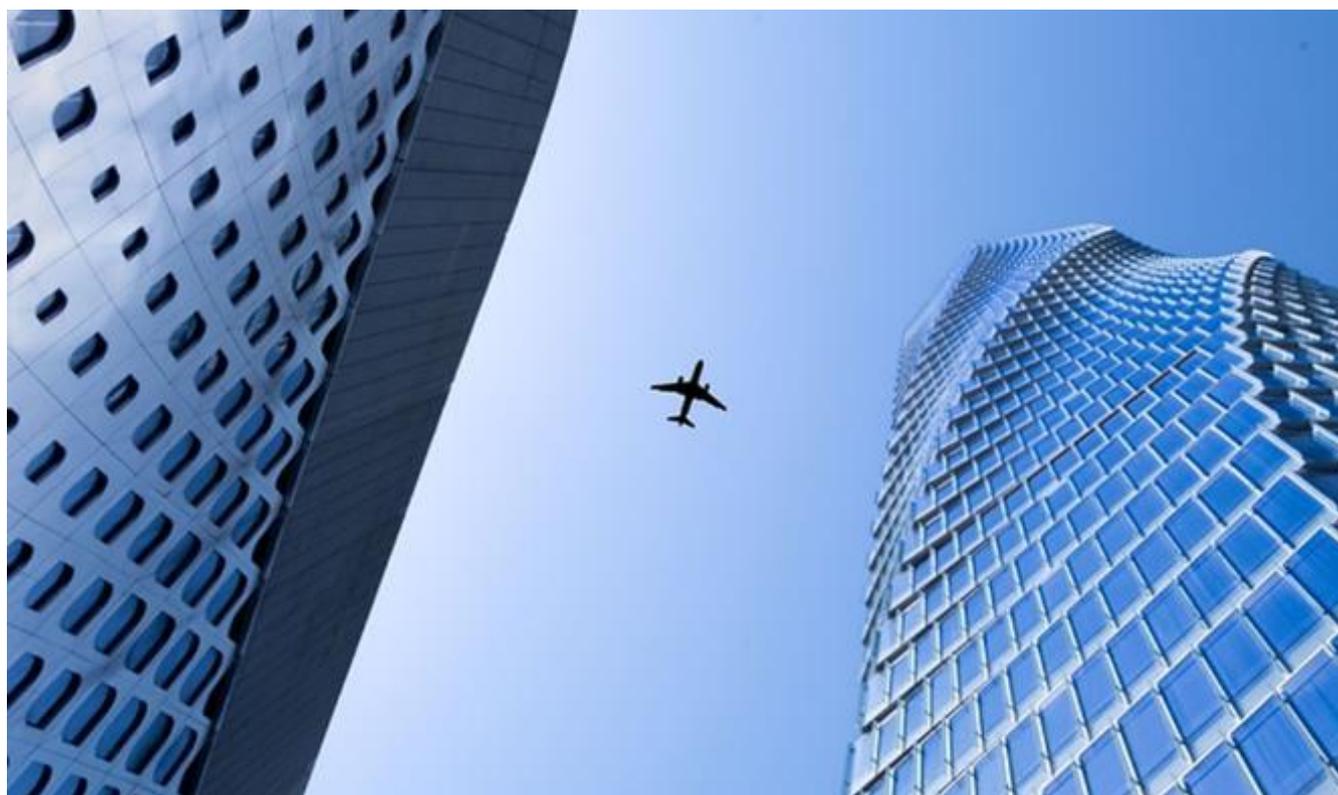


Accompagnement pour l'élaboration d'indicateurs acoustiques évènementiels du bruit des transports aériens



Rapport d'étude

Juin 2025

N° NOVA : 22-CE-0672

Le Cerema est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires, présent partout en métropole et dans les Outre-mer grâce à ses 26 implantations et ses 2 400 agents. Détenteur d'une expertise nationale mutualisée, le Cerema accompagne l'État et les collectivités territoriales pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires par l'élaboration coopérative, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport.

Doté d'un fort potentiel d'innovation et de recherche incarné notamment par son institut Carnot Clim'adapt, le Cerema agit dans 6 domaines d'activités : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

Site web : www.cerema.fr

Accompagnement pour l'élaboration d'indicateurs acoustiques évènementiels du bruit des transports aériens

Commanditaire : ACNUSA

Auteur :

Responsable du rapport

Laure-Anne CHAMBOREDON – Département Territoires et Transition – Unité Environnement

Tél. : +33 (0)1 59 44 44 33

Courrier : laure-anne.chamboredon@cerema.fr

DTerCE/DTT/E

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
Initiale	Décembre 2023	Remise à l'ACNUSA pour commentaires
V1	Juillet 2024	Prise en compte des remarques de l'ACNUSA + avancement de la rédaction
V2	Octobre 2024	Prise en compte des remarques de l'ACNUSA + avancement de la rédaction
V3	Janvier 2025	Prise en compte des remarques de l'ACNUSA + avancement de la rédaction
V4	Juin 2025	Prise en compte des remarques de l'ACNUSA + avancement de la rédaction
V5	Juillet 2025	Prise en compte des remarques de l'ACNUSA + avancement de la rédaction

Références

N° d'affaire : 22-CE-0672

Partenaires : ACNUSA

Devis n°xxxxx

Nom	Service	Rôle	Date	Visa
CHAMBOREDON Laure-Anne	CEREMA CE/DTT/E	Auteur principal		
OLNY Xavier	CEREMA CE/DTT/E	Co-auteur		
ANZIVINO Lucie	CEREMA CE/DTT/E	Contributeur		
BARBEAU Romain	ACNUSA	Relecteur		
MICHELOT Nicolas	ACNUSA	Relecteur		
VINCENT Bruno	ACNUSA	Relecteur		

Contributions particulières :

Le Cerema remercie les observatoires de l'environnement sonore : Acoucité, Bruitparif ; ainsi que les gestionnaires d'aéroports pour leurs contributions (fournitures de données et rapports d'études), qui ont permis d'enrichir le présent rapport.

Statut de communication de l'étude

Les études réalisées par le Cerema sur sa subvention pour charge de service public sont par défaut indexées et accessibles sur le portail documentaire du Cerema. Toutefois, certaines études à caractère spécifique peuvent être en accès restreint ou confidentiel. Il est demandé de préciser ci-dessous le statut de communication de l'étude.

Accès libre : document accessible au public sur internet

Accès restreint : document accessible uniquement aux agents du Cerema

Accès confidentiel : document non accessible

Cette étude est capitalisée sur la plateforme documentaire [CeremaDoc](#), via le dépôt de document : <https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx>

Table des matières

Introduction	9
Partie 1. Le bruit du trafic aérien.....	11
1.1 La génération et la propagation du bruit d'avions.....	11
1.1.1 Le bruit d'avion pour les riverains éloignés des aéroports ou sous les couloirs de vol.....	12
1.1.2 Le bruit d'avion pour les riverains proches des aéroports.....	12
1.1.3 Fonctionnement et émissions acoustiques d'un moteur d'avion	12
1.1.4 Les composantes acoustiques principales du bruit moteur.....	13
1.1.5 Caractéristiques du bruit moteur en fonction des technologies : turbojet, turbofan, turboprop.....	15
1.1.6 Le bruit aérodynamique (hors moteurs)	16
1.1.7 La propagation vibro-acoustique du bruit d'avions.....	17
1.1.8 Dispositifs de protections sur le chemin de propagation	20
1.2 De la source au récepteur : quelques exemples de bruit d'avions mesurés au sol	23
1.3 Perspectives : évolution du trafic aérien, nouvelles technologies de réduction du bruit.....	26
1.3.1 Projections d'évolution du trafic aérien et conséquences sur l'environnement sonore	26
1.3.2 Recherche et développement sur les technologies de réduction du bruit.....	29
1.4 Synthèse de la Partie 1.....	30
Partie 2. La perception et les effets sanitaires du bruit par et sur l'Homme	31
2.1 La perception du bruit des avions.....	31
2.1.1 Les verbalisations.....	31
2.1.2 Les basses fréquences dans le bruit aérien.....	32
2.2 Quelques généralités sur la perception humaine	33
2.2.1 Les dimensions perceptives.....	33
2.2.2 Les pondérations acoustiques	33
2.2.3 La perception des basses fréquences.....	34
2.3 Le modèle de stress.....	36
2.3.1 La phase d'alarme.....	36
2.3.2 La phase de résistance.....	37
2.3.3 La phase d'épuisement.....	37
2.3.4 Synthèse.....	38
2.4 Les effets sanitaires du bruit	38
2.5 Résultats d'études sanitaires internationales.....	40
2.5.1 Recommandations établies par le Department of Defense des États-Unis (2009) pour le bruit aérien militaire 40	
2.5.2 Avis de l'Anses sur les effets extra-auditifs du bruit environnemental (2013)	40
2.5.3 Les lignes directrices OMS (2018) (WHO, 2018)	43
2.5.4 Synthèse des connaissances scientifiques concernant les effets sur la santé liés à l'exposition au bruit issu du trafic aérien " (Anses, 2020).....	45
2.5.5 Programme de recherche DEBATS : " Discussion sur les Effets du Bruit des Aéronefs Touchant la Santé " (octobre 2020).....	46

2.5.6	Mise à jour des coefficients d'incapacité pour les états de santé (2024)	48
2.6	L'influence des facteurs non-acoustiques.....	50
2.6.1	Influence des facteurs démographiques.....	50
2.6.2	Influence des facteurs d'attitude	51
2.6.3	Influence des facteurs situationnels	52
2.7	Synthèse de la Partie 2	53
Partie 3.	Métriques, Indicateurs, Indices pour le bruit	55
3.1	Sémantique et processus d'élaboration d'indicateurs et d'indices.....	55
3.2	Une classification des indicateurs/indices en fonction de la grandeur caractérisée.....	57
3.3	Synthèse de la classification des indicateurs en fonction de la grandeur caractérisée.....	58
3.4	Indicateurs réglementaires et dispositifs complémentaires d'observation de l'environnement sonore	61
3.4.1	Les spécificités acoustiques des aéronefs utilisés : EPNL en PndB et l'exploitation des plateformes aéroportuaires	61
3.4.2	L'exposition au bruit environnemental en phase d'exploitation.....	64
3.5	Norme NF S 31-190 : descripteurs acoustiques et du trafic mesurés	72
3.6	ISO 20906 :2009 : surveillance automatique du bruit des aéronefs au voisinage des aéroports.....	73
3.7	Modélisation du bruit aérien	73
3.7.1	Contexte	73
3.7.2	Principes de la modélisation du bruit des aéronefs.....	74
3.7.3	Modélisation du bruit aérien : ce qu'il faut retenir	80
3.8	Synthèse de la Partie 3	81
Partie 4.	Données exploitées dans le cadre du groupe de travail sur les indicateurs de pic de bruit aérien.....	87
4.1	Jeux de données exploités par le Cerema	87
4.1.1	Les indicateurs retenus par le groupe de travail pour caractériser les événements de bruit d'avion..	87
4.1.2	Jeu de données n°1 : un seul aéroport, 15 jours de mesures consécutives	88
4.1.3	Jeu de données n°2 : plusieurs aéroports.....	117
4.1.4	Jeu de données n°3 : un aéroport, événements identifiés sur une année complète	118
4.1.5	Éléments d'interprétation.....	119
4.2	Les travaux de BruitParif sur les indicateurs événementiels et sur les indicateurs agrégés.....	119
4.2.1	Les indicateurs retenus par BruitParif pour caractériser les événements de bruit d'avion	120
4.2.2	Les indicateurs agrégés horaires retenus par BruitParif pour caractériser l'exposition au bruit d'avion 120	
4.2.3	Les indicateurs agrégés journaliers retenus par BruitParif pour caractériser l'exposition au bruit d'avion 120	
4.2.4	Résultats et éléments d'interprétation de l'étude BruitParif	121
4.3	Synthèse de la Partie 4	122
Partie 5.	Propositions et perspectives	123
5.1	Constats	123
5.2	Retour d'expérience : travaux réglementaires sur les " pics de bruit " ferroviaires	124
5.2.1	Rappel du contexte des travaux relatifs à l'article 90 de la Loi d'Orientation des Mobilités.....	124
5.2.2	Rappel et commentaires à propos des indicateurs événementiels introduit dans l'arrêté du 29/09/2022	

5.2.3	Analogies et distinctions entre les problématiques de pics de bruit " ferroviaires " et " aériens " ...	127
5.3	Propositions d'indicateurs complémentaires	128
5.4	Recommandations pour améliorer la caractérisation du bruit aérien	130
5.4.1	Recommandation n°1 : Préciser le besoin	130
5.4.2	Recommandation n°2 : Présentation/représentation des indicateurs	137
5.4.3	Recommandation n°3 : Indicateurs exclus des discussions du GT : à explorer avec des mesures <i>ad hoc</i>	142
5.4.4	Recommandation n°4 : Mieux prendre en compte les facteurs non-acoustiques dans l'exposition au bruit	142
5.4.5	Recommandation n°5 : Développement d'une application de recueil des plaintes	143
Partie 6.	Annexes	144
Annexe 1.	Découpage du Domaine Fréquentiel.....	144
Annexe 2.	Formule et définition des indicateurs.....	146
Annexe 3.	Synthèse des effets sanitaires dus au bruit d'avion	150
Annexe 4.	Les différents types d'études sanitaires et quelques statiques	155
Annexe 5.	Tableaux de corrélations.....	158
Annexe 6.	" Exploitation des données du réseau permanent de mesure du bruit aérien en Île-de-France "	161
Annexe 7.	Canevas de la méthode d'évaluation des impacts sanitaires proposée par (Anses, 2013)	162
Annexe 8.	Propositions de représentations sur le jeu de données n°3	164
Annexe 9.	Bibliographie.....	166

Figure 1 : Les parties du présent document représentées aux différent(e)s étapes/phénomènes se déroulant entre la génération du bruit et sa mesure par un indicateur	10
Figure 2 : Schéma d'un moteur d'avion de type turbojet.....	13
Figure 3 : Schéma d'un moteur avec une conduite de dérivation, de type turbofan	13
Figure 4 : Identification spectrale des sources sonores d'un moteur d'avion de type turbofan	15
Figure 5 : Représentation schématique du spectre (niveau de pression noté SPL – Sound Pressure Level – en fonction de la fréquence) et des contributions de chaque source pour un moteur d'avion de type “ turbofan “ - Source : (Leishman, 2022)	15
Figure 6: Comparaison des spectres mesurés pour trois technologies de moteur :	16
Figure 7 : À gauche : éléments à la surface d'un avion, responsables de bruit aérodynamique. À droite : exemple de carte de localisation des sources de bruit lors du survol d'un avion lors d'essais en vol (échelle non disponible).	17
Figure 8 : Coefficient d'absorption atmosphérique en fonction de la fréquence	17
Figure 9 : à gauche : illustration du phénomène de réfraction vers le haut en condition de gradient de température négatif (Naylor, 2021) ; à droite : courbure des rayons sonores à partir du point source (l'avion) : vers le haut, au vent ; vers le bas, sous le vent(Naylor, 2021) (Kapoor et al., 2021).....	18
Figure 10 : A gauche : illustration schématique de l'effet de sol. A droite : conséquence de l'effet de sol en termes d'atténuation sur le niveau de pression acoustique reçu. Les fluctuations positives ou négatives de l'atténuation résultent des interférences destructives ou constructives, selon la fréquence considérée. Source : (Campos et al., 2022).....	18
Figure 11 : A gauche : exemple de mesure d'un isolement de façade (bleu) comparé aux courbes de référence (verte et rouge) servant à la détermination de la valeur d'isolement normalisée ; A droite, rappel des exigences d'isolement selon la réglementation acoustique en vigueur. Source : à gauche, (GuidEnR HQE., 2025), à droite, (placo, 2022).....	19
Figure 12: Identification de la nature du bâti sur la ville de Lyon mise en regard des réglementations acoustiques et thermiques (projet Baobat). Le croisement de différentes bases de données, dont les données foncières (DGFIP), ont permis d'établir une typologie constructive des bâtiments et de la mettre en regard des évolutions des réglementations acoustiques et thermiques. Une hiérarchisation à grande échelle des bâtiments présentant potentiellement une vulnérabilité vis-à-vis des nuisances sonores peut ainsi être établies (à confirmer par la connaissance locale du parc bâti).	20
Figure 13 : En haut : principe de fonctionnement d'un écran acoustique. En bas : mur (à gauche) et merlon végétalisé (à droite) anti-bruit autour d'aéroports japonais.....	21
Figure 14 : Murs anti-bruit pour la réalisation des essais moteurs au sol, sur l'aéroport d'Heathrow	21
Figure 15 : Hangar isolé acoustiquement pour la réalisation des essais moteurs au sol sur l'aéroport de Zurich.....	21
Figure 16 : Zone verte tampon, créée autour d'un aéroport japonais dans une zone classe 3 (Lden > 76 dB) où les habitants ont été relocalisés	22
Figure 17 : Buitenschot Land Art Park	23
Figure 18 : Principe de fonctionnement du Buitenschot Land Art Park et dimensions des aménagements	23
Figure 19 : Illustration des caractéristiques d'un bruit d'avion	24
Figure 20 : Exemple de sonagramme d'un bruit d'avion au décollage.....	25
Figure 21 : Niveau de pression sonore d'un B747, mesuré le 28/05/2004, à 17:44.	25
Figure 22 : Niveau de pression sonore d'un A330, mesuré le 29/02/2004, à 14:37.	25
Figure 23: Évolution des normes ICAO pour les avions depuis 1973 en EPNdB.....	26
Figure 24 : Illustration de l'historique de croissance du volume de passagers et de fret transportés par le transport aérien depuis 1944 et des perspectives de croissance à 2050. Source : (ICAO, 2024).....	27
Figure 25: Prévision de croissance du trafic aérien en Europe entre 2019 et 2050.....	27
Figure 26: Estimation de la croissance moyenne annuelle du nombre de vols (2024-2050), périmètre ECAC.....	28
Figure 27: Evolution de la composition de la flotte européenne de 1990 à 2040 selon le niveau EPNdB et l'entrée en vigueur des chapitres 3 à 14. A gauche, chaque point représente un modèle d'avion; à droite les données sont cumulées par catégories pour la période 2004-2024. Source : (European Environment Agency, 2025)	28
Figure 28: Evolutions des niveaux de bruit enregistrés par le réseau de surveillance acoustique de l'aéroport de Lyon-Saint-Exupéry.....	29
Figure 29: Programmes nationaux de recherches sur les technologies de réduction du bruit en 2021 (ICAO, 2021).....	29
Figure 30 : Lignes isosoniques normales selon la norme ISO 226 :2003.	34
Figure 31: Pondérations A, B, C et D applicables aux niveaux de pression acoustique selon la norme CEI 61672-1	34
Figure 32 : Courbes de Nakamura et Tokita (1981) définissant les sensations associées à des basses fréquences et à des niveaux sonores.....	35
Figure 33 : Les 3 phases du stress	36
Figure 34 : Effets du stress sur l'organisme.....	38
Figure 35 : Nuage de points des données de réponse des 12 études incluses dans l'ensemble de données utilisées par l'OMS pour établir ses recommandations. En ordonnée, le % de personnes se déclarant très gênées vs le niveau d'exposition en	

<i>Lden</i> . La taille des “ points ” est proportionnelle au nombre de répondants.	44
Figure 36: Relations exposition-réponse établies dans le cadre du projet DEBATS et comparée à celle proposées par l'OMS en 2018 et de (Miedema and Oudshoorn, 2001).	48
Figure 37 : Courbes dose-réponse en considérant la sensibilité au bruit pour le bruit aérien, routier et ferroviaire en fonction du <i>Lden</i> , avec les intervalles de confiance à 95%.	52
Figure 38: Modèle de la gêne sonore évalué à partir des données de l'enquête in situ.	53
Figure 39 : Illustration de la relation entre données, indicateurs, indices et leurs (Wu and Wu, 2012).	56
Figure 40 : Position des points de mesure fixes autour de l'aéroport de Munich et zone de protection jour/nuit	63
Figure 41 : Plan d'Exposition au Bruit autour des aéroports parisiens	65
Figure 42 : Plan de gêne sonore autour de Lyon Saint-Exupéry	65
Figure 43: Evolution de l'IGMP et des énergies sonores évalués entre 2013 et 2023. (DGAC, 2023).	66
Figure 44: Plateforme d'information SURVOL Bruitparif (https://survol.bruitparif.fr/aerial).	66
Figure 45: Exemple de représentations d'indicateurs agrégés et événementiels accessibles sur la plateforme SURVOL Bruitparif.	66
Figure 46: Cartographies de la co-exposition Air-Bruit en Auvergne-Rhône-Alpes. <i>Orhane.fr</i>	67
Figure 47: Cartographies de la co-exposition Air-Bruit en Ile-de-France.	68
Figure 48 : Carte de l'exposition au bruit aérien aux États-Unis d'Amérique en 24-hr LAeq	68
Figure 49 : Carte de l'exposition au bruit aérien autour de Chicago en 24-hr LAeq.	69
Figure 50 : Exemple de représentation des causes des plaintes pour gêne (aéroport de Reagan-Dulles)	69
Figure 51 : Carte de l'exposition au bruit aérien autour de de l'aéroport de Melbourne pour le bruit aérien en ANEF.	70
Figure 52 : Carte de l'exposition sonore autour de l'aéroport de Melbourne pour le bruit aérien en NA	70
Figure 53 : Carte de l'exposition sonore autour de l'aéroport de Sydney pour le bruit aérien en L_{Amax} pour un B777-300ER de jour	71
Figure 54 : Carte de l'exposition sonore autour de l'aéroport de Leduc pour le bruit aérien en NEF.	72
Figure 55: Etapes de modélisation du bruit aérien	75
Figure 56: Exemple de traces radars individuelles enregistrées pendant la phase de décollage (à gauche), et traces “moyennes” avec occurrence (%) exploitées pour la modélisation.	75
Figure 57: Exemple de données NPD (Noise Power Distance) issues de la base ANP.	76
Figure 58: Segmentation d'une trajectoire de vol (en haut : dans le plan horizontal, en bas dans plan vertical).	77
Figure 59: Illustration des différences de positionnement des courbes isophones calculées à partir : en haut : des paramètres de vol réel ; en bas : de l'approche “balance motion” (résolution de l'équation de mouvement NPD).	78
Figure 60: Correction de la directivité latérale en fonction du type de montage des moteurs	78
Figure 61: Diagramme de directivité des moteurs d'avion.	79
Figure 62 : Position des 5 stations de mesure autour de l'aéroport étudié pour le jeu de données n°3	118
Figure 63 : Exemples de représentation des NAX_LAeq,1s,max (gauche) et de la distribution du nombre de LAeq,1s,max (droite), pour des événements ferroviaires, pour les trois périodes jour, soir, nuit, par pas de 2dB.	127
Figure 64 : Proportion annuelle du nombre d'événements en fonction de la durée et de l'allure de l'avion autour de l'aéroport du jeu de données n°3 sur l'année 2024.	138
Figure 65 : Répartition des durées des moments de répit le 22/03/2024, jour où le plus d'avions ont été enregistrés sur la station n°2.	139
Figure 66 : Distribution annuelle des L_{Amax} mesurés pour les événements enregistrés sur chaque station de mesure.	139
Figure 67 : Distribution annuelle des LLF mesurés pour les événements enregistrés sur chaque station de mesure	140
Figure 68 : Proportion sur l'année 2024 du nombre d'événements dont le L_{Amax} est supérieur au niveau donné en abscisse	140
Figure 69 : Nombre d'événements par station pour chaque jour de juin 2024.	141
Figure 70 : Contour du LAeq,1h,55dB autour de l'aéroport d'Heathrow (UK).	142
Figure 71 : Application de recueil des plaintes mise en place par les aéroports Reagan National (DCA) et Dulles International (IAD).	143
Figure 72: Représentation des bandes de Bark.	145

