnall S.L., Stansfeld S. et KLineberg E., "Qualitative responses of children to environmental noise", Noise and Health, n°5 (19), pp.19-30, 2003.
- ¹⁰³ Bly S, Vlahovich S, Mclean J, Cakmak S “ Le bruit des avions civils à proximité des aéroports: effets sur la santé humaine ”, Santé Canada, 2001
- ¹⁰⁴ Knipschild P. et Oudshoorn N., "Medical effects of aircraft noise: drug survey", Int. Arch. Occup. Environ. Health, n°40 pp.197-200, 1977.
- ¹⁰⁵ Greiser E, Janhsen K, Greiser C « Nächlicher Fluglärm und Arzneimittelverbrauch », novembre 2006
- ¹⁰⁶ Muzet A « Le bruit nuit gravement à la santé », journal du CNRS n° 204 – janvier 2007.
- ¹⁰⁷ DORA (directorate of operational research and analysis) « Aircraft noise and sleep disturbance », 1980
- ¹⁰⁸ OMS, Le bruit, critère d'hygiène de l'environnement, OMS, n°12, 1980.
- ¹⁰⁹ Haines MM, Stansfeld SA, Job RF, Berglund B, Head J « A follow-up study of chronic aircraft noise exposure on child stress responses and cognition. 2001

- ¹¹⁰ Haines MM, Stansfeld SA, Job RF, Berglund B, Head J “ Chronic aircraft noise exposure, stress responses, mental health and cognitive performance in school children. 2001
- ¹¹¹ Lambert J., "La gêne due au bruit des transports terrestres", Revue Générale des Chemins de Fer, n° spécial bruit, novembre 2003.
- ¹¹² Faburel G, Chatelain F, Gobert J, Lévy L, Manola T, Mikiki F, Zagagh D « les effets des trafics aériens autour des aéroports franciliens", 2006
- ¹¹³ Moch A. et Maramotti I., "Les ambiances de la ville : du stress au confort", Pratiques psychologiques, n°17-24, 1995.
- ¹¹⁴ Guski R., "Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance", Noise Health, n°1 (3), pp.45-56, avril juin 1999.
- ¹¹⁵ Miedema H.M.E. et Vos H., "Demographic and attitudinal factors that modify annoyance from transportation noise", J. Acoust. Soc. Am., n°105 (6) juin 1999.
- ¹¹⁶ Mouret J, Vallet M “ Les effets du bruit sur la santé ” Ministère de la Santé, 1995
- ¹¹⁷ Vallet M, Vincent B, Olivier D « La gêne due au bruit des avions autour des aéroports », Ministère de l’Aménagement du territoire et de l’Environnement, Mission Bruit, 2000
- ¹¹⁸ « Impact sanitaire du bruit et de la pollution atmosphérique autour des zones aéroportuaires », rapport du groupe d’experts DRASS Ile-de-France, juin 2007.
- ¹¹⁹ Glass D.C. et Singer J.E., Urban stress. Experiments on noise and social stressors, Academic press, New York, 1972.
- ¹²⁰ Abel SM “ The extra-auditory effects of noise and annoyance: an overview of research ”, 1990.
- ¹²¹ Stansfeld S, Haines M, Head M “ Aircraft noise at school and child performance and health initial results from the west London schools study ” International Congress and Exhibition on noise control engineering, Nice august 2000
- ¹²² Berglund B « The nonauditory effects of noise on child development. In ‘Noise as a public Health problem’, Swedish Council for building Research, vol. 4, 425-453.
- ¹²³ OCDE « Portugal : des écoles bâties sur le modèle paysager : échec ou innovation », 2008.
- ¹²⁴ Kaufmann A « Le bruit est dérangeant stressant nuisible : état de la recherche sur les effets du bruit », journée contre le bruit 25 avril 2007.
- ¹²⁵ Le bruit est le facteur de mécontentement le plus couramment indiqué par les enseignants (Cellule Audition de Paris-Sud Orsay 2003)
- ¹²⁶ Sargent J. et al., "The disturbance caused to school teachers by noise", Journal of Sound and Vibration, n°70 (4), pp.557-572, 1980.