Tableau 1: Critères définis par des pays européens pour l'identification d'un problème de basses fréquences. Les niveaux sonores supérieurs à ces critères constituent un problème de basses fréquences.....	35
Tableau 2 : Effets sanitaires critiques et indicateurs associés considérés par l'OMS.....	39
Tableau 3 : Effets sanitaires importants et indicateurs associés considérés par l'OMS.....	39
Tableau 4 : Effets sanitaires immédiats retenus et niveaux de bruit seuils associés (Issu de (Anses, 2013)).....	42
Tableau 5 : Effets sanitaires associés à une exposition chronique au bruit retenus et niveaux de bruit seuls associés (Issu de (Anses, 2013)).....	42
Tableau 6 : Seuils de niveaux sonores retenus pour les indices acoustiques intégrés.....	42
Tableau 7 : Seuils de niveaux sonores retenus pour les indices acoustiques événementiels.....	43
Tableau 8 : Niveau de preuve des données probantes sur les résultats de santé prioritaires (WHO, 2018).....	45
Tableau 9 : Coefficients d'incapacité pour les 3 effets sanitaires retenus pour l'évaluation des impacts.....	49
Tableau 10 : Caractéristiques des indicateurs, classés par famille	59
Tableau 11 : Exemples d'aéroports appliquant une taxe en fonction du bruit.....	64
Tableau 12 : Grandeur caractérisée par les indicateurs, leur utilisation et leur caractère mesurable ou modélisable	83
Tableau 13 : Répartition des événements par jour et par type d'avion - Jeu de données n°1.....	88
Tableau 14 : Force de la corrélation en fonction de la quantité de r	88
Tableau 15 : Coefficients de corrélations entre indicateurs événementiels - Jeu de données n°1	117
Tableau 16 : Coefficients de corrélations entre indicateurs événementiels - Jeu de données n°2	118
Tableau 17 : Coefficients de corrélations entre indicateurs événementiels - Jeu de données n°3	119
Tableau 18: Proposition de liste réduite d'indicateurs événementiels à retenir pour l'évaluation du bruit ferroviaire, en plus des indicateurs réglementaires actuels.....	126
Tableau 19: Liste restreinte des indicateurs d'événement et agrégés pour le bruit aérien à considérer dans une phase d'expérimentation. En police " normal " : les métriques déjà proposées dans la norme NF S 31-190 ; En " italique " : les métriques avec limites d'utilisation ou à caractère expérimental, en " gras " : les propositions issues de la présente étude.	130
Tableau 20 : Transposition de la mise en place d'un système de suivi/évaluation pour la recherche d'indicateurs pour le bruit aérien La colonne de gauche cite en intégralité la démarche proposée par (Centre de ressources en évaluation, 2025), la colonne de droite en propose une transposition pour la recherche d'indicateurs pour le bruit aérien.	131
Tableau 21 : Valeurs guides pour les études environnementales (niveaux extérieurs).....	137
Tableau 22 : Bandes d'octave et de tiers d'octave (en Hz).....	144
Tableau 23 : Bandes de Bark.....	144

Le bruit des transports constitue la principale source (66,5%) pesant dans le coût social attribué à cette nuisance environnementale (Source : (ADEME, 2021)). La part des nuisances sonores liée au transport aérien en France, a été estimée à près de 16 milliards d'euros par an (4.1% du coût total). Cette évaluation résulte des impacts sanitaires et économiques affectant les populations exposées : gêne, impact sur le sommeil, troubles cognitifs, sur-risque de pathologies cardiovasculaires, augmentation de la consommation de médicaments, perte de productivité, dépréciation immobilière...

La mobilisation sociétale récente, autour notamment de la mise en service de nouvelles infrastructures ferroviaires à grande vitesse, a amené le législateur à renforcer le dispositif réglementaire français en matière de bruit dans l'environnement. L'article 90 de la Loi d'Orientation des Mobilités (2019), a ainsi prévu que soient introduits, par arrêté, des " *indicateurs de gêne due au bruit des infrastructures de transport ferroviaire qui prennent en compte des critères d'intensité des nuisances ainsi que des critères de répétitivité, en particulier à travers la définition d'indicateurs de bruit événementiel tenant compte notamment des pics de bruit* ". Après 3 ans de travaux, mobilisant l'avis du Conseil National du Bruit, les gestionnaires d'infrastructures et le Cerema, un arrêté d'expérimentation a été publié le 29 septembre 2022 pour évaluer la pertinence et la faisabilité d'application des indicateurs et modifications réglementaires proposés.

Au cours de ces travaux, l'intérêt de mener une démarche similaire pour le bruit aérien a été relevé au sein du CNB. En effet, le bruit aérien présente, tout comme le bruit ferroviaire, un caractère événementiel, contrairement au bruit routier des grandes infrastructures. En accord avec la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR), l'Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires (ACNUSA) a proposé qu'un groupe de travail (GT) soit mis en place à cette fin. L'objectif principal de ce GT est de proposer une liste d'indices/indicateurs susceptibles d'être testés dans le but de :

- suivre les évolutions de l'activité aéroportuaire ;
- servir à une meilleure information/communication auprès des populations riveraines ;
- être le plus facilement compréhensibles et appropriables par les différentes parties prenantes (acteurs aériens, riverains, services de l'Etat...).

L'ACNUSA, en tant qu'autorité administrative indépendante, est chargée de contrôler l'ensemble des dispositifs de lutte contre les nuisances générées par le transport aérien et le secteur aéroportuaire. Elle peut émettre des recommandations sur toute question relative aux nuisances environnementales sur et autour des aéroports. Elle doit également satisfaire à un devoir d'information et de transparence notamment vis-à-vis des riverains.

Parmi ses missions, l'Autorité de contrôle est un organe prescripteur en matière de bruit. Elle élabore des prescriptions techniques s'agissant des indicateurs de mesures des émissions et des nuisances et des dispositifs de surveillance, en conformité avec les règles internationales, communautaires et françaises.

L'ACNUSA a sollicité le Cerema pour que celui-ci participe à ce groupe de travail et réalise des travaux préparatoires destinés à orienter et justifier les propositions qui seront faites par le GT. Ainsi, l'ACNUSA a souhaité disposer, en parallèle et pour consolider les propositions du GT, des éléments suivants :

- 1) une analyse bibliographique des connaissances et un " *benchmark* " des pratiques européennes et internationales en matière d'indicateurs acoustiques du bruit aérien ;
- 2) une analyse et synthèse des connaissances actuelles des effets sanitaires du bruit lié au transport aérien ;
- 3) une proposition d'indicateurs et du dispositif d'évaluation opérationnel qui devrait être mis en place

Le présent document rend compte de ces travaux, à savoir la bibliographie et les synthèses réalisées pour alimenter les discussions du GT, les calculs d'indicateurs réalisés par le Cerema d'une part et par BruitParif d'autre part, ainsi que des propositions du Cerema pour un ou des indicateur(s) du bruit événementiel aérien, suite aux discussions du GT. BruitParif, participant du GT, gère un réseau de stations de mesure du bruit aérien en région parisienne, à proximité des 3 aéroports franciliens. L'association a mis à disposition des données permettant le calcul d'indicateurs événementiels et d'indicateurs agrégés sur des périodes de temps plus long, ce qui a permis le calcul d'indicateurs complémentaires, présentés dans ce document.

Afin d'illustrer les parties du présent document qui décrivent les différent(e)s étapes/phénomènes se déroulant entre la génération du bruit et sa mesure par un indicateur, la Figure 1 présente :

- Dans les rectangles bleus, les objets mesurables,
- Dans les rectangles orange, les grandeurs mesurées,
- Dans les flèches blanches, les liens entre objets mesurables ou entre objet mesurable et grandeur mesurée,
- Dans les nuages bleu clair, les parties du rapport qui décrivent l'étape/le phénomène.

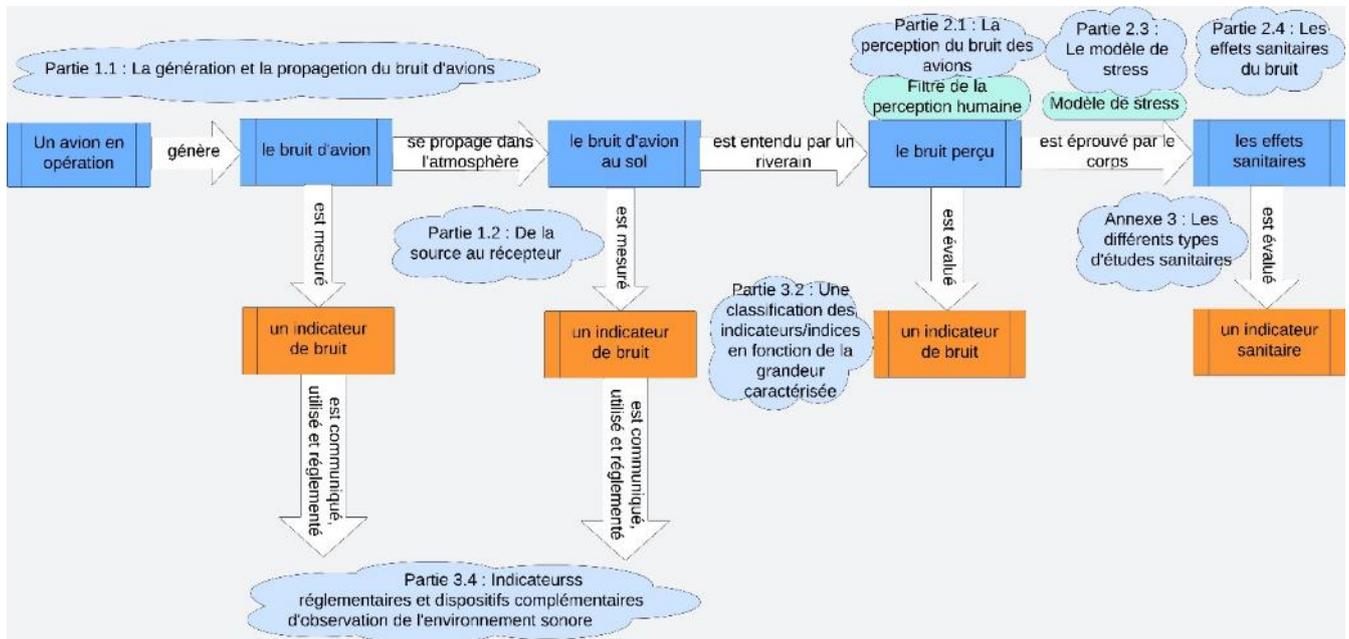


Figure 1 : Les parties du présent document représentées aux différent(e)s étapes/phénomènes se déroulant entre la génération du bruit et sa mesure par un indicateur

Ainsi, la Partie 1 présente le bruit des avions, de sa génération à sa propagation dans l'atmosphère jusqu'à son récepteur, jusqu'à sa mesure par un appareil de mesure. Des perspectives sur l'évolution des trafics sont également dressées. On se limite ici au bruit des avions dits " commerciaux ".

La Partie 2 présente la perception et les effets sanitaires du bruit par et sur l'Homme. Ainsi, sont présentés les mécanismes de la perception permettant de recenser les principales dimensions acoustiques du bruit aérien retenues par les riverains lors de l'expression de leur ressenti. De plus, le bruit perçu peut être considéré comme un agent agresseur pour le corps humain. Des réactions physiologiques de réponse au stress (sécrétions hormonales, vasoconstriction, ...) vont ainsi avoir lieu afin de permettre au corps de lutter contre cet agent stressant. Ces réactions peuvent ensuite avoir des conséquences sanitaires de long terme sur l'organisme. Le lien entre le bruit et ses effets sanitaires, auditifs ou extra-auditifs, a fait l'objet de nombreuses études épidémiologiques (cf. Annexe 3). La force du lien constitue un point d'intérêt particulier dans l'examen d'indicateurs pertinents.

La Partie 3 définit dans un premier temps la sémantique employée dans ce rapport (métrique/indicateur/indice). Dans un second temps, les différents indicateurs, événementiels ou journaliers, utilisés pour décrire le bruit, sont présentés en fonction de la grandeur caractérisée. Des exemples de l'utilisation de ces indicateurs appliqués au bruit aérien sont également donnés. Enfin, un état de l'art des pratiques de modélisation du bruit aérien et des indicateurs évaluables est dressé.

Par ailleurs, l'objectif du groupe de travail étant de mieux caractériser le bruit aérien, dans chaque partie, les indicateurs pouvant être mis en lien avec la dimension acoustique ou l'effet présenté(e) sont indiqués en **bleu, gras, surligné**. Pour plus de détails sur ces indicateurs, le lecteur pourra se référer à la quatrième partie de ce rapport ainsi qu'à l'Annexe 2.

La Partie 4 présente les travaux réalisés par le Cerema d'une part et par BruitParif d'autre part pour alimenter les discussions du groupe de travail. Ces travaux ont consisté en des calculs d'indicateurs événementiels pour le Cerema et des calculs d'indicateurs journaliers pour BruitParif afin de sélectionner des indicateurs complémentaires pour tenter de mieux caractériser le bruit d'avion.

La Partie 5 présente les conclusions des travaux relatifs aux " pics de bruit " ferroviaire et dresse les conclusions des présents travaux.

Le bruit émis par le trafic aérien dépend de nombreux facteurs. D'après (Pueh Lee et al., 2022), les principaux facteurs sont :

- le type d'avion et sa motorisation ;
- sa configuration de vol (survol, décollage ou atterrissage) ;
- les procédures de contrôle des volets et de la vitesse ;
- la distance du sol aux différentes voies d'approche ;
- la topographie et la météorologie locales.

Le bruit perçu au sol est caractérisé par :

- son niveau sonore ;
- son évolution temporelle ;
- et son contenu spectral.

Rappel théorique :

Définition du "bruit" d'après (Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales, 2012a) : "Ensemble de sons, d'intensité variable, dépourvus d'harmonie, résultant de vibrations irrégulières."

Définition d'un "son" d'après (Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales, 2012b) : "Mouvement vibratoire, périodique ou quasi-périodique, simple ou composé, de fréquence fondamentale et de timbre déterminé, consistant en une perturbation dans la pression, la contrainte, le déplacement ou la vitesse des ondes matérielles qui se propagent ensemble ou isolément dans un milieu élastique, et capable de provoquer une sensation auditive."

Ainsi, lors de la mesure d'un son dans l'environnement au moyen d'un sonomètre, la grandeur mesurée est l'écart instantané de pression (habituellement appelé pression acoustique). Il convient de rappeler que les variations de pression atmosphérique (météorologique) sont de l'ordre de 16 000 Pa (Pascal) tandis que les fluctuations de pression acoustique sont comprises entre $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (seuil d'audibilité) et 200 Pa (seuil de douleur). Le domaine de variation des pressions acoustiques est donc très vaste, ce qui explique l'utilisation de l'échelle logarithmique (cf. (Potel and Bruneau, 2006)) : ainsi, la pression acoustique instantanée $p_a(t)$ est mesurée en Pa, alors que le niveau sonore $L(t)$ est mesuré en dB (décibel), suivant la formule suivante : $L(t) = 10 \times \log_{10} \left(\frac{p_a(t)^2}{p_0^2} \right)$ avec $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Le caractère vibratoire d'un bruit peut être décomposé en la somme de mouvements élémentaires de fréquence pure et la projection d'un signal dans le domaine spectral (par transformation de Fourier par exemple) complète utilement la description temporelle. Le domaine audible s'étend d'environ 20 Hertz (Hz) à 20 kHz. A nouveau, le domaine de variation des fréquences audibles est vaste. Par conséquent, il est possible d'exprimer le spectre d'un son en bandes fines ou en regroupant l'information par bandes de fréquence, couramment en bandes d'octave ou de tiers d'octave normalisées (cf. Annexe 1).

Afin de mieux appréhender le lien entre le bruit émis par l'avion et celui perçu au sol par les riverains d'aéroport (et donc de mieux évaluer la pertinence d'indicateurs), les mécanismes de génération et de propagation sont présentés ci-après.

1.1 La génération et la propagation du bruit d'avions

La problématique du bruit généré par le trafic aérien commercial se distingue de celle des infrastructures de transports terrestres par des enjeux principalement localisés dans le périmètre (quelques kilomètres) des aéroports. Elle est liée d'une part à l'activité aéroportuaire elle-même, au niveau du sol, et d'autre part à la proximité relative des aéronefs lors des phases de décollage, d'atterrissage, de descente/montée, ou d'approche. Lorsqu'un aéronef atteint son altitude de croisière, sa distance aux points récepteurs (plusieurs km) est telle que son empreinte acoustique est considérablement réduite. A noter que ce constat est valable pour les vols commerciaux, le trafic militaire, les survols d'hélicoptères ou d'avions de tourisme pouvant s'effectuer à des altitudes beaucoup plus basses. En corollaire, les zones d'exposition à des niveaux de bruit élevés s'inscrivent dans des contours, de formes ovoïdales, orientés selon l'axe des pistes, et dont les dimensions dépendent du trafic et de sa nature. En dehors de ces zones, même si les aéronefs peuvent éventuellement être perçus, leur impact acoustique n'est pas représenté.

Chaque avion constitue une source sonore complexe dont les émissions varient très significativement selon son régime de fonctionnement, son orientation, sa distance aux récepteurs.

On peut distinguer les types de bruit perçus en fonction des conditions d'exposition et notamment de l'éloignement à l'infrastructure aéroportuaire.

1.1.1 Le bruit d'avion pour les riverains éloignés des aéroports ou sous les couloirs de vol

Le bruit d'avion mesuré en dehors des terrains des aéroports peut se décomposer en 2 composantes principales : le bruit moteur et le bruit aérodynamique hors-moteurs.

En ce qui concerne les facteurs influant le bruit d'avion en vol cités par (Pueh Lee et al., 2022), ils peuvent être classés comme suit :

- le type de **motorisation** et l'**allure** de l'avion ont un impact important sur le bruit moteur ;
- la taille de l'avion et son allure (notamment par rapport à la position des moteurs, du train d'atterrissage, des volets...) ont un impact sur le **bruit aérodynamique** ;
- enfin, la **propagation** du son d'un avion en vol jusqu'au sol peut se faire sur de grandes distances avant de rencontrer les premiers obstacles. Les facteurs atmosphériques et météorologiques, la topographie, la nature du sol, les obstacles, modifient la nature (spectre et amplitude) du bruit reçu au niveau des récepteurs.

1.1.2 Le bruit d'avion pour les riverains proches des aéroports

En ce qui concerne les riverains proches des aéroports, ils peuvent être soumis à la fois aux bruits d'avion en vol, mais également aux bruits d'avion au sol et aux bruits d'exploitation de l'aéroport (le bruit lié à l'exploitation de l'aéroport, hors bruit des aéronefs n'est pas abordé présent document). Au sol, un avion peut générer plusieurs types de bruit :

- le bruit de roulement ;
- le bruit de l'APU (*Auxiliary Power Unit*) ;
- le bruit lié à la climatisation ;
- le bruit des essais au sol.

Le bruit de roulement est négligé dans la suite de ce rapport (et dans la littérature) compte tenu :

- de la brièveté de la phase de roulage comparé à l'exploitation d'un avion ;
- de la localisation de cette phase (uniquement sur le terrain des aéroports) ;
- de la vitesse de l'avion (en phase de roulage, l'avion se déplace à vitesse très réduite, le bruit émis est donc faible. En phase de décollage ou d'atterrissage, le bruit de roulement peut être important mais il est alors masqué par le bruit de moteur, en pleine accélération ou décélération) ;
- de la multiplicité des autres sources de bruit (à la fois de l'avion mais également de l'exploitation de l'aéroport) qui masquent ce bruit de roulement.

L'APU est un moteur auxiliaire alimenté en kérosène. Il est utilisé au sol pour fournir de l'électricité et alimenter les systèmes de climatisation de l'air. Il peut également être utilisé en vol en cas de nécessité. Afin de réduire le recours à l'APU, et donc le bruit généré par celui-ci, certains aéroports déploient les prises électriques et les systèmes de climatisation pour permettre (voire imposer car réglementaire) l'arrêt de l'APU lors du stationnement.

Les essais au sol sont des tests réalisés sur tous les équipements de l'avion, avant le premier vol. Ils sont obligatoires pour tout nouvel avion, qu'il s'agisse d'un avion de nouvelle conception ou d'un avion ayant subi une modification structurelle importante. Certains aéroports s'équipent de dispositifs anti-bruit pour la réalisation de ces essais et ainsi protéger leurs riverains (cf. §1.1.8).

1.1.3 Fonctionnement et émissions acoustiques d'un moteur d'avion

Les moteurs de types turbo réacteurs ou turbo propulseurs équipent aujourd'hui la majorité des avions de ligne ou de fret. Même si les efforts de recherche et développement s'intensifient pour développer des motorisations hybrides ou électriques (Gimenez et al., 2023), ils restent encore la meilleure solution technico-économique pour équiper les gros porteurs. Capables de développer la puissance nécessaire et assurant l'autonomie suffisante aux vols commerciaux sur de longue distance, le principe des moteurs à combustion est à l'origine de la principale source

d'émissions acoustique dans l'environnement.

La Figure 2 illustre le fonctionnement d'un moteur de type " turbojet " : l'air ambiant est aspiré par la soufflante (les pâles avant visibles d'un moteur) puis comprimé en permanence. Cet air, mélangé à du kérosène, passe ensuite par une chambre de combustion où il est enflammé. La combustion produit des gaz chauds, qui sont expulsés à l'arrière par une tuyère. C'est cette éjection de gaz qui provoque le mouvement de l'avion. Afin d'accélérer la vitesse de sortie des gaz, le réacteur qu'ils traversent, a une forme qui se rétrécit vers la sortie. Les gaz à la sortie de la chambre de combustion font également tourner une turbine, dont le mouvement provoque, le mouvement du compresseur et maintient une réaction continue.

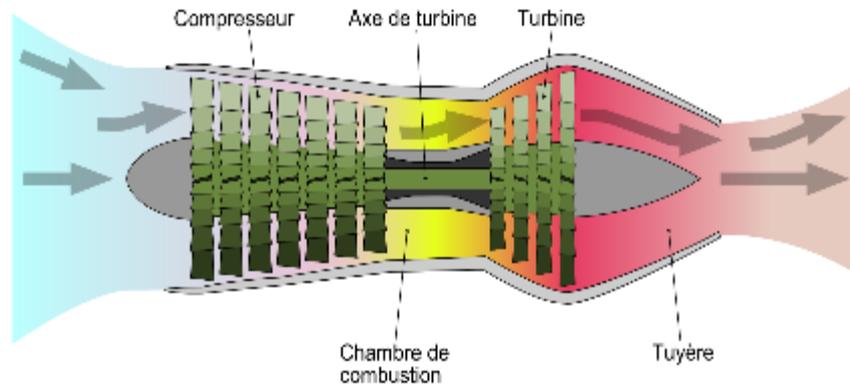


Figure 2 : Schéma d'un moteur d'avion de type turbojet
Source : (wikiwand, 2025)

Il est possible d'augmenter la puissance des réacteurs grâce à l'utilisation d'une conduite de dérivation de l'air froid entrant dans la conduite : c'est la technologie " turbo fan " (cf. Figure 3). Ainsi, seule une partie de l'air aspiré par la soufflante est injectée dans la chambre de combustion pour être brûlée avec le kérosène. L'autre partie est utilisée pour refroidir les parties chaudes du moteur et abaisser la température de sortie des gaz d'échappement. Le rapport entre ces deux proportions, c'est-à-dire le taux de dilution, aussi appelé *By Pass Ratio* (BPR), exprime le rapport entre la masse d'air éjectée par les conduites de dérivation (air froid) et la masse d'air chaud passant par la chambre de combustion.