- ¹²⁷ Evans G.W., Bullinger M. et Hygge S “ A prospective study of some effects of aircraft noise on cognitive performance on schoolchildren. 2002
- ¹²⁸ Stansfeld SA, Haines MM, Head J, Job RF “ Multilevel modelling of aircraft noise on performance tests schools around Heathrow Airport London. 2002
- ¹²⁹ Shield B. et Dockrell J., Noise levels in London schools, <http://www.teachernet.gov.uk>, 2002.
- ¹³⁰ Regecova V, Kellerova E “ Effects of urban noise pollution on blood pressure and heart rate in preschool children ”, 1995
- ¹³¹ OMS, “ Résumé d’orientation des directives de l’OMS relatives au bruit dans l’environnement ”, Genève 2000
- ¹³² Lambert J. et Vallet M., Study related to the preparation of a communication on a future EC noise policy, prepared for DG XI, INRETS, LEN, n°9420, décembre 1994.
- ¹³³ Policy interpretation network for child health and environment. Rapport 2006. PINCHE, réseau financé par l’UE, a rassemblé et analysé les résultats scientifiques sur 4 thèmes, dont celui du bruit.
- ¹³⁴ Centre de Recherche sur l’Espace, les Transports, l’Environnement et les Institutions Locales
- ¹³⁵ Faburel G, Charre S, CRETEIL Université Paris XII « Effets des nuisances aériennes sur la scolarité et la santé des enfants » <http://www.saintprix.fr/media/media68064.pdf>
- ¹³⁶ Federal Interagency Committee on Aviation Noise (FICAN) 2000 « Position on research into effects of aircraft noise on classroom learning »

- ¹³⁷ Stansfeld SA, Berglund B, Clark C, Lopez-Barrio I, Fischer P, Ohrstrom E, Haine MM, 2005 « Road Traffic and Aircraft Noise Exposure and Children's Cognition and Health (RANCH)
- ¹³⁸ Crook M.A. et Langdon J., "The effects of aircraft noise around London airport", J Sound Vib, n°34 pp.221-232, 1974.
- ¹³⁹ Finitzo-Hieber I. et Tillman T., "Room acoustics effects on monosyllabic word discrimination abilities for normal and hearing-impaired children", Speech Hearing Research, n°21 pp.440-458, 1978.
- ¹⁴⁰ Billaud P., "Le bruit en milieu scolaire et ses conséquences", "Après-demain", pp.15-20, 1982.
- ¹⁴¹ Lukas J.S., Dupree R.B. et Swing J.W., "Effects of noise on academic achievement and classroom behavior", Office of Noise Control, Cal. Dept. of Health Services, FHWA/CA/DOHS-81/01, septembre 1981.
- ¹⁴² Moch A., Aspects psychologiques des stress de l'environnement, Paris VIII, Paris, 1987.
- ¹⁴³ Lehman G., Les effets du bruit sur les enfants à l'école, Rapport au Ministère de l'Environnement, 1981.
- ¹⁴⁴ Dumaurier E., Le bruit à l'école : de 5 à 7 ans, Ministère de l'Environnement, 1983.
- ¹⁴⁵ Evans G., Hygge S. et Bullingar M., "Chronic noise and psychological stress", Psychological Science, n°6 p333-338, 1995.
- ¹⁴⁶ Marth E, Gallasch E, Fueger GF, Mose JR " Aircraft noise: changes in biochemical parameters ", 1988.
- ¹⁴⁷ Babish W, Ising H, Gallacher JE, Sweetnam PM, Elwood PC « Traffic noise and cardiovascular risk » Arch Environ Health 1993
- ¹⁴⁸ « Rapport sur le thème du sommeil » Ministère de la Santé à Xavier Bertrand, décembre 2006.
- ¹⁴⁹ Babish W, Ising H, Kruppa B, Wiens D " The incidence of myocardial infarction and its relation to road traffic noise" 1994
- ¹⁵⁰ Bistrup M.L., "Prevention of adverse effects of noise on children", Noise and Health, n°5 (19), pp.59-65, 2003.