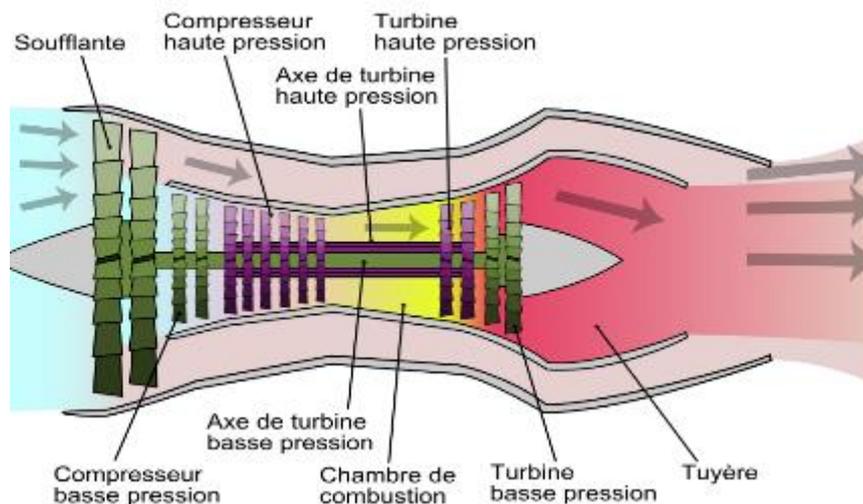


Figure 3 : Schéma d'un moteur avec une conduite de dérivation, de type turbofan
Source : (wikiwand, 2025)

1.1.4 Les composantes acoustiques principales du bruit moteur

On présente ici les principales sources composantes acoustiques d'un turboréacteur de type turbofan, cette technologie équipant aujourd'hui la majorité des avions de ligne (cf. §1.1.5).

L'ensemble de ces composantes se superposent et varient en fonction du régime utilisé.

Rappel théorique : Comme rappelé plus haut, le caractère vibratoire d'un bruit peut être décomposé en la somme de mouvements élémentaires de fréquence pure. Lorsqu'un son peut se décomposer en une combinaison de mouvements de fréquence pure, multiple d'une fréquence appelée fondamentale, alors ces mouvements sont appelés **harmoniques**.

JORF du 27 mars 1997 : La **tonalité marquée** est détectée dans un spectre non pondéré de tiers d'octave quand la différence de niveau entre la bande de tiers d'octave et les quatre bandes de tiers d'octave les plus proches (les deux bandes immédiatement inférieures et les deux bandes immédiatement supérieures) atteint ou dépasse les niveaux indiqués dans le tableau ci-après pour la bande considérée :

50 Hz à 315 Hz	400 Hz à 1250 Hz	1600 Hz à 8000 Hz
10 dB	5 dB	5 dB

Les bandes sont définies par fréquence centrale de tiers d'octave.

Dans un spectre en bandes fines (découpage du domaine fréquentiel plus fin que le 1/3 d'octave), il est possible d'identifier des **tonalités**, c'est-à-dire des fréquences pour lesquelles le niveau de pression émerge par rapport au reste du spectre. Le son d'une scie circulaire est un exemple de son tonal : une tonalité (correspondant à la vitesse de rotation de la scie) est particulièrement audible au milieu du reste du bruit (notamment dû aux vibrations des autres éléments de la scie).

La soufflante génère à la fois un bruit large bande et un son tonal autour de 3500 Hz. Le son large bande est dû aux fluctuations de pression générées par des zones de turbulence sur la surface des pâles. Le son tonal est dû à l'interaction entre le rotor et le stator de la soufflante. Par ailleurs, au décollage, lorsque la soufflante tourne à haut régime, l'extrémité extérieure des pâles atteint une vitesse supersonique (au-delà de 300 m/s). Il se crée alors des zones de turbulences et des ondes de choc sont générées. Ces ondes se propagent vers l'avant de l'appareil et sont caractérisées par des sons purs (sons d'une seule fréquence) dont les fréquences sont proches les unes des autres, l'écart variant de quelques dizaines à une centaine de Hertz. C'est ce qu'on appelle le "buzz-saw noise" (bruit de scie circulaire) (Arntzen and Simons, 2014).

Le bruit de jet résulte du mélange des gaz chauds à haute pression expulsés par la tuyère et de l'air ambiant : l'interaction entre les deux flux de vitesse et de température différentes est source de bruit. Ce mélange provoque de fortes turbulences génératrices d'un bruit riche en basses fréquences (50 à 500 Hz). Il varie en fonction de la vitesse d'expulsion du gaz dans l'air et du diamètre de la tuyère.

Le bruit de combustion est dû aux turbulences résultantes de la combustion du kérosène. Il s'agit d'un bruit large bande riche en hautes fréquences (1500 à 5000 Hz) qui se propage quasi radialement.

Ainsi, au décollage, les moteurs contribuent à l'essentiel du niveau sonore : en effet, d'après (Pueh Lee et al., 2022), les avions au départ sont plus bruyants que ceux à l'arrivée en raison de leur vitesse plus élevée pour prendre de la hauteur et d'un taux de montée plus lent dû à leur poids plus important. Pour les mêmes raisons, les avions décollant pour des destinations lointaines sont plus bruyants que ceux qui se rendent à des destinations plus proches, compte tenu de leur charge de carburant plus importante. Enfin, un avion plus grand a besoin d'une plus longue distance pour décoller et il sera plus proche du sol pendant cette phase qu'un avion plus petit.

A contrario, d'après (Casalino et al., 2008), lors des phases d'approche à l'atterrissage, pour les avions commerciaux modernes à taux de dilution élevé, le bruit aérodynamique est la principale source du bruit global, lorsque les volets et le train d'atterrissage sont déployés, augmentant ainsi la résistance au passage de l'air autour de l'avion.

La Figure 4 présente un spectre de bruit de moteur d'avion où l'origine de chaque composante du bruit est identifiée. Ainsi, le contenu en basses fréquences, nommé "jet noise", est généré en sortie du moteur et contient des harmoniques identifiables. Le bruit de combustion, en jaune sur la figure, est généré dans la partie centrale du moteur. La partie "Fan noise", riche en hautes fréquences, est générée à l'avant du moteur et présente des tonalités, dues à l'interaction rotor/stator.

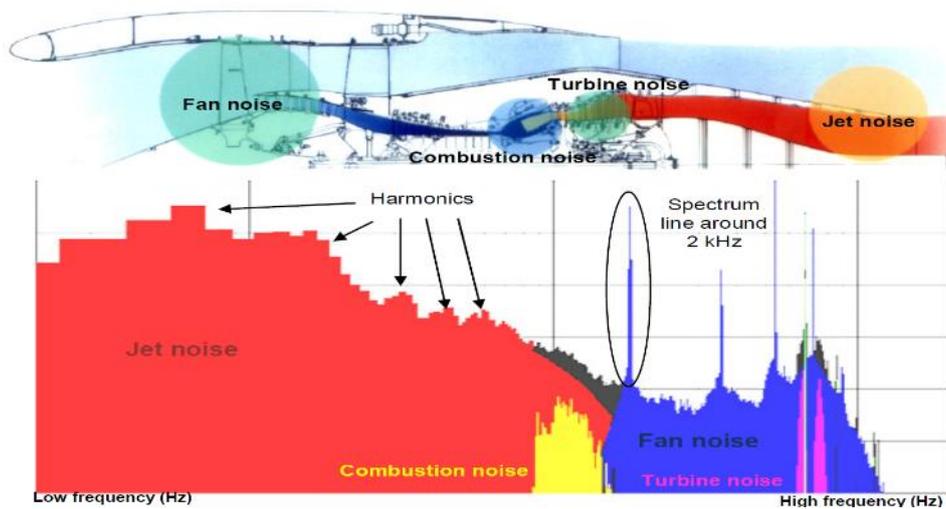


Figure 4 : Identification spectrale des sources sonores d'un moteur d'avion de type turbofan
Source : (Rosin and Iachino, 2014)

Une représentation schématique simplifiée de la Figure 4 est proposée à la Figure 5. Ces deux figures sont complémentaires : en effet, les harmoniques et les tonalités ne sont représentées que sur la Figure 4, tandis que la Figure 5 identifie la présence d'un bruit large bande sur tout le spectre du bruit d'avion et des composantes liées à des équipements sur des portions du spectre, avec des recouvrements.

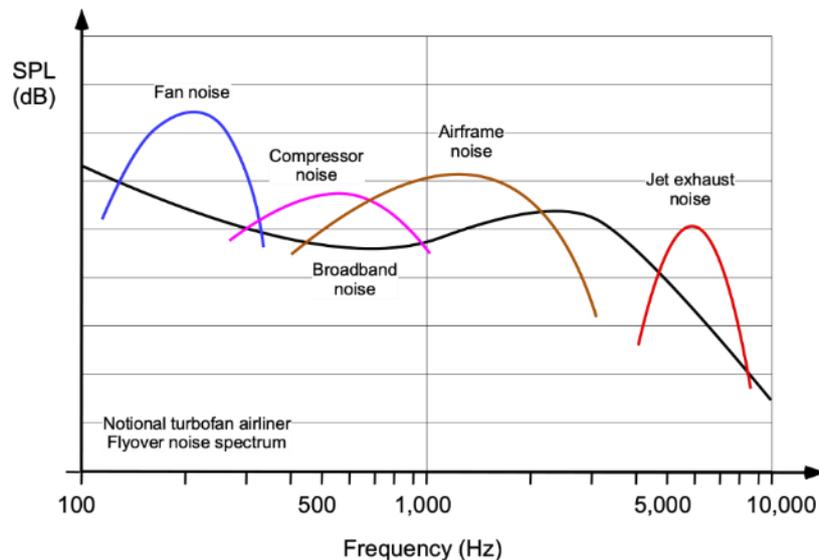


Figure 5 : Représentation schématique du spectre (niveau de pression noté SPL – Sound Pressure Level – en fonction de la fréquence) et des contributions de chaque source pour un moteur d'avion de type "turbofan" - Source : (Leishman, 2022)

1.1.5 Caractéristiques du bruit moteur en fonction des technologies : turbojet, turbofan, turboprop

La technologie des moteurs équipant les flottes commerciales a significativement évolué au fil des dernières décennies avec le souci d'en améliorer à la fois l'efficacité énergétique, mais aussi de réduire les émissions acoustiques. Les trois graphiques suivants (cf. Figure 6), présentant les spectres acoustiques de trois technologies emblématiques, témoignent de la variété et de l'évolution de ces caractéristiques :

La technologie de moteur de type turbojet n'équipe désormais que rarement les avions commerciaux et nécessite souvent l'ajout de dispositifs de réduction du bruit. Le bruit de ce type de réacteur présente un contenu spectral riche du bas-médium (200 Hz) aux hautes fréquences avec l'apparition d'émergences spectrales au-dessus de 5000 Hz.

Les moteurs turbofan, constituent une amélioration du turbojet et équipent aujourd'hui la majorité des avions com-

merciaux. Considérés comme beaucoup moins bruyants, ils possèdent un spectre plus riche dans les basses fréquences, décroissant à partir des fréquences médium (500 Hz), et donc un contenu spectral moins important dans le domaine de sensibilité maximale de l'oreille humaine (autour de 2000 Hz). Le spectre est également caractérisé par la présence de tonalités et harmoniques marquées.

Les moteurs à turbo propulsion (turboprop) ou moteurs à hélices, constituent une troisième catégorie spécifique qui équipe encore une partie des flottes commerciales (ATR par exemple). Ils possèdent un spectre dont l'allure se rapproche des turbojets (médium-hautes fréquences), mais avec des tonalités et harmoniques marquées, symptomatiques du bruit induit par la rotation des pales des hélices.

Pour mémoire, les moteurs équipés de postcombustion (*afterburning*), utilisée pour augmenter de façon brève la poussée des moteurs, n'équipent plus aucun avion de ligne depuis le retrait du Concorde en 2003. Cette technologie est aujourd'hui réservée aux avions supersoniques militaires. Outre l'augmentation très significative de la consommation de carburant, la postcombustion génère des émissions acoustiques très élevées (proche de 175 dB en intensité), le passage en vitesse supersonique provoquant également le phénomène de "bang" caractéristique du passage du "mur du son".

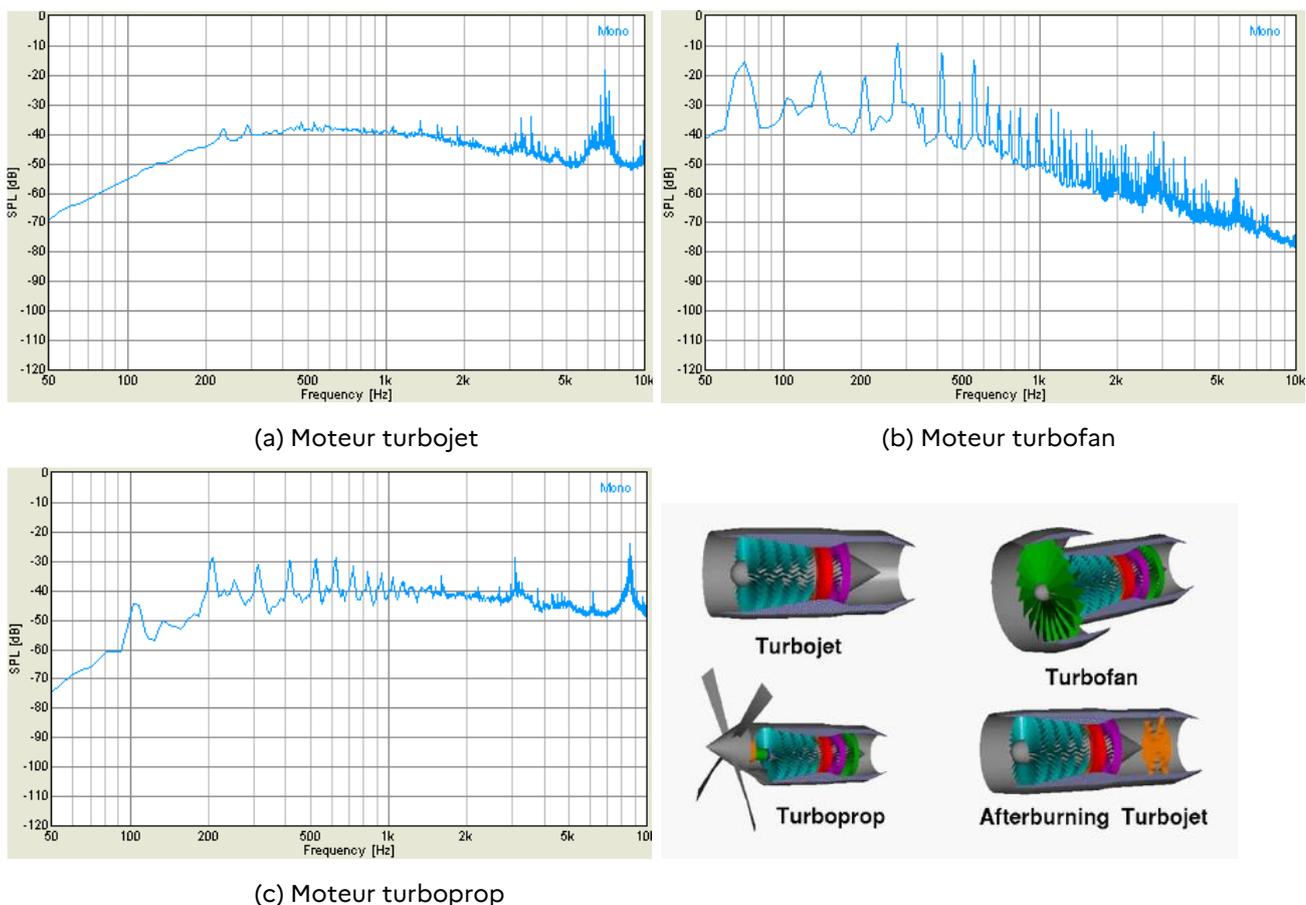


Figure 6: Comparaison des spectres mesurés pour trois technologies de moteur : (a) turbojet, (b) turbofan, (c) turboprop - Sources : (Miljković, 2021). Illustration en bas à droite : NASA

1.1.6 Le bruit aérodynamique (hors moteurs)

Si l'origine du bruit moteur est en partie aérodynamique (rotation des pales), une autre source acoustique est constituée par la pénétration de l'avion dans l'air. Le décollement de la couche limite d'air circulant le long du fuselage et des éléments saillants (dérive, voilure, becs, volets, entrée d'air, train d'atterrissage), génère des turbulences, sources d'émissions acoustiques (voir Figure 7). Ce type de bruit augmente avec la vitesse de l'avion, et inversement avec l'altitude : à plus faible altitude, la densité de l'air est plus importante, le bruit l'est donc également (Pueh Lee et al., 2022). Ces bruits sont donc d'autant plus perceptibles que les avions restent plus longtemps à basse altitude.

D'après (Casalino et al., 2008), durant la phase d'approche, pour les avions modernes, avec un BPR élevé, le bruit aérodynamique représente la source de bruit principal, quand les volets, becs et train d'atterrissage sont déployés.

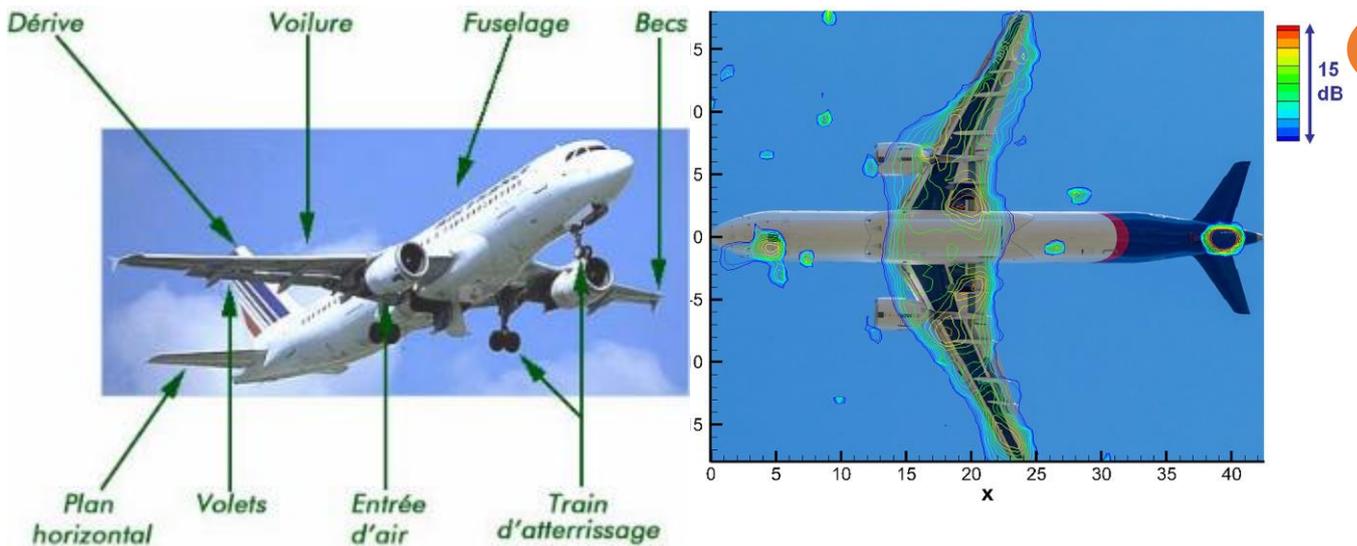


Figure 7 : À gauche : éléments à la surface d'un avion, responsables de bruit aérodynamique. À droite : exemple de carte de localisation des sources de bruit lors du survol d'un avion lors d'essais en vol (échelle non disponible).
Source : à gauche, (DGAC, 2004), à droite (Camussi and Bennett, 2020)

A noter que la configuration géométrique de l'avion implique des phénomènes de réflexion, de diffraction et/ou de réflexion des ondes acoustiques qui modifie la directivité de la source " avion " (cf. §3.7.2.3 pour plus de détails).

1.1.7 La propagation vibro-acoustique du bruit d'avions

Le bruit au niveau du sol dépend non seulement de l'avion mais également des caractéristiques du milieu de propagation. En effet, le son perçu au sol d'un avion est issu de la propagation directe (sans obstacle) du son vers le récepteur à travers l'air ambiant et de la réflexion sur le sol de ce son.

Le bruit émis par l'avion est modifié lors de sa propagation par les caractéristiques de l'air et de l'atmosphère (Pueh Lee et al., 2022) :

- absorption atmosphérique** : si sur de faibles distances de propagation, l'air peut être considéré comme un gaz faiblement dissipatif, l'absorption thermo-visqueuse ne peut plus être négligée dès lors que ces distances dépassent plusieurs dizaines ou centaines de mètres. Cette absorption est fortement dépendante des paramètres atmosphériques (température, pression, humidité) et de la fréquence avec laquelle elle augmente. A basses fréquences (< 100 Hz), dans des conditions " normales " de température, le coefficient d'absorption est très faible, inférieure à 0,01 dB pour 100 m de propagation. En revanche à hautes fréquences, l'absorption devient significative et peut atteindre plusieurs dB/100 m au-dessus de 1000 Hz (cf. Figure 8).

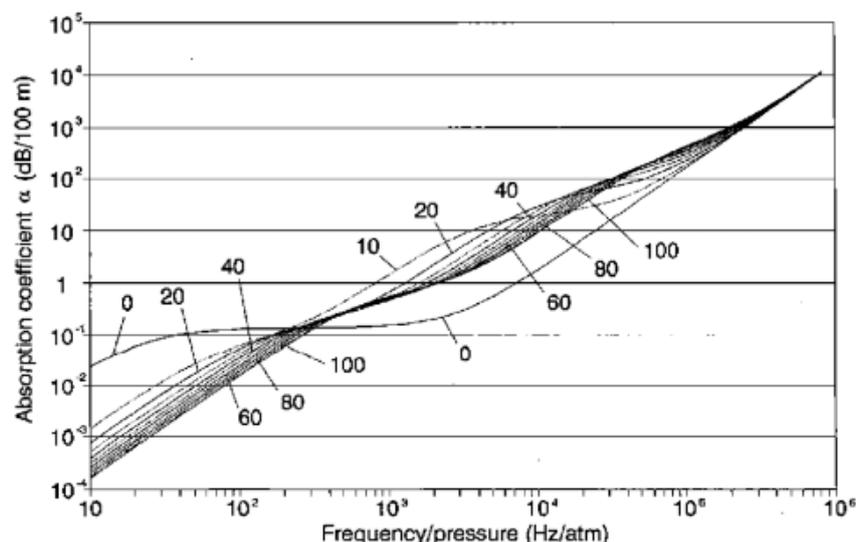


Figure 8 : Coefficient d'absorption atmosphérique en fonction de la fréquence

(rapportée à la pression atmosphérique) pour des températures variant entre 0 et 100°C. Source : (Zhao, 2010)

- réfraction** : la réfraction des ondes acoustiques lors de la propagation sur de longues distances, en atmosphère inhomogène (gradient de température ou vent), est un phénomène pouvant fortement modifier l'estimation des niveaux de bruit dans l'environnement. Associé à une modification verticale de la célérité du son, il se traduit par une modification de la trajectoire des " rayons sonores ", analogue à ce que l'on observe pour les rayons optiques (à l'origine des " mirages ") traversant des milieux aux indices de réfraction différents (Figure 9). Localement, cette déviation de l'énergie sonore peut conduire à une diminution ou une augmentation locale du niveau sonore de plusieurs dB, par rapport à la propagation en conditions atmosphériques homogènes. Du fait de leur faible absorption par l'atmosphère, les sons de basses fréquences qui se propagent sur de grandes distances, sont d'autant plus affectés par le phénomène.

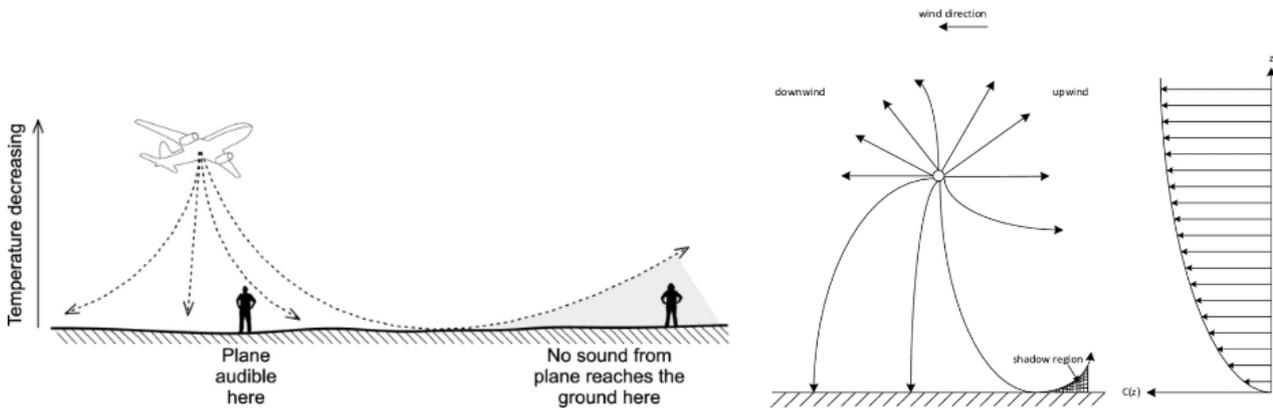


Figure 9 : à gauche : illustration du phénomène de réfraction vers le haut en condition de gradient de température négatif (Naylor, 2021) ; à droite : courbure des rayons sonores à partir du point source (l'avion) : vers le haut, au vent ; vers le bas, sous le vent (Naylor, 2021) (Kapoor et al., 2021)

- effet de sol** : Avant de se propager au(x) récepteur(s), l'onde acoustique peut se réfléchir sur le sol et interférer avec le signal direct.

En fonction des configurations d'interférence et de la nature du sol, plus ou moins absorbant et de la fréquence, le niveau reçu au niveau du récepteur peut être augmenté ou diminué (Figure 10).

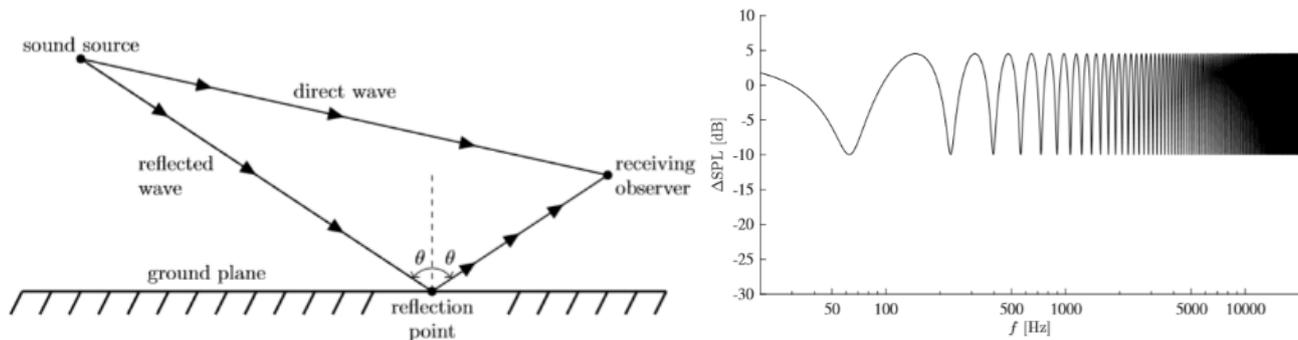


Figure 10 : A gauche : illustration schématique de l'effet de sol. A droite : conséquence de l'effet de sol en termes d'atténuation sur le niveau de pression acoustique reçu. Les fluctuations positives ou négatives de l'atténuation résultent des interférences destructives ou constructives, selon la fréquence considérée. Source : (Campos et al., 2022).

- propagation dans les bâtiments** : avant de parvenir à l'intérieur d'un bâtiment, le bruit en traverse l'enveloppe constituée de matériaux de construction : enveloppe opaque, fenêtres, systèmes d'entrée d'air ou de ventilation.

Tous ces éléments filtrent le bruit incident selon leurs caractéristiques vibro-acoustiques propres et qui contribuent à l'isolement global du bâtiment. De façon générale, les techniques constructives d'aujourd'hui et les limites physiques associées, conduisent à des isolements généralement croissants avec la fréquence, c'est-à-dire à des performances moindres à basses fréquences (grandes longueurs d'onde par rapport aux dimensions des éléments constructifs) et plus faciles à atteindre en haute fréquences (cf. Figure 11). Les normes actuelles en matière de certification acoustique des matériaux de construction tiennent compte des difficultés techniques à atteindre de hauts d'isollements, misant aussi sur un contenu spectral en basses fréquences relativement faible des bruits incidents, allié à une sensibilité humaine moindre dans ce domaine fréquentiel. La question d'une gêne spécifique occasionnée

par la transmission de fréquences basses peut néanmoins se poser lorsque l'intensité augmente, par exemple en situation de proximité relative des sources ou atténuation faible sur de longues distances. L'utilisation de métriques utilisant la pondération A, adaptée à des niveaux sonores de faible intensité, peut dans ce cas être réinterrogée.

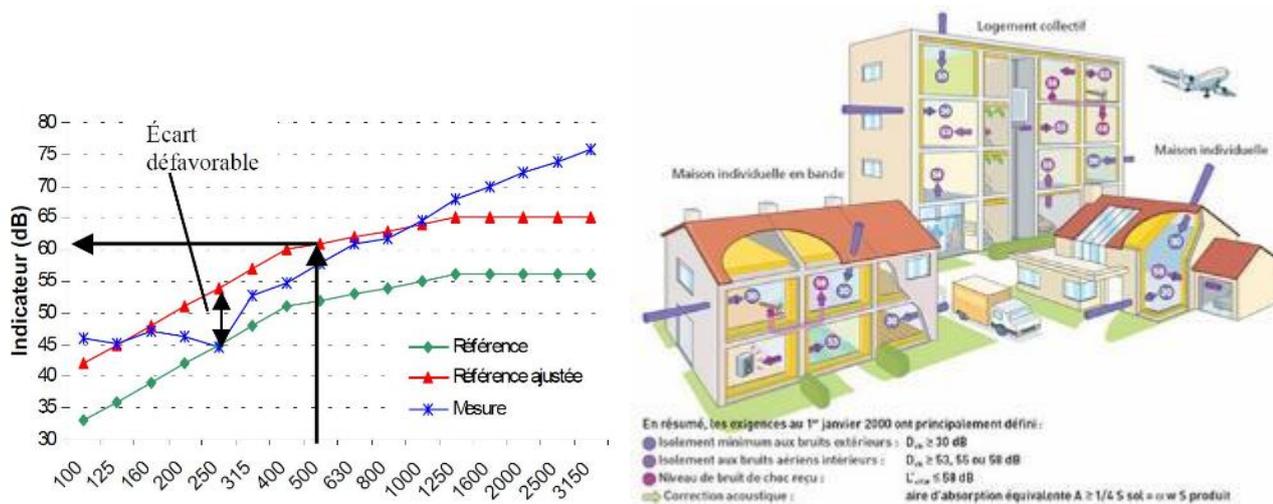


Figure 11 : A gauche : exemple de mesure d'un isolement de façade (bleu) comparé aux courbes de référence (verte et rouge) servant à la détermination de la valeur d'isolement normalisée ; A droite, rappel des exigences d'isolement selon la réglementation acoustique en vigueur.

Source : à gauche, (GuidEnR HQE., 2025), à droite, (placo, 2022).

(Silvati et al., 2000) ont par ailleurs rapporté que les moteurs à réaction pourraient générer suffisamment d'énergie basse fréquence pour induire des vibrations perceptibles et des cliquetis audibles d'objets à l'intérieur des structures situées sur les côtés des pistes. Leurs conclusions ont été soutenues par une enquête sociale menée en 1997 par (Fidell et al., 1999) sur la gêne causée par le bruit basse fréquence des pistes latérales, réalisée à proximité de l'aéroport international de Los Angeles, ainsi qu'une seconde enquête sociale très similaire (Fidell et al., 2002) menée à Minneapolis. Ces deux études ont produit des résultats comparables concernant la prévalence de la gêne due aux cliquetis provoqués par le bruit des avions, la fréquence de perception de ces cliquetis, et les types d'objets identifiés comme sources de cliquetis gênants dans les habitations.

L'isolation acoustique d'un bâtiment (cf. Figure 11) est un paramètre essentiel dans la compréhension de la gêne exprimée. L'enveloppe du bâtiment constitue le dernier obstacle au bruit avant d'être reçu par les personnes exposées (en intérieur) et il existe encore des différences très significatives des isollements sur le parc bâti français. Pourtant, la grande majorité des études cherchant à élaborer une relation exposition-réponse, sur la base d'enquêtes par exemple, n'intègre pas la performance acoustique des logements. La fonction de dose-réponse est généralement basée sur la régression de l'expression de la gêne et le niveau de bruit (L_{Aeq} ou L_{den}) évalué en façade des bâtiments. Ce biais méthodologique n'est certainement pas volontaire mais résulte de la difficulté à accéder à la donnée d'isolement des bâtiments. Cela nécessiterait en théorie de réaliser systématiquement une mesure d'isolement, procédure lourde et coûteuse. Il n'existe pas à ce jour, de base de données des isollements de façade, seulement parfois, un inventaire non-exhaustif de travaux d'isolation, ou les dires d'experts. Des informations liées aux bâtiments (âge mis en regard de l'évolution de la réglementation, typologie de construction, diagnostic de performance énergétique...) peuvent fournir un faisceau d'indices sur la performance qui reste appréciée de façon très qualitative.

L'amélioration de la connaissance et la capitalisation des performances en isolation du parc de bâtiments constituent selon nous une piste de progrès essentielle dans la compréhension des données de gêne exprimée et l'identification et la priorisation des actions de réduction du bruit. Le Cerema (Cerema, 2017) a mené une étude prospective (projet Baobat) en ce sens, dans le but d'enrichir les bases de données liées au bruit dans l'environnement. La méthodologie mise en œuvre sur la ville de Lyon (cf. Figure 12) consiste à :

1. identifier les différentes bases de données permettant d'objectiver les caractéristiques des bâtiments (plus de 20 bases analysées),
2. Définir un indicateur semi-quantitatif de la performance acoustique de l'enveloppe des bâtiments,
3. Définir des méthodes d'estimation de différents paramètres : date de construction des bâtiments, type constructif des bâtiments, niveau d'isolement acoustique, ...
4. Mettre en œuvre les méthodes développées et la base sur un territoire
5. Envisager, avec les possibles utilisateurs, les exploitations possibles des données

Cette méthodologie n'a pour le moment, pas été déployée à l'échelle nationale. La Base de Données Nationale des Bâtiments, déployée récemment par le CSTB (CSTB, 2025) pourrait contenir à termes des informations utiles pour combler le manque identifié.

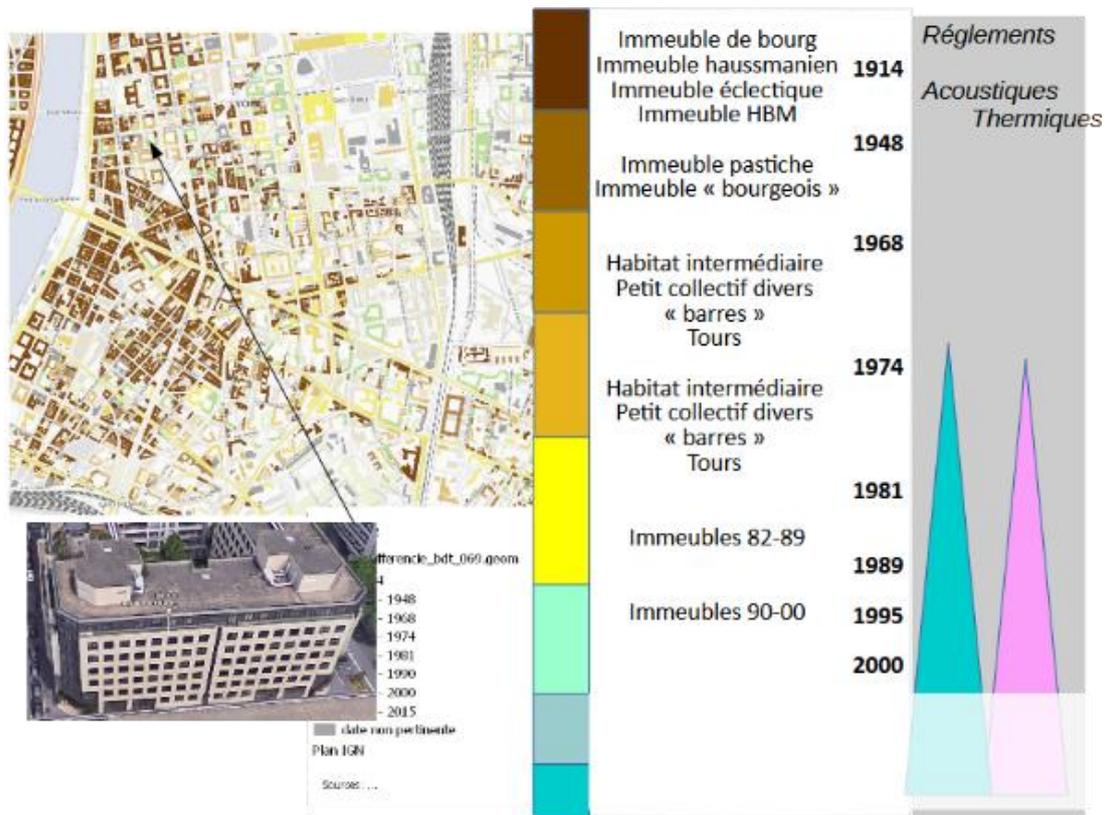


Figure 12: Identification de la nature du bâti sur la ville de Lyon mise en regard des réglementations acoustiques et thermiques (projet Baobat). Le croisement de différentes bases de données, dont les données foncières (DGFIP), ont permis d'établir une typologie constructive des bâtiments et de la mettre en regard des évolutions des réglementations acoustiques et thermiques. Une hiérarchisation à grande échelle des bâtiments présentant potentiellement une vulnérabilité vis-à-vis des nuisances sonores peut ainsi être établies (à confirmer par la connaissance locale du parc bâti).

1.1.8 Dispositifs de protections sur le chemin de propagation

Les leviers de réduction du bruit à la source ou au niveau des récepteurs (isolation des bâtiments) ont été présentés ci-dessus. D'autres initiatives locales ont été mises en œuvre pour limiter les nuisances en agissant sur le milieu de propagation. Tous les dispositifs présentés ci-après sont avant tout destinés à limiter la propagation pour des sources situées au niveau du sol. Ils sont inefficaces (ou très peu) pour protéger des émissions des avions en vol.

Parmi ceux-ci :

- Les murs ou merlons anti-bruit (cf. Figure 13), dont l'efficacité peut être avérée si les récepteurs sont situés dans la " zone d'ombre " définie par la position relative de la source et de la " tête " de l'obstacle. Ce type

de dispositif est d'autant plus efficace que l'écran est situé près de la source, ce qui permet également d'en limiter la hauteur.

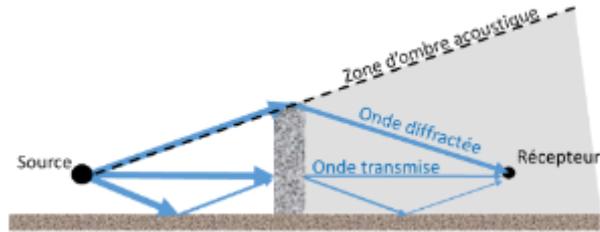


Figure 13 : En haut : principe de fonctionnement d'un écran acoustique. En bas : mur (à gauche) et merlon végétalisé (à droite) anti-bruit autour d'aéroports japonais

Source : (Kansai Airports Technical Department, 2019)

- les murs anti-bruit ou les hangars isolés acoustiquement pour la réalisation des essais moteurs au sol, notamment sur les aéroports d'Heathrow (cf. Figure 14 (iac acoustics, 2013)) ou de Zurich (cf. Figure 15 (Zurich airport, 2025)). Ils agissent au plus près des sources suivants les principes évoqués plus haut. L'utilisation de matériaux absorbants sur les faces internes permet d'en augmenter l'efficacité.



Figure 14 : Murs anti-bruit pour la réalisation des essais moteurs au sol, sur l'aéroport d'Heathrow

Source : (iac acoustics, 2013)

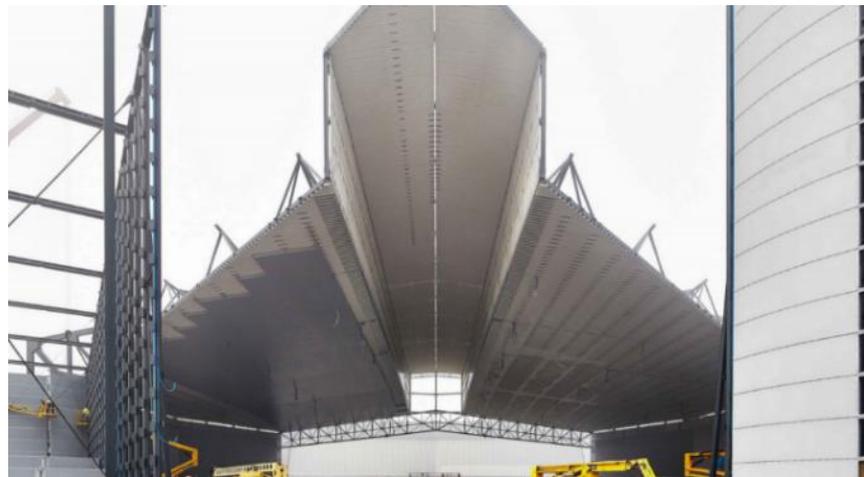


Figure 15 : Hangar isolé acoustiquement pour la réalisation des essais moteurs au sol sur l'aéroport de Zurich

Source : (Zurich airport, 2025)

- **La présence d'espaces végétalisés " tampon "** (cf. Figure 16), entre la zone d'activités aéroportuaire et les bâtiments riverains peut jouer certains rôles dans la réduction des nuisances sonores :
 - si la zone végétale contribue à déminéraliser le sol et créer une surface horizontale plus absorbante, l'effet de sol peut être réduit (voir paragraphe précédent)
 - la présence de végétation verticale est plus discutable et n'est pas considéré comme une mesure de réduction du bruit à l'efficacité reconnue :
 - l'atténuation apportée par les arbres **reste limitée** : environ 1 dB(A) pour 10 m de végétation verticale dense.
 - la plantation de rideaux d'arbres peut modifier la perception de l'environnement sonore en masquant la ou les sources. L'aménagement reste controversé car pouvant être perçu comme une amélioration du cadre de vie, mais il peut au contraire perturber le ressenti (sources audibles mais non visibles).



Figure 16 : Zone verte tampon, créée autour d'un aéroport japonais dans une zone classe 3 ($L_{den} > 76$ dB) où les habitants ont été relocalisés
Source: (Kansai Airports Technical Department, 2019)

- les aménagements paysagers utilisés comme barrière acoustique, notamment le " Buitenschot Land Art Park " construit à proximité de l'aéroport d'Amsterdam Schiphol (cf. Figure 17, Figure 18 et (CG Concept, 2016)). Ce type de dispositifs imposant a pour vocation de réduire l'effets de sol. La surface " texturée " par des merlons de plusieurs centimètres à mètres de haut permettrait, en multipliant les arrêtes de diffraction, de limiter la propagation des ondes sur un large spectre. En effet, les dimensions du dispositif (3 m de haut, 11 m entre les arrêtes) correspondent à de grandes longueurs d'onde susceptibles de modifier la propagation sur un large domaine spectral, y compris à basses fréquences. L'objectif étant de les disperser dans d'autres directions et d'absorber une partie du spectre audible. Les promoteurs de cette solution n'affichent cependant que peu de résultats permettant de juger de l'efficacité de cette solution (réduction de 5,5 dB évoquée sans précision sur les conditions de mesurage).



Figure 17 : Buitenschot Land Art Park

Source : <https://landezine.com/buitenschot-park-by-hns-landscape-architects/>

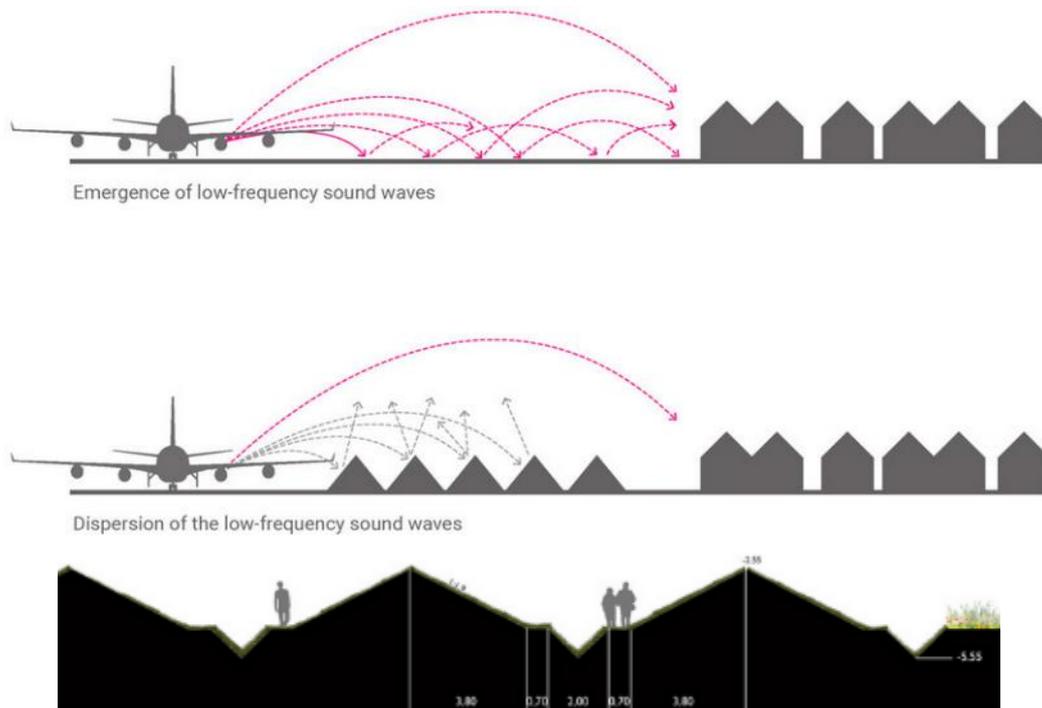


Figure 18 : Principe de fonctionnement du Buitenschot Land Art Park et dimensions des aménagements

Source : <https://urbannext.net/buitenschot/>

1.2 De la source au récepteur : quelques exemples de bruit d'avions mesurés au sol

La partie précédente a permis de rappeler l'ensemble des facteurs qui affectent la nature du bruit produit par les avions, de son émission jusqu'aux récepteurs. L'ensemble des conditions de propagation modifie le sonogramme effectivement perçu. Le sonogramme permet d'analyser simultanément les fluctuations temporelles et fréquentielles du bruit.