- ¹⁵¹ Karsdorf G. et Klappach H., "The influence of traffic noise on the health and performance of secondary school students in a large city", Zeitschrift für die Gesamte Hygiene, n°14 pp.52-54, 1968.
- ¹⁵² Serrou B., La protection des riverains contre le bruit des transports terrestres. Rapport au Premier Ministre, 15 avril 1995.
- ¹⁵³ Lambert J., "La gêne due au bruit des transports terrestres", Acoustique et Techniques, n°28 1er trimestre 2002.
- ¹⁵⁴ Lambert J., Quinet E. et Kail J.M., Evaluer les effets des transports sur l'environnement : le cas des nuisances sonores, Cadas, n°16, novembre 1999.
- ¹⁵⁵ Boiteux M., Transports : Choix des investissements et coût des nuisances. Rapport du Groupe de travail.Commissariat Général du Plan, La Documentation Française, Paris, 2001.
- ¹⁵⁶ Quin C., Duprez F. et Bourgis N., Compte national du transport de voyageurs (1998). Tome 2 : Les coûts externes du transport de voyageurs. Rapport au Ministre de l'Équipement, des Transports et du Logement, Ministre de l'Équipement, des Transports et du Logement, février 2001.
- ¹⁵⁷ Muzet A, Vallet M « Les prévisions concernant la gêne subjective, les effets physiologiques et les risques pour la santé des populations exposées aux bruit des avions dans le cadre du projet d'utilisation nocturne de l'aéroport de Strasbourg-Entzheim par l'entreprise DHL », rapport d'expertise 12 septembre 1996.
- ¹⁵⁸ Décret n° 95-408 du 18 avril 1995
- ¹⁵⁹ PPBE: Plan de Prévention du Bruit dans l'Environnement
- ¹⁶⁰ Rapport d'information sur la politique aéroportuaire, Assemblée nationale 2 juin 1999, Jean-Pierre Blazy, rapporteur
- ¹⁶¹ Décision n° 1786/2002/EC du 23 septembre 2002
- ¹⁶² Mouret J, Vallet M « Les effets du bruit sur la santé », Ministère de l'emploi et de la solidarité, 1999.
- ¹⁶³ Grange D, Chatignoux E, Grémy I « Les perceptions du bruit en Ile-de-France », mars 2009
- ¹⁶⁴ Site des Nations-unis : <http://www.un.org/french/ga/special/sids/agenda21>
- ¹⁶⁵ Vallet M., "Caractéristiques et indicateurs de la gêne due au bruit des avions", Synthèse INRETS, n°29, 1996.
- ¹⁶⁶ Griefahn B., "Noise control during the night", Acoust Austral., n°20 pp.43-47, 1992.
- ¹⁶⁷ Pearsons K., "Predicting noise-induced sleep disturbance", JASA, n°97 (1), pp.331-335, 1995.

- ¹⁶⁸ Friedmann J. et al., Effects of cessation of late night landing, report 132543, NASA, 1974.
- ¹⁶⁹ Netherland Organisation for Applied Scientific Research
- ¹⁷⁰ Passchier-Vermeer W. et al., Sleep disturbance and aircraft noise exposure, Exposure effects relationships, Report n°27, TNO, 2002.
- ¹⁷¹ Basner M. et al., Aircraft noise effects on sleep- Preliminary results on 64 subjects and 832 laboratory nights, 8th It Congress on Noise as a Public Health Problem, Rotterdam, De Jong et al editors, 2003.
- ¹⁷² Griffiths I. et Delauzun F., "The problem of the individual differences in sensitivity to traffic noise and the establishment of standards", R Applied Psychology, n°27 pp.19-31, 1978.
- ¹⁷³ Brink M, Wirth K, Schierz C « Effects of early morning aircraft overflights on sleep and implications for policy making », Proceedings of the congress Euronoise 2006, Tampere Finland.
- ¹⁷⁴ Fields JM « The relative effect of noise at different times of the day » NASA , 1986.