Rappel théorique : Lors de la mesure d'un son en un point, la grandeur mesurée est la variation de la pression en ce point. Plusieurs représentations sont alors possibles :

- la variation du niveau sonore en fonction du temps (représentation 2D, abscisse : le temps, ordonnée : le

niveau sonore) ;

- le spectre : variation du niveau sonore en fonction des fréquences sur une période élémentaire, classiquement une seconde (représentation 2D, abscisse : les fréquences en Hz, ordonnée : le niveau sonore) ;
- le spectrogramme ou sonagramme : variation du niveau sonore en fonction du temps et des fréquences (représentation 3D, abscisse : le temps, ordonnée : les fréquences en Hz, cotes : le niveau sonore).

La Figure 19 représente le spectre sur une seconde d'un passage d'avion au-dessus du microphone. Le niveau sonore est donné en relatif¹. Le bruit de l'avion possède trois caractéristiques, que l'on peut mettre en relation avec certains indicateurs :

- des harmoniques en dessous de 1000 Hz ⇒ **les indicateurs de tonalité** ;
- une tonalité marquée autour de 2000 Hz ⇒ **les indicateurs de tonalité** ;
- une énergie sonore faible au-delà de 4000 Hz ⇒ **les indicateurs L_{LF}, L_{ALF}, L_{FSL}**.

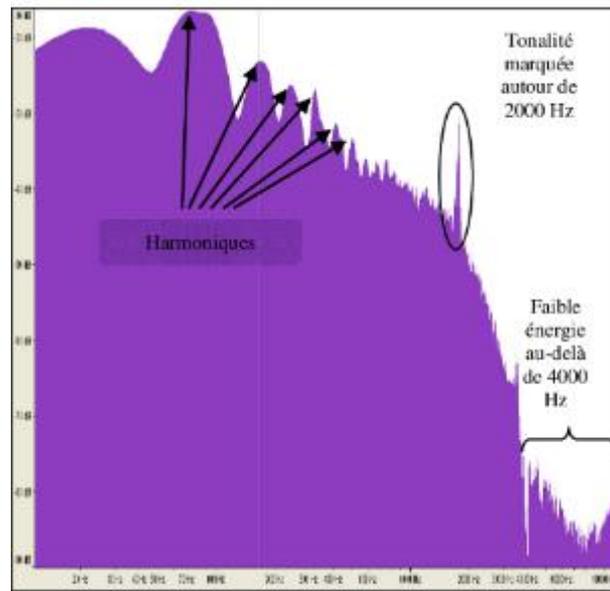


Figure 19 : Illustration des caractéristiques d'un bruit d'avion
Source : (Rosin et al., 2010)

D'après (Rosin and Iachino, 2014), ces caractéristiques sont observables sur les différents bruits d'avion. Elles varient selon le type de survol (approche, décollage, montée, palier) et selon l'emplacement relatif de l'avion par rapport au point de mesure. Les variations portent sur le nombre et la fréquence des harmoniques, la fréquence et le niveau de la raie marquée, et la hauteur spectrale à partir de laquelle il y a une chute de l'énergie sonore. Ci-après sont donc présentés des sonagrammes de bruit d'avion mesuré dans différentes conditions de survol, afin d'étudier les caractéristiques acoustiques en fonction de ce paramètre.

La Figure 20 représente le spectrogramme d'un bruit d'avion au sol au décollage.

¹ L'abscisse est ainsi en valeur négative. A noter que la référence n'est pas indiquée dans la publication dont est issue la figure.

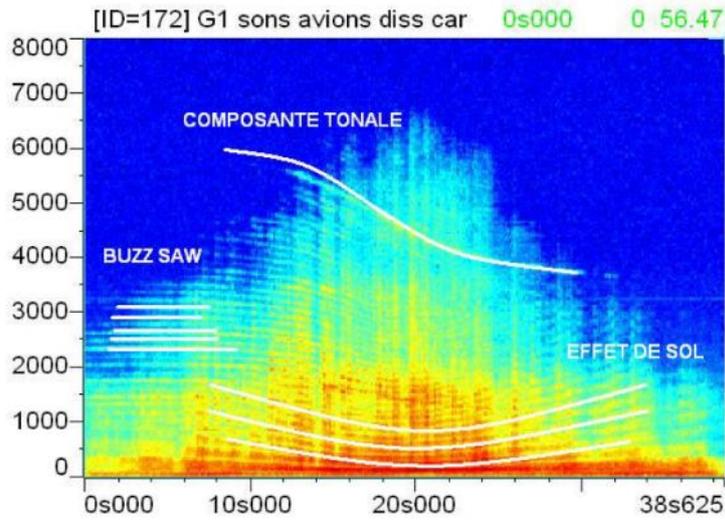


Figure 20 : Exemple de sonagramme d'un bruit d'avion au décollage
Fréquence (Hz) en ordonnée, temps (s) en abscisse.
Source : (Barbot, 2008)

Les principales composantes identifiables du bruit d’avion sont :

- le buzz-saw noise, dû aux pâles (cf. Partie §1.1.4 pour des détails sur la génération de ce bruit) ;
- une composante tonale, due à l’interaction entre le rotor et le stator de la soufflante ;
- et l’effet de sol (dû aux réflexions du signal sur le sol, cf. Partie §1.1.7).

Les variations de fréquences de ces bruits, visibles à la Figure 20, sont dues à l’effet Doppler.

Les spectrogrammes ci-après ont été mesurés :

- lors de la phase de démarrage et de roulage à 100 m de l’axe de la piste, à 76 m du début de la piste (cf. Figure 21)
- au moment de l’inversion de poussée (phase d’atterrissage), à 61 m de l’axe de la piste, à 914 m du début de la piste (cf. Figure 22)

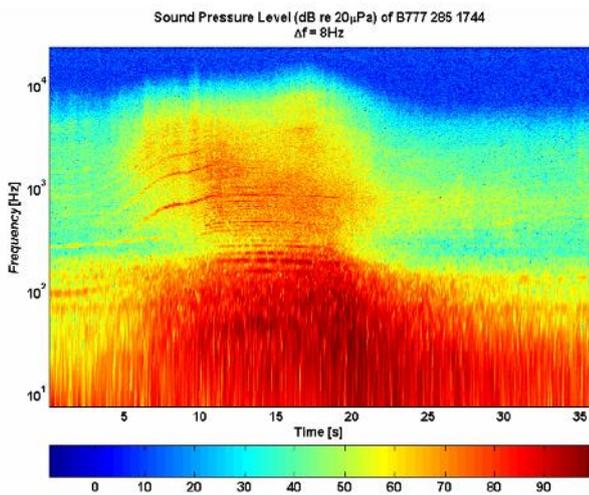


Figure 21 : Niveau de pression sonore d'un B747, mesuré le 28/05/2004, à 17:44.
Source : (Hodgdon et al., 2007)

Le contenu basses fréquences (inférieur à 200 Hz) est très important (supérieur à 80 dB) et des composantes tonales sont identifiables.

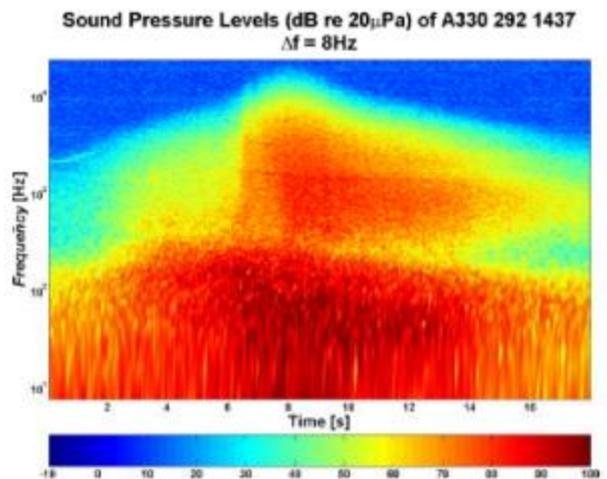


Figure 22 : Niveau de pression sonore d'un A330, mesuré le 29/02/2004, à 14:37.
Source : (Hodgdon et al., 2007)

Sur ce graphe, du contenu fréquentiel autour de 1000 Hz apparaît à environ 6 s : cela correspond à l’inversion de poussée. De nouveau, le contenu en basses fréquences (inférieur à 200 Hz) est très important.

L'analyse des sonagrammes reste peu ou pas utilisée lors de la mise en relation d'enquêtes de gêne avec des mesures d'exposition. L'importante quantité d'information contenue dans ce type de représentation est difficilement compatible avec des exploitations statistiques. Les sonagrammes peuvent néanmoins être mis en regard et objectiver les verbalisations recueillies lors d'expériences en laboratoire ou lors d'enquêtes *in situ* : fluctuations/modulations en fréquence ou amplitude, attaques, "rugosité" ... Ceux-ci apportent alors des informations essentielles sur l'identification des facteurs acoustiques de la gêne (voir §2.1.1).

1.3 Perspectives : évolution du trafic aérien, nouvelles technologies de réduction du bruit

1.3.1 Projections d'évolution du trafic aérien et conséquences sur l'environnement sonore

Afin de limiter les émissions acoustiques, l'OACI/ICAO impose depuis 1972, le respect de normes de plus en plus contraignantes pour la certification des aéronefs. L'Effective Perceived Noise Deicbel (EPNdB) est la grandeur de référence adoptée pour fixer ces normes d'émission acoustique (cf. Figure 23). L'évolution des technologies de motorisation, mais également l'adoption de l'approche équilibrée² ont permis de réduire très significativement les émissions individuelles des avions et l'exposition au bruit au voisinage des aéroports.

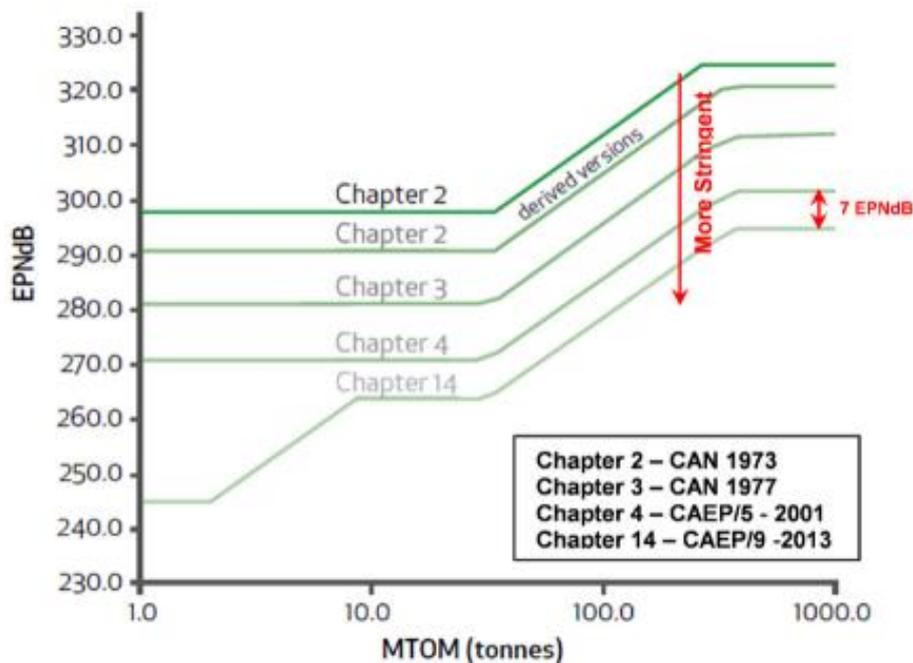


Figure 23: Évolution des normes ICAO pour les avions depuis 1973 en EPNdB

Source : (ICAO, 2024)

Face aux projections annoncées par l'ICAO (cf. Figure 24) de multiplication du nombre de passagers transporter par 2,7 et le fret par 2,2 d'ici 2050, les enjeux de maîtrise des nuisances sonores restent une priorité affichée par l'organisation internationale. Si la crise "CoVID19" a provoqué une chute brutale du trafic en 2020, celui-ci est aujourd'hui quasiment revenu au niveau de la courbe de tendance pré-2019 (Figure 25). Selon les scénarios, l'augmentation devrait se poursuivre avec une croissance comprise entre +120% et +78% à échéance 2050, par rapport à l'année 2023. Il convient de rester prudent sur ces projections qui ne peuvent anticiper toutes les évolutions des contextes économique et géopolitique.

² " L'approche équilibrée consiste à déterminer les problèmes de bruit aux aéroports, puis à analyser les diverses mesures de réduction disponibles, en étudiant quatre principaux éléments : la réduction du bruit à la source (aéronefs plus silencieux), la planification et la gestion de l'utilisation des terrains, les procédures opérationnelles d'atténuation du bruit et les restrictions d'exploitation. " (source : ICAO)

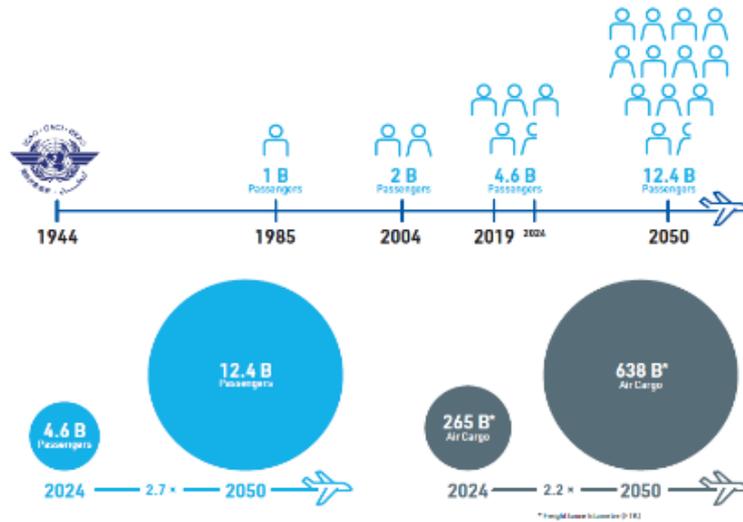
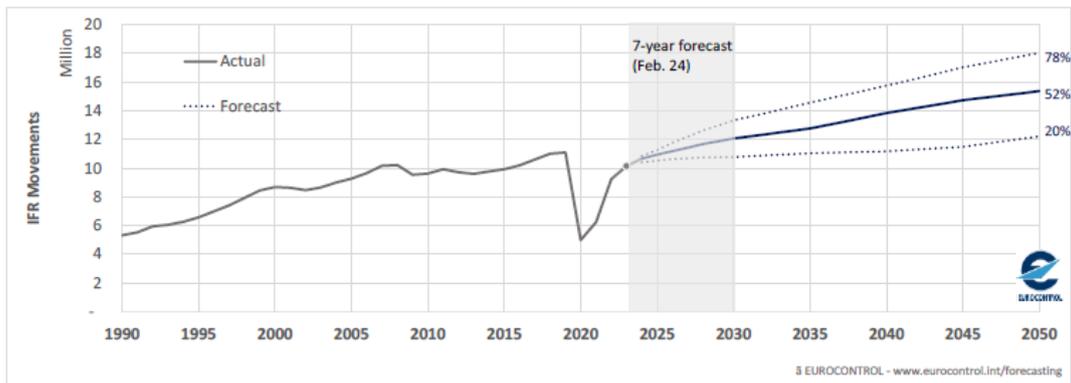


Figure 24 : Illustration de l'historique de croissance du volume de passagers et de fret transportés par le transport aérien depuis 1944 et des perspectives de croissance à 2050.
Source : (ICAO, 2024)

Figure 4. Flight forecast for Europe, with total growth between 2024 and 2050



ECAC	IFR Movements										
	2019		2023		2050			Total growth 2050/2023	AAGR 2024-2050	Total growth 2050/2019	AAGR 2020-2050
	Total (million)	Avg. daily (thousands)	Total (million)	Avg. daily (thousands)	Total (million)	Avg. daily (thousands)	Extra flights/day (thousands)				
High					18.0	49.4	5.9	+78%	+2.2%	+63%	+1.6%
Base	11.1	30.4	10.1	27.8	15.4	42.1	0.9	+52%	+1.6%	+39%	+1.1%
Low					12.2	33.5	0.9	+20%	+0.7%	+10%	+0.3%

Figure 25: Prévion de croissance du trafic aérien en Europe entre 2019 et 2050
Source : (EUROCONTROL, 2024)

D'autre part, si la croissance est la tendance générale à l'échelle européenne ou mondiale, les projections sont contrastées au niveau européen (cf. Figure 26). Pour la France, le taux d'évolution annuel du trafic aérien (y compris les survols uniquement), serait de 1,2%/an entre 2024 et 2050.

Figure 6. Average annual flight growth rates in the base scenario (2024-2050)

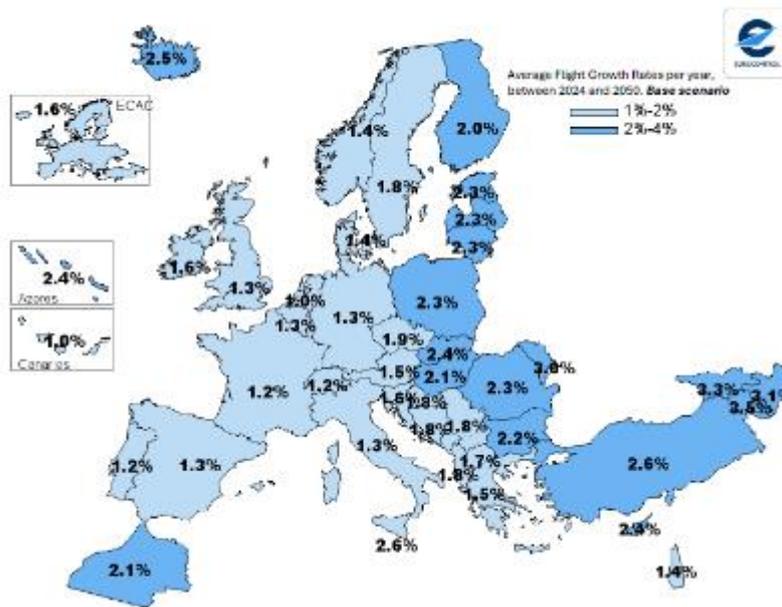


Figure 26: Estimation de la croissance moyenne annuelle du nombre de vols (2024-2050), périmètre ECAC.

Source : (Eurocontrol, 2025)

L'accompagnement de cette évolution dépend, pour partie, du renouvellement de la flotte d'aéronefs, avec le remplacement progressif des avions les plus bruyants (voir Figure 27). L'introduction des différents chapitres et les limitations acoustiques associées, ont permis une réduction de plusieurs dizaines d'EPNdB, avec une accélération marquée à partir de l'introduction du chapitre 14. La décroissance moyenne des niveaux en EPNdB est de l'ordre de -0,6 EPNdB/an, soit près de 20 dB sur 35 ans. Presque toutes les catégories d'avions ont vu leurs performances acoustiques améliorées, à l'exception des turboprops et des avions d'affaires, ces derniers respectant néanmoins largement les exigences du chapitre 14. On notera qu'à partir de 2020, le niveau d'EPNdB des avions turbo propulsés devient supérieurs aux autres catégories.

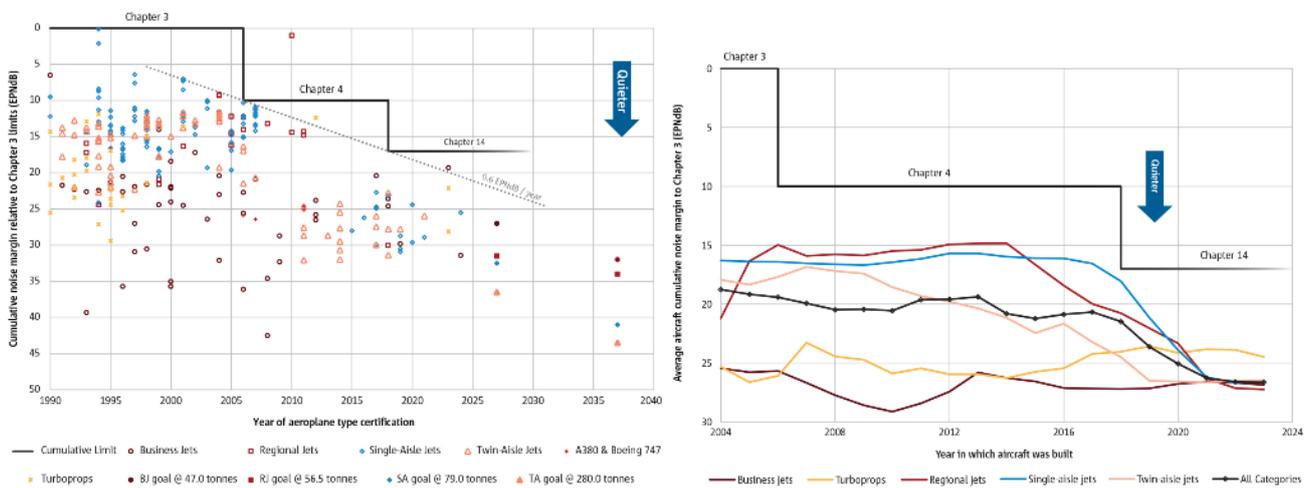


Figure 27: Evolution de la composition de la flotte européenne de 1990 à 2040 selon le niveau EPNdB et l'entrée en vigueur des chapitres 3 à 14. A gauche, chaque point représente un modèle d'avion; à droite les données sont cumulées par catégories pour la période 2004-2024. Source : (European Environment Agency, 2025)

Une étude récente, menée sur l'aéroport de Dublin, s'est intéressée à la dynamique d'évolution des niveaux de bruit (Lden, Ln) en tenant compte du renouvellement de la flotte et de l'augmentation progressive du trafic (Einicke and Kennedy, 2025). En comparant trois scénarios (2023, 2030, 2040) les auteurs mettent en évidence que dans un premier temps (2030) la population exposée augmente, le renouvellement de la flotte ne suffisant pas à contrer l'augmentation du trafic. Ils démontrent également qu'il faudrait attendre 2040, pour que la pénétration des avions les moins bruyants permettent un retour à la situation d'exposition de 2023.

Les résultats du réseau de mesures couvrant l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry, entre 2005 et 2019, confortent la tendance d'une compensation de la pénétration d'avions de moins en moins bruyants par l'augmentation du trafic (Figure 28).

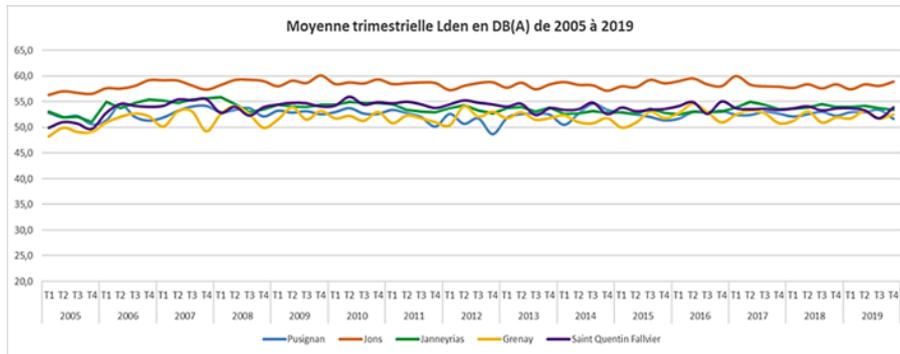


Figure 28: Evolutions des niveaux de bruit enregistrés par le réseau de surveillance acoustique de l'aéroport de Lyon-Saint-Exupéry

Derrière la problématique de variation des niveaux des indicateurs énergétiques, se pose la question de la modification de la nature événementiel du bruit perçu et de ces impacts (positifs ou négatifs) en termes de gêne ou autres effets sanitaires. L'augmentation du trafic conduit inéluctablement à une augmentation du nombre d'événements sonores, a priori d'amplitude moyenne plus faible. Les indicateurs réglementaires actuels (Lden, LAeq) ne permettent pas de rendre compte de cette évolution de la dynamique temporelle du bruit.

1.3.2 Recherche et développement sur les technologies de réduction du bruit

Pour accompagner la croissance prévisible du trafic aérien, les constructeurs aéronautiques et les instances internationales portent depuis plusieurs décennies, de nombreux programmes de développement de nouvelles technologies destinées à rendre le trafic aérien plus silencieux (cf. Figure 29).

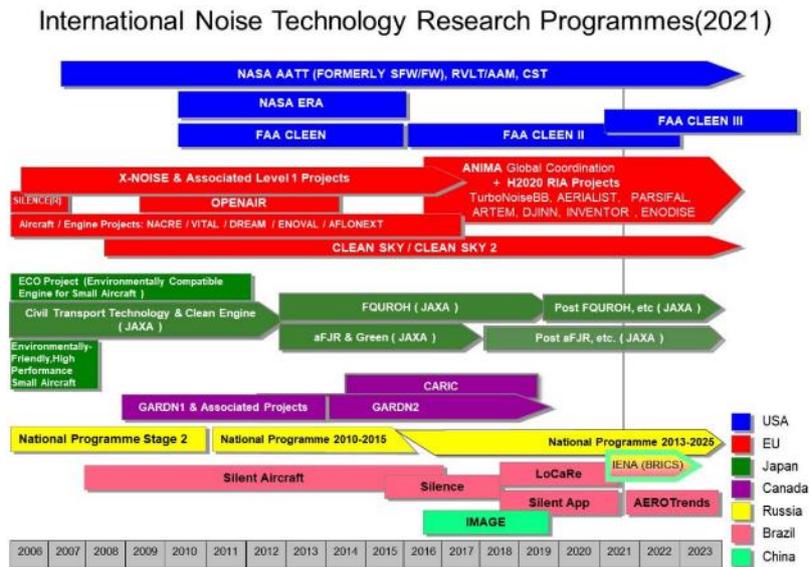


Figure 29: Programmes nationaux de recherches sur les technologies de réduction du bruit en 2021 (ICAO, 2021)

Les efforts portent à la fois sur les composants liés aux turboréacteurs : optimisation des écoulements, ajout de revêtements (liners) absorbants passifs ou contrôle actif au niveau des nacelles, mais également sur le design des composants de la cellule (structure principale) pour limiter le bruit aérodynamique (volets, profil des voilures, train d'atterrissage...) (Leylekian et al., 2014). Les objectifs ambitieux de rendre les aéronefs plus vertueux du point de vue énergétique, d'ici 2050, imposent d'envisager des technologies de rupture à l'image de l'architecture à très haut taux de dilution, dites UHBR (Safran), des CPROR (rotor ouvert contrarotatif) (Hong et al., 2024), ou encore l'intégration de la motorisation à la structure de l'avion. Ces évolutions induisent de nouvelles contraintes sur le plan acoustique, avec de potentiels effets contraires, encore à l'étude.

Le passage à des motorisations électriques ou hybrides est une alternative faisant également l'objet de recherches approfondies. Des motorisations électriques équipent d'ores et déjà de petits avions. L'adaptation aux gros porteurs présente cependant encore un verrou technologique de taille, à savoir assurer un rapport poids/puissance et autonomie compatible avec les exigences du transport aérien (Geyer and Enghardt, 2023).

1.4 Synthèse de la Partie 1

Cette première partie a permis de rappeler les principales origines du bruit généré par un avion. Le bruit émis dans l'environnement de l'avion présente des caractéristiques propres qui peuvent être traduites par des indicateurs dédiés. La nature, spectrale et temporelle des émissions et niveaux effectivement reçus au niveau des récepteurs, dépend étroitement des phases de fonctionnement des avions (décollage, atterrissage, approche...), ainsi que des conditions et de l'environnement de propagation. Les indicateurs acoustiques retenus pour caractériser les bruits d'avion devront donc permettre de caractériser ces composantes du bruit d'avion, si elles s'avèrent pertinentes d'un point de vue perceptif. On présente ci-après les principales identités du bruit aérien en lien avec les types d'indicateurs permettant de les caractériser :

- des harmoniques en dessous de 1 000 Hz ⇒ **les indicateurs de tonalité** ;
- le buzz-saw noise, dû aux pâles ;
- des tonalités marquées ⇒ **les indicateurs de tonalité** ;
- une énergie importante en-deçà de 500 Hz ⇒ **les indicateurs L_{LF}, L_{ALF}, L_{FSL}** ;
- une énergie plus faible entre 500 et 4000 Hz, en dehors des tonalités marquées ;
- une énergie sonore qui décroît au-delà de 4000 Hz ⇒ **les indicateurs de niveau sonore** ;

L'évolution des technologies de réduction du bruit du transport aérien est intimement liée à la croissance quasiment continue du trafic. Les nouvelles motorisations ont non seulement permis de réduire les émissions unitaires mais elles ont également modifié leur nature spectrale de façon significative. Il est raisonnable de penser que l'introduction de nouvelles technologies amènera à réinterroger la façon de caractériser ces sources et leur impact dans leur environnement. La capacité des indicateurs et/ou indices à rendre compte de l'ensemble de ces évolutions apparaît donc comme un critère à retenir.

Nous avons rappelé dans cette première partie l'importance de considérer l'ensemble des paramètres de propagation qui influent sur l'exposition effective des populations. L'introduction de nouveaux indicateurs doit tenir compte de ces paramètres et pas uniquement de ceux, intrinsèques aux sources considérées. Par exemple, le contenu énergétique à basses fréquences du bruit effectivement transmis dans les bâtiments est un facteur encore peu abordé dans la littérature scientifique et un véritable défi constructif lorsqu'on veut le contrôler. Des indicateurs dédiés, dans l'optique d'améliorer les connaissances scientifiques (liens bruit/impacts sanitaires), est une piste d'amélioration à considérer.

La balance entre l'augmentation des événements sonores et la baisse des émissions unitaires pose aussi la question de l'appréciation des impacts sur les populations exposées. A niveau de bruit équivalent, l'exposition à un nombre plus important d'événements moins énergétiques est-elle plus acceptable du point de vue sanitaire que l'inverse ? Des éléments de connaissances scientifiques sont proposés dans la partie suivante pour aborder cette question qui reste ouverte.

PARTIE 2. LA PERCEPTION ET LES EFFETS SANITAIRES DU BRUIT PAR ET SUR L'HOMME

La perception peut être définie comme le processus par lequel un individu recueille, organise et interprète les informations sensorielles provenant de son environnement afin de leur donner un sens, une image mentale. La perception humaine des sons et bruits, issue du système auditif, résulte de la transformation de la sollicitation physique (petite perturbation de la pression acoustique), par les organes de l'oreille, sa conversion en signal électrique et transmission au cerveau par le système nerveux. Le cortex cérébral interprète cette information notamment en termes de : fréquence (hauteur), intensité (volume), timbre, durée, et localisation spatiale. Au cours de cette chaîne de transmission, l'information contenue dans le signal physique initial est altérée, ou "filtrée". De plus, l'image mentale produite par le cerveau peut varier, d'un individu à l'autre, ou pour un même individu, en fonction de son état physique ou émotionnel, de son activité, de son vécu, de son environnement...autant de paramètres qui contribuent à une variabilité de sa sensibilité.

Objectiver et "normaliser" la perception humaine est donc un exercice complexe, empreint d'incertitudes, imparfait. Certaines composantes acoustiques peuvent être plus remarquables pour les personnes que d'autres. Les travaux menés dans le domaine de la psycho-acoustique, dont les bases "modernes" remontent au 19^e siècle, ont permis d'adopter progressivement des méthodes, indicateurs et normes pour caractériser la perception acoustique humaine.

Au-delà de la perception, le bruit agit comme un agent physique qui induit une réaction physiologique du corps humain. C'est un signal d'alerte, qui peut signaler un danger auquel le corps doit se préparer à réagir. Ces mécanismes sont inconscients et ne disparaissent pas avec l'habituation au bruit que les personnes peuvent ressentir. Le bruit peut donc être à l'origine des mêmes effets sanitaires que le stress, notamment, d'effets sanitaires autres qu'auditifs.

Par conséquent, dans une première partie, des méthodes et résultats propres à la perception du bruit des avions et les indicateurs associés sont présentés. Dans un deuxième temps, quelques généralités sur la perception humaine sont succinctement décrites, car utiles pour la suite du présent rapport. Puis, dans une troisième partie, le modèle de stress est présenté, car nécessaire à la compréhension des phénomènes physiologiques d'apparition d'effets sanitaires de long terme. Ceux dus au bruit d'avion sont présentés dans la quatrième sous partie. Enfin, quelques études internationales récentes sont présentées, afin de présenter l'état actuel des connaissances et discuter les valeurs limites ou les démarches qui sont parfois proposées.

2.1 La perception du bruit des avions

2.1.1 Les verbalisations

Plusieurs études françaises en laboratoire ont été réalisées et ont permis de recueillir des verbalisations relatives au bruit des avions. Ces verbalisations nous renseignent sur les dimensions acoustiques retenues par des auditeurs de bruits d'avion et permettent donc d'aiguiller les efforts de caractérisation sur les dimensions perceptivement pertinentes.

Ainsi, (Barbot, 2008) a pu recueillir différentes verbalisations à propos de bruit d'avion au décollage ou à l'atterrissage lors d'une étude de caractérisation perceptuelle du bruit d'avion. (Gille et al., 2017) ont pu recueillir des verbalisations à propos de bruit d'avion en survol à 1 km des pistes (33 participants), lors d'une étude en laboratoire de la gêne de court terme due au bruit d'avion.

Concernant le contenu spectral, certaines verbalisations concernent :

- le contenu hautes fréquences (**⇒ l'acuité**) ou tonal (**⇒ les indicateurs de tonalité**)
par exemple, "aigu" (40 occurrences), "strident" (18 occ.), "sifflant" (3 occ.), "perçant" (5 occ.),
"aigü" (13 occ.), "strident" (4 occ.) et "sifflement" (2 occ.)
- d'autres concernent le contenu basses fréquences (**⇒ les indicateurs basses fréquences L_{LF}, L_{ALF}, L_{FSL}**)
"grave" (12 occ.), "arrondi" (1 occ.)
"grave" (4 occ.), "sourd" (8 occ.)

Concernant l'évolution temporelle, certaines verbalisations caractérisent :

- la durée
par exemple, " long " (7 occ.), " progressif " (2 occ.),
- d'autres concernent les variations du son (par exemple, " saccadé " (4 occ.), " continu " (5 occ.)),
le mouvement de l'avion (" se rapproche " (3 occ.), " partir " (3 occ.)),
les fluctuations du bruit (" Moment calme puis moment très aigu ")

Enfin, concernant l'intensité, des verbalisations caractérisent :

- le volume (par exemple, " fort " (34 occ.), " intense " (6 occ.), " assourdissant " (3 occ.)") (⇒ **les indicateurs de niveau sonore ou la sonie**)
- et d'autres caractérisent un bruit étouffé (par exemple, " sourd " (17 occ.), " étouffé " (2 occ.))
" fort " (9 occ.), " bruyant " (2 occ.) et " intense/ intensité " (2 occ.).

Ces deux études ((Barbot, 2008) et (Gille et al., 2017)) ont montré que le contenu spectral est l'attribut le plus caractérisé par les participants, et bien que le contenu hautes fréquences (⇒ **l'acuité**) soit le plus évoqué, le contenu basses fréquences (⇒ **les indicateurs L_{LF}, L_{ALF}, L_{FSL}**) est également fréquemment évoqué. Ce propos doit cependant être nuancé au regard de l'analyse des spectres de bruit d'avion (cf. §1). En effet, les termes, autre que " aigu ", utilisés pour décrire les hautes fréquences sont " strident ", " sifflant ", " perçant ". Ce sont donc **les composantes tonales et les tonalités marquées** (⇒ **les indicateurs de tonalité**) qui sont retenues par les auditeurs dans le contenu hautes fréquences.

Il faut par ailleurs noter que les verbalisations ont été obtenues pour des sons enregistrés à l'extérieur. Ces sons sont donc représentatifs de sons entendus en extérieur et non en intérieur, après filtration par des façades. Or, les façades n'absorbent que très peu les basses fréquences, et absorbent majoritairement les moyennes et hautes fréquences. La répartition entre les hautes et les basses fréquences serait donc différente en intérieur ainsi que la répartition des verbalisations.

De plus, lors de l'analyse des spectres de bruit d'avion (cf. §1), il est apparu que l'énergie sonore au-delà de 4000 Hz était faible. Ces fréquences seront d'autant moins présentes dans les bruits à l'intérieur des logements.

2.1.2 Les basses fréquences dans le bruit aérien

Il existe plusieurs raisons pour s'intéresser aux basses fréquences dans le bruit d'avion :

- les basses fréquences sont moins absorbées lorsqu'elles se propagent à travers l'air que les fréquences plus élevées : elles persistent donc à plus grande distance des aéroports (Pueh Lee et al., 2022) ;
- le contenu basses fréquences se transmet plus facilement que le contenu moyennes et hautes fréquences à l'intérieur des bâtiments (Pueh Lee et al., 2022) ;
- la pondération A, fréquemment utilisée pour étudier le bruit dans l'environnement et dimensionner les protections (isolation de façade, d'isolation de façade, systèmes de ventilation...), " masque " une partie du contenu en basses fréquences (et en hautes fréquences) ;
- les modélisations utilisées pour évaluer l'impact du bruit aérien négligent les sources sonores en deçà de 50 Hz ;
- lors des phases de démarrage, de roulage, d'accélération sur la piste de décollage et d'inversion de poussées, les niveaux sonores les plus élevés se produisent à des fréquences inférieures à 200 Hz ;
- les connaissances concernant l'impact des basses fréquences sur les effets extra-auditifs restent peu documentées mais peuvent expliquer l'expression de la gêne dans certaines conditions (mise en vibration/rayonnement des éléments du bâtiment par exemple).

2.2 Quelques généralités sur la perception humaine

2.2.1 Les dimensions perceptives

Chaque son perçu peut être caractérisé par cinq attributs ou dimensions déterminés par la structure spectro-temporelle du signal sonore (cf. (Lorenzi, 2012)) :

- leur volume sonore (\Rightarrow **la sonie N**), attribut permettant de positionner les sons sur une échelle subjective allant du faible au fort ;
- leur hauteur, tonale s'il s'agit d'un son pur (une simple sinusoïde) ou fondamentale s'il s'agit d'un son complexe harmonique, permettant de positionner les sons sur une échelle subjective allant du grave à l'aigu (\Rightarrow **les indicateurs de tonalité, l'acuité**) ;
- leur timbre, attribut multidimensionnel permettant de discriminer deux sons de hauteur et de sonie identique ;
- leur durée subjective, c'est-à-dire la durée pendant laquelle les riverains perçoivent le bruit ;
- et la position subjective de la source sonore dans un espace auditif tridimensionnel, à savoir la position perçue de la source sonore, localisée sur un plan horizontal (azimut) et vertical (élévation).

Ces attributs perceptifs peuvent être mis en parallèle de dimensions physiques du son. Cependant, la perception humaine n'étant pas linéaire, il n'est pas possible de calculer l'attribut perceptif à partir de la dimension physique du son seule. Des indicateurs perceptifs ont été développés pour rendre compte de la perception humaine et nécessitent la mesure du spectre en fonction du temps pour être calculés.

Pour des bruits/sons complexes (composition, durée), d'autres dimensions, modifiant la perception et l'appréciation, peuvent être utilisées :

- les modulations / fluctuations temporelles sont liées à la variation de l'intensité ou fréquence du son dans le temps ;
- la durée d'exposition : à niveau constant, la durée d'exposition modifie fortement sa perception et le ressenti. C'est aussi un facteur déterminant dans l'appréciation des impacts sanitaires extra-auditifs ;
- la localisation spatiale : la direction de provenance d'un son peut avoir un impact sur son appréciation. Ainsi les bruits émis hors du périmètre visuel direct (venant de derrière ou d'au-dessus par exemple), peuvent déclencher un stress d'alerte et être perçus comme plus gênants.

2.2.2 Les pondérations acoustiques

La perception du volume sonore (\Rightarrow **la sonie N**) dépend à la fois du niveau sonore physique (\Rightarrow **les indicateurs de niveau sonore**) mais aussi du contenu spectral du son entendu, de l'évolution temporelle et spectrale du son et du filtrage temporel et fréquentiel de la perception humaine.

***Rappel théorique :** La sonie est une quantification de la perception du bruit chez l'être humain. Elle est exprimée en phone ou en sone. Par définition, 1 sone correspond à un son de fréquence 1000 Hz et de pression acoustique 40 dB et 1 sone vaut 40 phones.*

2 sones correspondent à la sensation d'écouter un son 2 fois plus important que celui qui vaut 1 sone. Il s'agit bien là d'une quantification de la perception humaine du bruit puisque le fait de doubler la pression acoustique (en Pa) ou en niveau de pression acoustique (en dB) ne procure pas nécessairement la sensation que l'amplitude de ce son a été doublée.

Diverses expériences ont ainsi été menées et ont permis d'établir des courbes d'isotonie, représentées ci-après sur la Figure 30. On constate ainsi qu'un son à 100 Hz doit avoir un niveau de pression plus élevé, et qu'un son à 4 000 Hz doit avoir un niveau de pression plus faible pour être jugés comme de même niveau de sonie.

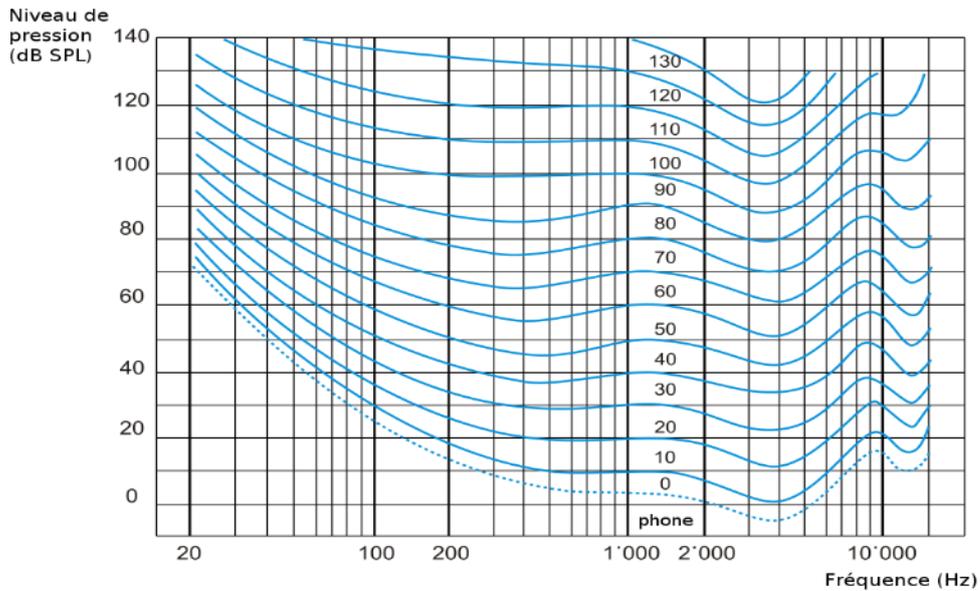


Figure 30 : Lignes isononiques normales selon la norme ISO 226 :2003.

Afin de mieux rendre compte de la perception humaine, il a été décidé d'exprimer le niveau de pression en dB(A) voire en dB(C) au lieu du dB. Pour cela, pour chaque niveau de pression pour une fréquence donnée (en octave ou en tiers d'octave), une pondération, définie dans la norme CEI 61672-1, est ajoutée (cf. Figure 31).

La pondération A a été établie pour tenir compte de la sensibilité moyenne, à un faible volume sonore, des personnes ayant une audition considérée comme normale, pour chaque bande de fréquences. Cette pondération est adaptée de la courbe d'isononie à 40 phones, c'est-à-dire pour des bruits d'intensité faible à modérée. La pondération A diminue ainsi fortement la contribution du contenu en basses fréquences d'un bruit. La pondération A est largement utilisée pour caractériser les bruits environnementaux, et tous les indicateurs énergétiques réglementaires relatifs au bruit des transports sont évalués en dB(A).

La pondération C examine davantage l'effet des sons basse fréquence sur l'oreille humaine par rapport à la pondération A. La pondération C sert fréquemment pour les mesures de pression acoustique maximale.

La pondération D a été utilisée pour la caractérisation des émissions des moteurs d'avion. Elle a été abandonnée depuis, au profit du dB(A) dans un souci de cohérence avec les indicateurs réglementaires.

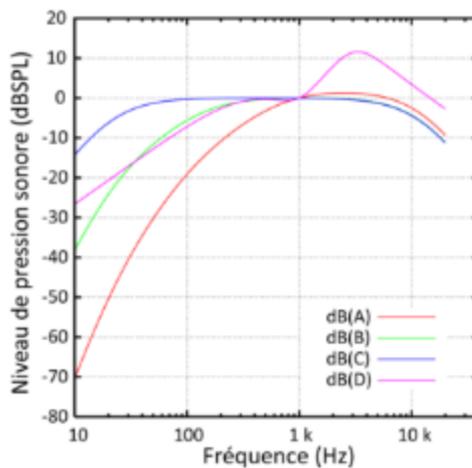


Figure 31: Pondérations A, B, C et D applicables aux niveaux de pression acoustique selon la norme CEI 61672-1

2.2.3 La perception des basses fréquences

Le facteur de correction (atténuation) important attribué aux basses fréquences pour la pondération A traduit le fait que ces sons doivent avoir un niveau sonore très élevé pour être audibles. Cependant, ces sons peuvent être perçus sans être audibles : ils peuvent être ressentis par une transmission de l'énergie vibratoire à d'autres organes, par transmission directe (contact de la peau, vibration d'un membre ou de l'ensemble du corps) ou aérienne quand les vibrations de l'air atteignent l'oreille ou la peau.

Cette perception des sons basses fréquences inaudibles a récemment conduit des chercheurs à montrer un lien entre contenu basses fréquences et danse lors de concert (cf. (Cameron et al., 2022)). Les auteurs suggèrent une perception par les mécanorécepteurs sur la peau ainsi que par le système vestibulaire.

Des recherches restent nécessaires afin de mieux caractériser la perception des basses fréquences par le corps humain et les éventuels effets sanitaires associés.

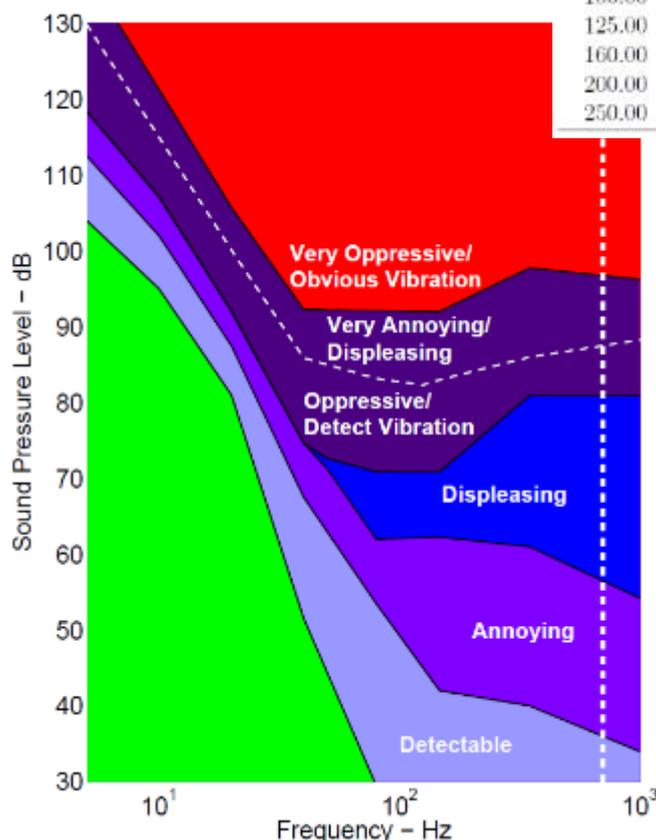
Ainsi, le Tableau 1 (issu de (More, 2011)) donne les niveaux sonores par tiers d'octave à partir desquelles plusieurs réglementations européennes s'intéressent à la problématique des basses fréquences. On remarque que :

- les fréquences considérées sont inférieures à 20 Hz (seuil habituellement considéré comme le seuil de l'audition humaine). Cela traduit :
 - la perception de ces fréquences autrement que par le sens de l'audition ;
 - l'incertitude quant à ce seuil, compte tenu des différences entre pays : l'Allemagne définit des seuils à partir de 8 Hz alors que la Suède définit des seuils à partir de 31,5 Hz. Cette incertitude peut être liée aux difficultés de mesure de ces basses fréquences et/ou aux difficultés de leur restitution par du matériel sonore.
- les niveaux sonores minimaux pour établir l'existence d'une problématique basses fréquences sont des niveaux très élevés en deçà de 20 Hz.

Frequency (Hz)	Poland - L_{A10} (dB)	Germany - DIN 45680 (dB)	Netherland - NSG (dB)	Denmark - (Night) 20dBA (dB)	Sweden (dB)	ISO 226 (dB)
8.00	-	103.00	-	-	-	-
10.00	80.40	95.00	-	90.40	-	-
12.50	83.40	87.00	-	93.40	-	-
16.00	66.70	79.00	-	76.70	-	-
20.00	60.50	71.00	74.00	70.50	-	74.30
25.00	54.70	63.00	64.00	64.70	-	65.00
31.50	49.30	55.50	55.00	59.40	56.00	56.30
40.00	44.60	48.00	46.00	54.60	49.00	48.40
50.00	40.20	40.50	39.00	50.20	43.00	41.70
63.00	36.20	33.50	33.00	46.20	41.50	35.50
80.00	32.50	28.00	27.00	42.50	40.00	29.80
100.00	29.10	23.50	22.00	39.10	38.00	25.10
125.00	26.10	-	-	36.10	36.00	20.70
160.00	23.40	-	-	33.40	34.00	16.80
200.00	20.90	-	-	-	32.00	13.80
250.00	18.60	-	-	-	-	11.20

Tableau 1: Critères définis par des pays européens pour l'identification d'un problème de basses fréquences. Les niveaux sonores supérieurs à ces critères constituent un problème de basses fréquences.

Source : (More, 2011)



Ainsi, plusieurs études portent sur la définition de seuils pour différentes sensations liées aux basses fréquences. On peut notamment citer les travaux de (Nakamura and Tokita, 1981) qui ont mesuré en laboratoire des seuils de détection, de gêne, de déplaisir, d'oppression et de vibration sur l'intervalle de 5 à 700 Hz (cf. Figure 32, au-delà de 700 Hz, les courbes sont obtenues par extrapolation). Cette figure montre que les niveaux sonores doivent être élevés pour les fréquences inférieures à 125 Hz (ou basses fréquences) pour susciter une sensation mais également qu'en deçà de 20 Hz, les sons peuvent être détectables et susciter des sensations désagréables.

Figure 32 : Courbes de Nakamura et Tokita (1981) définissant les sensations associées à des basses fréquences et à des niveaux sonores.

La ligne verticale à 700 Hz indique que les courbes entre 700 et 1000 Hz ont été obtenues par extrapolation.

Source : (More, 2011)

2.3 Le modèle de stress

N.B. : Pour la présentation du modèle de stress, plusieurs sources bibliographiques ont été (Élie-Grosboilliot, 2014; Mouketou, 2020)utilisées (Élie-Grosboilliot, 2014; Mouketou, 2020; Prof SVT 71, 2021; Salmon, 2018).

Le modèle de stress permet d'expliquer les mécanismes de court terme qui se produisent au sein du corps humain lorsqu'il est soumis à un stress, et comment ces mécanismes peuvent avoir des effets sanitaires à long terme.

Le bruit est pour le corps humain un " agent stresseur " et déclenche de ce fait un ensemble de réactions du corps permettant à l'individu d'adopter un comportement adapté et donc de répondre à la perturbation.

L'état de stress a été décrit pour la première fois par Hans Selye (1907-1982) qui a défini le syndrome général d'adaptation comme la réaction non spécifique du corps à n'importe quelle agression.

Le modèle de Selye comprend 3 phases où l'organisme répond à des agressions (cf. Figure 38):

- La phase d'alarme : l'organisme réagit à un agent stresseur auquel il n'est pas adapté. Cette phase comprend une phase de choc et une phase de contre-choc, où le corps se prépare à réagir. Cette phase dure de quelques minutes à 24 heures.
- La phase de résistance : l'organisme s'adapte à l'agent stresseur qui se prolonge en adoptant un comportement de fuite ou de combat.
- La phase d'épuisement : l'organisme a atteint son seuil de mobilisation maximale de ses ressources et cesse d'être en mesure de s'adapter au stimulus provoqué par l'agent stresseur. Cette phase entraîne l'épuisement de l'organisme et peut mener à de graves troubles et maladies. Cette phase n'est pas systématique : la phase de résistance peut et doit permettre à l'organisme de s'en sortir et de revenir à un état d'équilibre homéostatique³.



Figure 33 : Les 3 phases du stress

Source : (Prof SVT 71, 2021)

Ces trois phases se caractérisent par des réactions primaires et secondaires de l'organisme, pour répondre à la perturbation. Chaque phase est donc présentée ci-dessous et la Figure 38 synthétise les effets sur le corps humain.

2.3.1 La phase d'alarme

L'analyse de la situation et son identification comme une agression se déroulent pendant la phase choc. Dans la phase contre-choc, le système nerveux va modifier le fonctionnement des viscères afin de préparer le corps à l'étape consécutive de la phase d'alarme, la phase de résistance.

L'hypothalamus⁴ communique alors par voie nerveuse avec les viscères (appareils circulatoire, respiratoire, digestif, urinaire et reproducteur) par le système nerveux autonome impliqué dans le fonctionnement automatique et involontaire de l'organisme. Le système nerveux sympathique⁵ est mobilisé par l'hypothalamus en cas de présence d'un agent stresseur : il y a libération de noradrénaline⁶ au niveau des organes, provoquant une accélération du rythme

³ **Homéostasie** : état d'équilibre du milieu intérieur

⁴ **Hypothalamus** : structure du système nerveux central, située sur la face ventrale de l'encéphale

⁵ **Système nerveux sympathique** : a une action antagoniste à celle du système nerveux parasympathique (a pour rôle principal la réduction de la consommation d'énergie ; il est donc impliqué dans une réponse générale de relaxation); il est donc impliqué dans une réponse générale d'excitation.

⁶ **Noradrénaline ou norépinéphrine** : substance qui permet de relayer les signaux dans le système nerveux central en cas de menace, afin d'accompagner l'élaboration d'indicateurs acoustiques évènementiels du bruit des transports aériens

cardiaque et une vasoconstriction, toutes deux à l'origine d'une augmentation de la pression artérielle.

La phase d'alarme consiste à mobiliser les ressources énergétiques de l'organisme via le système nerveux sympathique dont l'action est renforcée par des médiateurs hormonaux que sont l'adrénaline⁷ et la noradrénaline (les catécholamines⁸), alors produites par la moelle de la glande surrénale. Cette phase d'alarme peut être très courte car les catécholamines ont une demi-vie de 2 minutes, permettant une résilience rapide du système.

2.3.2 La phase de résistance

Suite à l'activation de l'hypothalamus et de la mise en route de la phase d'alarme via le système nerveux sympathique, un système hormonal s'active et permet à l'organisme d'entrer en phase de résistance, à savoir être capable de réaliser dans la durée l'action choisie : fuir ou combattre.

Ainsi, l'hypothalamus mobilise le système sympathique et l'adénohypophyse^{9,10}. Les neurones de l'hypothalamus libèrent une neurohormone (la corticolibérine ou CRH), qui se fixe dans l'adénohypophyse et stimule la production et la sécrétion de l'hormone corticotrope (ACTH). Cette dernière va agir sur la corticosurrénale¹¹ et induire la production d'hormones corticosurréaliennes, notamment l'aldostérone et le cortisol¹².

- L'aldostérone favorise l'absorption des ions sodium de l'urine, de la sueur, de la salive et des sucs gastriques, permettant ainsi leur retour dans la circulation sanguine. Les ions sodium sont impliqués dans le mécanisme de pression artérielle. Dans des conditions normales, l'ACTH n'a aucun effet sur la libération de l'aldostérone. Cependant lors d'un stress intense, la forte stimulation de l'hypothalamus et l'élévation du taux sanguin d'ACTH hypophysaire qui s'en suit, intensifient la sécrétion par la corticosurrénale. Ainsi, l'augmentation de la sécrétion de l'aldostérone provoque une élévation du taux sanguin d'ions sodium à l'origine d'une réabsorption de l'eau et donc d'une augmentation de la pression artérielle.
- Le cortisol permet à l'organisme de s'adapter aux changements de l'environnement et notamment à l'intermittence de l'apport alimentaire en stabilisant la glycémie. La régulation de sa sécrétion et de celle des glucocorticoïdes de manière générale, répond à un rétrocontrôle négatif. En effet, les cellules de l'hypothalamus et de l'adénohypophyse peuvent détecter le taux de cortisol grâce à des récepteurs aux glucocorticoïdes. L'élévation du taux de celui-ci inhibe la libération de la CRH et de l'ACTH freinant ainsi l'axe hypothalamo-hypophysaire-corticosurrénalien (HHC). Ce rétrocontrôle du cortisol sur l'axe HHC est renforcé par le rétrocontrôle négatif également exercé par l'ACTH sur l'hypothalamus. Tout stress aigu perturbe ce rythme car le système nerveux sympathique prend le dessus sur les effets inhibiteurs du taux élevé de cortisol et provoque une activation de l'axe HHC et donc une forte libération de CRH. Le taux d'ACTH qui s'en suit cause un déversement de cortisol dans le sang. Le taux élevé de cortisol diminue de façon marquée la réponse immunitaire dont la réponse inflammatoire. Il active fortement la néoglucogenèse, prolongeant ainsi l'action hyperglycémisante de l'adrénaline, maintenant de fait la glycémie à un niveau élevé, permettant ainsi de tenir dans la durée (résistance).

2.3.3 La phase d'épuisement

En cas de persistance de l'agent stressant et donc de perte de contrôle de la situation, la sécrétion de cortisol devient prédominante et dépasse le seuil physiologique de tolérance. Ainsi la sécrétion de cortisol est prolongée et un état de stress chronique s'installe. Il est alors associé à un sentiment de détresse psychique d'impuissance et

de réagir le plus rapidement possible. La noradrénaline joue le rôle de neurotransmetteur

⁷ Adrénaline ou épinéphrine : substance libérée par notre corps lorsque nous sommes confrontés à une situation stressante ou dangereuse pour nous aider à faire face. L'adrénaline joue principalement le rôle d'hormone

⁸ Catécholamine : composés organiques synthétisés à partir de la tyrosine et jouant le rôle d'hormone ou de neurotransmetteur. Les catécholamines les plus courantes sont l'adrénaline (épinéphrine), la noradrénaline (norépinéphrine) et la dopamine.

⁹ Adénohypophyse : partie endocrine de l'hypophyse

¹⁰ Hypophyse ou glande pituitaire située sous le cerveau qui contrôle la production d'hormones comme le cortisol

¹¹ Corticosurrénale / médullosurrénale : partie externe/interne de la glande surrénale

¹² Cortisol : hormone qui agit sur le métabolisme glucidique et la régulation de la glycémie en cas de stress

de dépression : l'organisme est alors dépassé et s'épuise.

2.3.4 Synthèse

Le stress entraîne différentes réactions physiologiques du corps, notamment des variations des concentrations hormonales. En cas de persistance de l'agent stressant, un état de stress chronique s'installe et ces réactions physiologiques du corps perdurent, ce qui peut être à l'origine d'effets sanitaires à long terme sur l'organisme. Il est possible de mesurer l'impact du stress sur l'organisme par le suivi de certains paramètres biologiques, par exemple le cortisol salivaire.

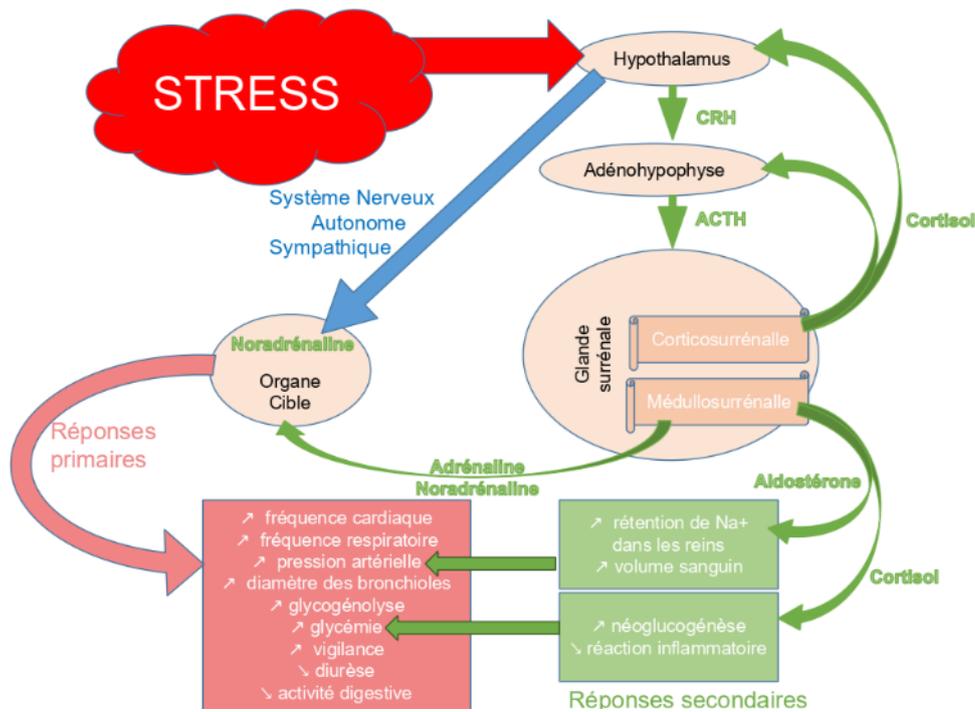


Figure 34 : Effets du stress sur l'organisme

2.4 Les effets sanitaires du bruit

Compte tenu du modèle de stress présenté ci-dessus, des réponses primaires et secondaires de l'organisme au stress (cf. Figure 38), les potentiels effets sanitaires extra-auditifs du bruit, retenus par l'Anses (cf. (Anses, 2020)), sont synthétisés dans les 2 tableaux suivants. Ils distinguent les effets sanitaires "critiques" des effets sanitaires "importants mais non critiques". Cette distinction dépend de la sévérité de l'effet, de sa prévalence¹³ ainsi que de la disponibilité d'éléments de preuve de l'association avec l'exposition sonore. De plus, pour les effets sanitaires critiques, les indicateurs¹⁴ retenus par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé ou WHO : World Health Organization) dans leurs "lignes directrices relatives au bruit dans l'environnement dans la Région européenne en 2018" (WHO, 2018) en fonction de leur représentativité et de leur validité sont indiqués en gras dans les tableaux.

¹³ **Prévalence** : proportion de personnes concernées par l'événement de santé dans une population donnée à un moment donné. Elle s'exprime en nombre de cas rapporté à une population.

¹⁴ Se référer à la partie §3.1 pour une définition du terme "indicateur"

Tableau 2 : Effets sanitaires critiques et indicateurs associés considérés par l'OMS (issu de (Anses, 2020))

Effets sanitaires critiques	Indicateurs considérés
Maladies cardiovasculaires	Prévalence, incidence, admissions hospitalières ou mortalité due aux effets suivants : <ul style="list-style-type: none"> • Cardiopathie ischémique • Hypertension artérielle • Accident vasculaire cérébral
Perturbations du sommeil	<ul style="list-style-type: none"> • Pourcentage de personnes dont le sommeil est fortement perturbé (autodéclaré, évalué selon une échelle standardisée) • Mesures de polysomnographie • Paramètres cardiaques ou de pression sanguine mesurés durant le sommeil • Modification de la motilité chez l'adulte • Perturbation du sommeil chez l'enfant
Gêne	<ul style="list-style-type: none"> • Pourcentage de personnes fortement gênées (autodéclaré, évalué selon une échelle standardisée) • Pourcentage de personnes gênées (échelle standardisée de préférence) • Compréhension écrite et orale évaluée via des tests
Effets sur la cognition	<ul style="list-style-type: none"> • Trouble cognitif évalué via des tests standardisés • Déficit de la mémoire à court ou à long terme • Déficit de l'attention • Déficit de la fonction exécutive (capacité de mémoire de travail)
Effets auditifs	<ul style="list-style-type: none"> • Atteinte auditive permanente mesurée par audiométrie • Acouphène permanent

En gras : indicateurs retenus par l'OMS.

Tableau 3 : Effets sanitaires importants et indicateurs associés considérés par l'OMS (issu de (Anses, 2020))

Effets sanitaires importants	Indicateurs considérés
Effets périnataux	<ul style="list-style-type: none"> • Naissance prématurée • Faible poids à la naissance • Anomalie congénitale
Qualité de vie, bien-être et santé mentale	<ul style="list-style-type: none"> • État de santé et qualité de vie autodéclarées • Consommation médicamenteuse (dépression et anxiété) • Dépression, anxiété et détresse psychologique autodéclarées • Troubles de l'anxiété et état dépressif évalué par un entretien • Troubles émotionnels et du comportement chez l'enfant • Hyperactivité chez l'enfant • Autres effets sur la santé mentale
Effets sur le métabolisme	Prévalence, incidence, admissions hospitalières ou mortalité dues à <ul style="list-style-type: none"> • Diabète de type 2 • Obésité

Rappel théorique : De nombreuses enquêtes de gêne due au bruit ont été menées. Ces enquêtes de gêne font partie des études épidémiologiques sur les effets du bruit. En effet, d'après l'OMS, " 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. " Par conséquent, la gêne sonore est un effet sanitaire du bruit.

La gêne peut être de court terme ou de long terme. En effet, dans le cas de la gêne de court terme, la gêne cesse quand la source de bruit cesse. Par contre, dans le cas d'une exposition de long terme, comme pour les riverains d'aéroport, il existe également la gêne de long terme : ce n'est pas l'événement unique d'un mouvement d'avion qui suscite une gêne sonore, mais la multiplicité des mouvements d'avions depuis l'installation du riverain et la perspective de continuer à être exposé à des mouvements d'avion. Dans ce cas, la persistance de l'exposition implique la persistance des effets directs sur le corps humain (réponses primaires et secondaires dans le modèle de stress présenté ci-dessus) et par conséquent, des effets sanitaires de long terme.

L'étude de la gêne de long terme permet donc de mesurer cet effet sanitaire de long terme et partiellement, d'évaluer le stress subi par l'organisme.

2.5 Résultats d'études sanitaires internationales

Dans cette section, les auteurs ont souhaité présenter quelques rapports qui compilent de multiples études sanitaires d'importance internationale, sur les effets sanitaires du bruit, notamment aérien. Ces études sont classées objectivement par date de parution. Elles proposent soit des valeurs limites d'indicateurs pour limiter les effets sanitaires du bruit, soit des méthodologies (de communication, d'évaluation des impacts sanitaires) qui peuvent venir alimenter la réflexion du Cerema dans le cadre de ces travaux. Le lecteur pourra se référer à l'Annexe 2 pour une description des différents types d'études épidémiologiques et des statistiques utilisées.

2.5.1 Recommandations établies par le Department of Defense des États-Unis (2009) pour le bruit aérien militaire

En 2009, le Département de la Défense des États-Unis a rédigé un guide intitulé "*Improving Aviation Noise Planning, Analysis and Public Communication with Supplemental Metrics – Guide to Using Supplemental Metrics*" (*Amélioration de la planification, de l'analyse et de la communication publique concernant le bruit aérien grâce à des indicateurs supplémentaires - Guide d'utilisation des indicateurs supplémentaires.*) (Department of Defense - Noise Working Group, 2009). La démarche suivie est similaire à celle du présent document :

- 1) une bibliographie sur les effets du bruit sur les populations ;
- 2) une revue des recherches internationales et des différentes réglementations pour de nouveaux indicateurs acoustiques ;
- 3) et enfin, la proposition de nouveaux indicateurs et outils d'analyse.

Ce guide recommande l'utilisation d'outils supplémentaires à l'utilisation du DNL (Day-Night Level, niveau jour-nuit) afin d'aider les planificateurs, à la fois pour prendre des mesures plus proactives afin de travailler avec les communautés locales et pour traiter plus efficacement l'utilisation de terrains non compatibles. En effet, d'après les auteurs, les contours en DNL ne permettent généralement pas de dresser une image complète de l'exposition sonore.

Considérant que les effets sanitaires du bruit sont nombreux et qu'il existe pour certains d'entre eux des conclusions en fonction de valeurs d'exposition sonore dans différentes références bibliographiques, le Département de la Défense américain propose un ensemble de grandeurs à représenter en fonction de l'effet sanitaire à considérer, sans pour autant que ces valeurs soient des valeurs réglementaires. Par exemple, les valeurs d'exposition sonore recommandées à considérer sont adaptées à l'effet auquel on s'intéresse : gêne, perturbation du sommeil la nuit, interférence du bruit aérien avec le langage en classe durant le temps scolaire.

Le Département de la Défense des États-Unis conclut ainsi que de nombreuses représentations de l'exposition sonore peuvent s'avérer pertinentes pour étudier les différents effets sanitaires possibles sur un territoire donné en fonction de l'occupation des sols exposés.

2.5.2 Avis de l'Anses sur les effets extra-auditifs du bruit environnemental (2013)

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a été saisie le 11 janvier 2010 par la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) et la Direction générale de la santé (DGS) pour la réalisation de l'expertise suivante : "*Demande d'avis sur l'élaboration d'indicateurs et de valeurs de référence dans le domaine des risques liés au bruit des transports et des activités*".

Ce document de référence se structure en trois parties :

1. bibliographie des indicateurs des effets sanitaires des bruits des transports et des autres activités pour lesquelles une étude sanitaire est réalisée ;
2. proposition, pour le contexte français, d'un ou plusieurs indicateurs de référence et valeurs de référence associées déterminant les niveaux en deçà desquels des effets sanitaires mesurables sont écartés. Ces indicateurs devraient être adaptés au bruit des transports terrestres, aux bruits des activités et aux bruits événementiels et permettre la prise en compte des brèves apparitions du bruit ;
3. proposition de valeurs de gestion pour ces indicateurs, notamment en vue d'une utilisation dans le volet "bruit" des études d'impact sanitaire des projets routiers et industriels.

Compte tenu des résultats de la bibliographie, le groupe de travail (Anses, 2013) a conclu "*qu'il ne serait pas possible de déterminer des indicateurs opérationnels répondant aux objectifs fixés, en raison d'une part des lacunes dans les*

connaissances actuelles et d'autre part de la complexité des interactions entre les divers paramètres physiques, physiologiques, humains et cognitifs impliqués dans les relations bruit-santé. Les objectifs initiaux de la saisine ont donc été revus, en accord avec les demandeurs, afin de construire une méthode d'évaluation des impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental permettant notamment d'intégrer les effets des brefs événements sonores. "

La méthodologie proposée " vise à établir une liste d'informations descriptives qui devront figurer dans les dossiers d'études d'impacts sanitaires et à fournir un état de l'art des connaissances actuellement disponibles qui permettront de guider l'interprétation de ces données afin de caractériser les possibles impacts sanitaires. "

Ainsi, le groupe de travail a établi une liste des déterminants acoustiques et non-acoustiques pertinents pour l'évaluation des effets extra-auditifs liés au bruit environnemental :

- Facteurs liés aux caractéristiques du bruit :
 - Tonalité (présence d'un son pur) ;
 - Spectre de fréquence ;
 - Type(s) de bruit (continu, événementiel, impulsionnel) ;
 - Rythme annuel d'émission sonore ;
 - Rythme hebdomadaire d'émission sonore ;
 - Prévisibilité des événements de bruit ;
 - Distribution de la fréquence d'apparition des nouveaux événements sonores.
- Facteurs de contexte environnementaux, territoriaux et humains :
 - Multi exposition (différentes sources sonores) ;
 - Co-exposition à d'autres facteurs environnementaux ;
 - Milieu acoustique défavorable (rues "canyons", réverbération, absorption, diffraction, etc.) ;
 - Présence de façades silencieuses (*backyard effect*) ;
 - Types d'urbanisme (rural / urbain) ;
 - Types d'habitat (collectif / individuel) ;
 - Qualité de l'habitat (vétusté / insalubrité / isolation phonique) ;
 - Présences de zones calmes ;
 - Valeur immobilière de l'habitat ;
 - Qualité de vie dans le quartier.
- Facteurs de contexte individuels :
 - Age ;
 - Sexe ;
 - État de santé ;
 - Niveau d'éducation ;
 - Statut socioprofessionnel / type d'activité ;
 - Revenus / précarité ;
 - Auto estimation de sensibilité au bruit ;
 - Perception de la source du bruit : peur ou affinité, signification du signal et relation socio-économique avec la source de bruit ;
 - Durée de l'exposition ;
 - Capacité d'habituation, d'adaptation, de modifications du comportement

Le groupe de travail a également recensés, parmi les études de la bibliographie, pour certains effets sanitaires immédiats (cf. Tableau 4) ou associés à une exposition chronique (cf. Tableau 5), des niveaux de seuils associés.

Tableau 4 : Effets sanitaires immédiats retenus et niveaux de bruit seuils associés
(Issu de (Anses, 2013))

Effets sanitaires immédiats	Niveaux de bruit seuils		Références
	Seuils retenus	Effets mesurés	
Perturbation du sommeil	• $L_n = 42$ dBA en façade	- accroissement de l'activité motrice durant le sommeil - perturbation du sommeil (autodéclaration) - insomnie environnementale	(OMS 2009)
	• $LA_{max} = 35$ dBA en intérieur	- modification de la structure du sommeil - activation de l'électroencéphalogramme (« arousal »)	(OMS 2009)
	• $LA_{max} = 42$ dBA en intérieur	- éveil durant la nuit	(OMS 2009)
Gêne	• $L_{den} = 42$ dBA en façade	- gêne exprimée	(OMS 2011)
	• $LA_{max} = 65$ dBA en façade	- gêne exprimée	(Martin, Tarrero et al. 2006)

Tableau 5 : Effets sanitaires associés à une exposition chronique au bruit retenus et niveaux de bruit seuils associés
(Issu de (Anses, 2013))

Effets sanitaires	Niveaux de bruit seuils		Références
	Seuils retenus	Effets mesurés	
Effets sur le système cardiovasculaire	• $L_d^{41} = 57,5$ dBA en façade	- accidents cardiovasculaires	(OMS 2011)
	• $L_n = 50$ dBA en façade	- hypertension - infarctus du myocarde	(OMS 2009)
	• $L_n = 55$ dBA en façade	- effets cardiovasculaires	(OMS 2009)
Diminution des performances scolaires	• $L_{dn} = 50$ dBA en façade	- diminution des performances cognitives	(OMS 2011)
	• $LA_{max} = 50$ dBA en intérieur	- intelligibilité de la parole à 1m	Afnor NF S31047

Les valeurs données dans les tableaux ci-dessus sont, soit des valeurs en façade, soit des valeurs en intérieur. Par conséquent, le groupe de travail (Anses, 2013) a homogénéisé ces valeurs à l'extérieur du bâtiment, afin de pouvoir comparer les résultats de mesures dans l'environnement ou les résultats de modélisation aux effets sanitaires considérés. Des valeurs seuils sont ainsi recommandées pour des indicateurs acoustiques intégrés (cf. Tableau 6) et d'autres pour des indicateurs acoustiques événementiel (cf. Tableau 7), en fonction de l'effet sanitaire considéré.

Tableau 6 : Seuils de niveaux sonores retenus pour les indices acoustiques intégrés
(Issu de (Anses, 2013))

Effet sanitaire	Indices acoustiques intégrés (dBA)							
	L_d (jour)		L_e (soir)		L_n (nuit)		L_{den} (24 h)	
	Intérieur	En façade	Intérieur	En façade	Intérieur	En façade	Intérieur	En façade
Infarctus du myocarde	-	57,5	-	-	-	50	-	-
Apprentissage scolaire	-	52	NA	NA	NA	NA	-	-
Perturbations du sommeil	NA	NA	NA	NA	-	42	-	-
Gêne	-	-	-	-	-	-	-	42

Tableau 7 : Seuils de niveaux sonores retenus pour les indices acoustiques événementiels (Issu de (Anses, 2013))

Effet sanitaire	Indices acoustiques événementiels (dBA)							
	LA _{max} (jour)		LA _{max} (soir)		LA _{max} (nuit)		LA _{max} (24 h)	
	Intérieur	En façade	Intérieur	En façade	Intérieur	En façade	Intérieur	En façade
Infarctus du myocarde	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Apprentissage scolaire	50	70-85*	-	-	-	-	-	-
Perturbations du sommeil	NA	NA	NA	NA	35	55-80*	-	-
	NA	NA	NA	NA	42	62-85*	-	-
Gêne	-	-	-	-	-	-	-	65

* intervalles de seuils d'effets en fonction de l'atténuation sonore des façades considérée (entre 20 et 45 dBA)

L'ANSES a ainsi recensé en fonction de l'effet sanitaire considéré et de la métrique pertinente, des valeurs seuils, en vue de prévenir la survenue de ces effets sanitaires. Le grand nombre de valeurs absentes des Tableau 6 et Tableau 7 montre la difficulté à établir des valeurs seuils sur des bases scientifiques solides ainsi que le besoin de recourir à des métriques différentes (ou calculées sur différentes périodes) en fonction de l'effet sanitaire considéré.

2.5.3 Les lignes directrices OMS (2018) (WHO, 2018)

Le Bureau régional de l'OMS pour l'Europe a élaboré en 2018 des lignes directrices sur la base d'études de la littérature (recensée dans les lignes en bleu à l'Annexe 3). Le principal objectif de ces lignes directrices est d'apporter des recommandations en vue de protéger la santé humaine de l'exposition au bruit provenant de diverses sources environnementales : les transports (trafic routier, ferroviaire et aérien), les éoliennes et les loisirs. Les recommandations et leur force sont énoncées par type de source

En ce qui concerne le bruit aérien, les recommandations sont les suivantes :

Recommandation	Force
En ce qui concerne l'exposition moyenne au bruit, le groupe chargé de l'élaboration des lignes directrices recommande fortement de réduire les niveaux sonores produits par le trafic aérien à moins de 45 dB L_{den} , car un niveau sonore supérieur à cette valeur est associé à des effets néfastes sur la santé.	Forte
En ce qui concerne l'exposition au bruit nocturne, le groupe chargé de l'élaboration des lignes directrices recommande fortement de réduire les niveaux sonores produits par le trafic aérien nocturne à moins de 40 dB L_{night} , car un niveau sonore nocturne supérieur à cette valeur est associé à des effets néfastes sur le sommeil.	Forte
Pour réduire les effets sur la santé, le groupe chargé de l'élaboration des lignes directrices recommande fortement aux responsables politiques de mettre en œuvre des mesures adaptées, susceptibles de réduire l'exposition au bruit moyen et nocturne provenant du trafic aérien, dans les populations exposées à des niveaux supérieurs aux valeurs indiquées dans la directive. En ce qui concerne les interventions spécifiques, le groupe chargé de l'élaboration des lignes directrices recommande de mettre en œuvre des changements d'infrastructure adaptés.	Forte

Toutes ces recommandations, pour le bruit aérien, sont qualifiées de " fortes " : " Une recommandation forte peut être adoptée dans la plupart des situations en guise de politique. La directive est alors fondée sur le principe selon lequel les effets souhaités en conséquence de l'application de la recommandation dépassent les effets indésirables. La recommandation repose sur la qualité des données scientifiques indiquant un bénéfice net, combinées à des informations sur les valeurs, les préférences et les ressources ; cette recommandation doit être mise en œuvre dans la plupart des circonstances. " (WHO, 2018)

Les valeurs recommandées par l'OMS en 2018 pour la région Europe sont des valeurs d'exposition très basses, bien inférieures aux valeurs réglementaires actuelles en France. Par exemple, la zone III des Plan de Gêne sonore correspond à une exposition avec un L_{den} inférieur à 55 dB(A).

Ces recommandations ont fait l'objet de critiques, notamment en ce qui concerne la sélection des études ayant permis de les établir (Gjestland, 2019). Certains biais méthodologiques comme : la surreprésentation de classes de population particulièrement sensibles au bruit (plus de 45 ans) dans la moitié des études ayant servi à établir les recommandations ; l'utilisation de questionnaires d'enquête ne respectant le cadre normatif habituel (ISO 1996-1) ; l'utilisation par l'OMS de données considérées comme non-représentatives par certains chercheurs (scores de gêne

très supérieurs et liés à des situations particulières) ; la procédure d'analyse cumulée des résultats ignorant les **facteurs non-acoustiques**, ceux-ci pouvant expliquer près de 2/3 de la variance des résultats.

L'examen de la superposition des données exploitées et concernant 12 aéroports internationaux (Figure 35), montre en effet une dispersion très importante des fonctions dose-réponse modélisées (par régression), avec des écarts pouvant aller de 5% à 70% sur la prévalence du pourcentage de personnes se déclarant très gênées (%Highly Annoyed).

T. Gjestland remet donc en question le caractère " fort " de la recommandation, car basé sur un niveau de qualité " moyen " des fonctions dose-réponse. Il conclue dans son article que la recommandation sur le Lden devrait être de 53 dB et non 45 dB.

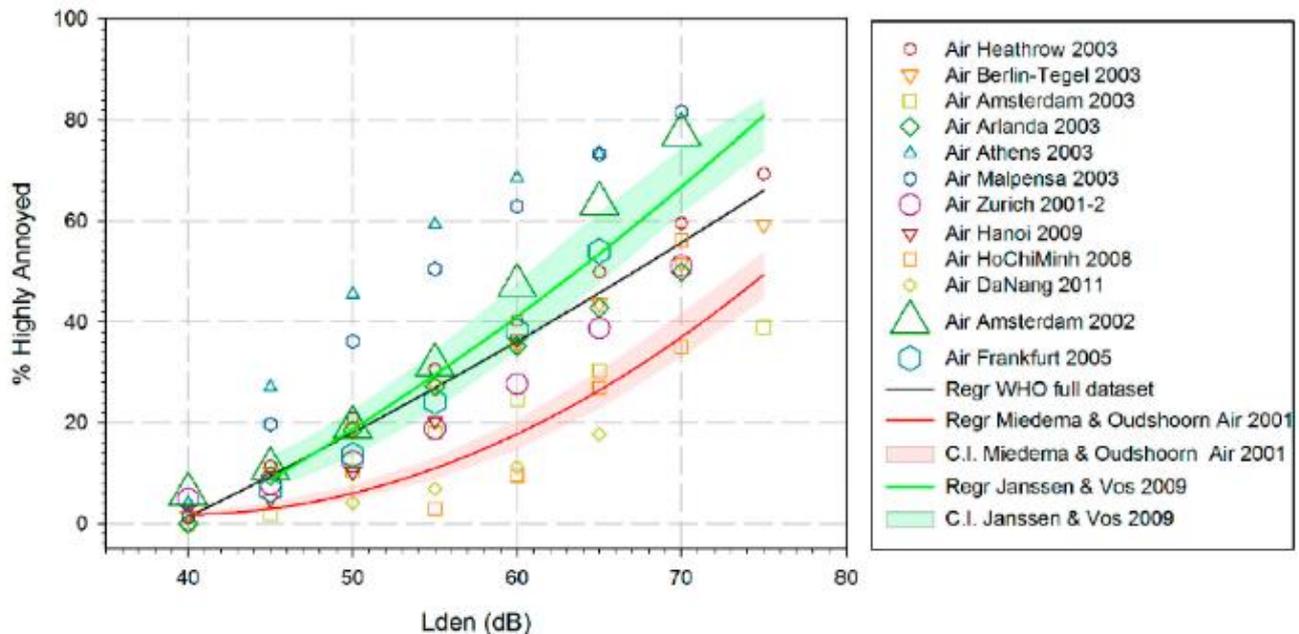


Figure 35 : Nuage de points des données de réponse des 12 études incluses dans l'ensemble de données utilisées par l'OMS pour établir ses recommandations. En ordonnée, le % de personnes se déclarant très gênées vs le niveau d'exposition en Lden. La taille des " points " est proportionnelle au nombre de répondants.

Remarques complémentaires :

- **Aucune des données utilisées** pour établir les recommandations ne concerne un **aéroport français** ;
- Les études utilisées, et notamment celles menées sur des aéroports européens, sont **antérieures à 2005**, c'est-à-dire avant l'introduction du chapitre 4 et a fortiori du chapitre 14 qui a vu une amélioration très significative des émissions acoustiques de la flotte européenne (voir §1.3.1). On peut remarquer, mais sans pouvoir conclure de manière définitive, que les courbes dose-réponse établies pour les aéroports de Da-Nang (2011) et d'Ho-Chi-Min (2008) se situent dans la partie basse des données, c'est-à-dire celle minimisant le %HA par rapport au niveau d'exposition. Elles sont également proches de la régression établie par Miedema en 2001 et ayant servi de base aux recommandations précédentes.
- En l'absence d'une meilleure connaissance de ces études il n'est pas possible d'affirmer le lien de corrélation avec une potentielle baisse globale des émissions et de leur nature (spectre), mais ces résultats suggèrent qu'une **mise à jour des données et des enquêtes** de gêne, permettant une **mise en cohérence avec les situations d'exposition actuelles, est nécessaire**.

Concernant les niveaux de preuve établis par l'OMS pour qualifier la force des liens entre les impacts sanitaires auditifs et extra-auditifs aux niveaux d'exposition au bruit, ils sont respectivement faible et très faible pour l'incidence de l'hypertension, respectivement des cardiopathies ischémiques, et " moyen " pour la gêne (forte) et certains effets cognitifs (Tableau 8).

Ce constat, qui sans remettre en cause complètement les liens établis et partagés, appelle néanmoins à poser un regard critique sur les conclusions et à souhaiter pouvoir avoir accès à des résultats d'études plus nombreux et robustes.

Tableau 8 : Niveau de preuve des données probantes sur les résultats de santé prioritaires (WHO, 2018)

Résumé des données probantes sur les résultats de santé prioritaires	Niveau de référence	Niveau de preuve
<u>Incidence de cardiopathies ischémiques :</u> Une augmentation pertinente du risque lié à l'exposition au bruit des avions se produit à 52,6 dB Lden. La moyenne pondérée des niveaux de bruit les plus faibles mesurés dans les études était de 47 dB Lden et le RR correspondant dans la méta-analyse était de 1,09 pour 10 dB.	Augmentation de 5% du risque relatif	Très faible
<u>Incidence de l'hypertension :</u> Une seule étude remplissait les critères. Pas d'augmentation significative du risque associé à une exposition au bruit dans cette étude.	Augmentation de 10% du risque relatif	Faible
<u>Prévalence de la population très gênée :</u>	Risque absolu de 10 % à un niveau d'exposition au bruit de 45,4 dB Lden.	Moyen
<u>Déficience auditive permanente</u>	Pas d'augmentation	Pas d'étude
<u>Compétences en lecture et compréhension orale chez les enfants :</u> Une augmentation pertinente du risque a été trouvée à 55 dB Lden.	Retard estimé à 1 mois	Moyen

Les recommandations de l'OMS de 2018, reprises en 2024 (WHO, 2024) auraient pu fournir des pistes sur le type d'indicateur ou d'indice intégrant la dimension événementielle du bruit. A l'inverse, l'organisation a choisi de ne pas reprendre les recommandations antérieures de 2009 et 2011 concernant le L_{Amax} , une décision motivée, d'une part par l'absence constatée de liens suffisamment robustes entre l'indicateurs et des effets sanitaires de long terme, et d'autre part pour assurer une cohérence avec les indicateurs européens Lden/Ln imposés par la directive 2002/49/CE (voir aussi §5.2.3). Cette même directive européenne n'exclue cependant pas le recours à des indicateurs (facultatifs) complémentaires pour traduire le caractère événementiel de situations d'exposition :

“ Dans certains cas, en plus de L_{den} et L_{night} et, s'il y a lieu, de L_{day} et $L_{evening}$, il peut se révéler utile d'utiliser des indicateurs de bruit spéciaux et des valeurs limites correspondantes.

Les cas suivants en sont des exemples:

- la source de bruit considérée n'est présente qu'une petite fraction du temps (par exemple, moins de 20 % du temps sur le total des périodes de jour d'une année, sur le total des périodes de soirée d'une année ou sur le total des périodes de nuit d'une année),
- le nombre d'événements sonores, au cours d'une ou de plusieurs des périodes considérées, est en moyenne très faible (par exemple, moins d'un événement sonore par heure ; un événement sonore pourrait être défini comme un bruit durant moins de cinq minutes ; on peut citer comme exemple le bruit provoqué par le passage d'un train ou d'un avion),
- la composante basse fréquence du bruit est importante,
- L_{Amax} ou SEL (sound exposure level — niveau d'exposition au bruit) pour la protection en période nocturne dans le cas de crêtes de bruit élevées, “ (extrait de DIRECTIVE 2002/49/CE) ”

2.5.4 Synthèse des connaissances scientifiques concernant les effets sur la santé liés à l'exposition au bruit issu du trafic aérien ” (Anses, 2020)

L'ANSES a publié en septembre 2020 un “ Rapport d'appui scientifique et technique ” intitulé “ Synthèse des connaissances scientifiques concernant les effets sur la santé liés à l'exposition au bruit issu du trafic aérien ” (Anses, 2020).

Ce document de référence recense les différents effets sanitaires du bruit aérien et fait état des travaux de recherche¹⁵ les concernant. L'Annexe 3 du présent document établit une synthèse sous forme de tableau du rapport de l'ANSES : pour chaque effet sanitaire, les indicateurs considérés sont repris et pour chacun, une sélection d'études les ayant étudiés sont citées. Les principaux résultats sont résumés dans la colonne " Résultats, statistiques " (cf. Annexe 2 pour une définition des statistiques utilisées). Par ailleurs, les lignes en bleu indiquent les études et résultats considérés par l'OMS pour établir les lignes directrices (WHO, 2018).

On constate donc que les effets sanitaires du bruit aérien sont nombreux. Les principales conclusions que l'on peut retenir de l'Annexe 3 sont les suivantes :

- Les études sanitaires utilisent peu d'indicateurs acoustiques pour caractériser l'exposition. Il y a les d'indicateurs énergétiques de long terme (L_{den} , L_{dn} , L_n , $L_{Aeq\ 16h}$, $L_{Aeq\ 24h}$), et en termes d'indicateurs événementiel, uniquement des d'indicateurs de niveaux moyen ou maximal (SPL ou $L_{AS,max}$) pour les études sur le sommeil ou de **nombre d'événements**, par exemple pour les accidents vasculaires cérébraux.
- Les résultats obtenus entre les différentes études sont différents, à la fois en termes de grandeurs étudiées (incidence, prévalence, mortalité, augmentation de risques, relation dose-réponse, ...) mais également en termes de statistiques (HR, RR, OR, cf. Annexe 2 pour une définition de ces statistiques). Il peut donc s'avérer complexe, voire impossible d'établir une relation dose-réponse consolidée sur plusieurs études pour certains effets sanitaires.
- **Il ressort des résultats synthétisés en Annexe 3 que des caractéristiques individuelles (notamment le sexe et l'âge) peuvent moduler l'influence du bruit sur les effets sanitaires (cf. §2.6 pour plus de détails).**
- **Sur la base de ces résultats bibliographiques, on constate l'utilisation d'un nombre restreint d'indicateurs pour décrire l'exposition sonore des populations. On constate également que les différents indicateurs sont utilisés pour étudier différentes relations effet sanitaire/bruit (exemple : L_{den} pour la gêne, SPL pour la perturbation du sommeil et le nombre d'événements pour les AVC). Aussi, sur la base de ces résultats d'études sanitaires, il n'est pas possible de sélectionner des combinaisons d'indicateurs qui permettent d'améliorer la description d'une situation d'exposition sonore et de qualifier des effets sanitaires. Par conséquent, il ne sera pas possible de choisir un nouvel indicateur (ou combinaison d'indicateurs) sur la base seule des résultats d'études sanitaires.**

2.5.5 Programme de recherche DEBATS : " Discussion sur les Effets du Bruit des Aéronefs Touchant la Santé " (octobre 2020)

DEBATS (Evrard et al., 2020) est un programme de recherche qui a pour objectif de mieux connaître et quantifier les effets du bruit des avions sur la santé des populations riveraines des aéroports français. " *Les effets sur la santé auxquels DEBATS s'intéresse sont la dégradation de l'état de santé perçu, les troubles psychologiques, la gêne due au bruit des avions, les perturbations du sommeil, et les effets sur le système endocrinien (notamment la sécrétion de cortisol, marqueur de stress), et le système cardiovasculaire (hypertension et autres maladies cardiovasculaires).* "

Le programme DEBATS a consisté en 3 études différentes (cf. Annexe 3) pour une description des différentes études, toutes menées autour de 3 aéroports français (Paris Charles-de-Gaulle, Lyon Saint-Exupéry et Toulouse Blagnac) :

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

¹⁵ " la dernière actualisation de la recherche ayant été réalisée le 10/06/2020 ", p. 18/86 de (Anses, 2020)

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

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

Les résultats de ce programme de recherche sont les suivants :

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

L'étude individuelle longitudinale suggère plusieurs associations avec une augmentation du niveau de bruit de 10 dB(A) :

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

L'étude clinique " sommeil " suggère que l'exposition au bruit des avions dégrade les paramètres objectifs du sommeil. Ainsi :

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

Ces résultats ont pour partie été repris dans la synthèse de l'Anses (Anses, 2020). Ces résultats " confirment ceux qui sont obtenus par les études menées précédemment autour d'autres aéroports dans le monde et principalement en Europe. " (Evrard et al., 2020). A nouveau, il ressort de ces résultats que des caractéristiques individuelles (ici le sexe) peuvent moduler l'influence du bruit sur les effets sanitaires (cf. §2.6 pour plus de détails).

Nouveaux modèles de fonction dose-réponse :

L'étude DEBATS a également permis de proposer des nouveaux modèles de fonctions dose-réponse (Lefèvre et al., 2020) établies à partir d'enquêtes portant sur trois aéroports français (voir Figure 36) : Paris-Charles de Gaulle, Toulouse-Blagnac et Lyon Saint-Exupéry. L'échantillon des répondants à l'enquête était composé de 1244 participants.

Les auteurs ont constaté

- d'une part que les deux modèles (M0 et M1) se positionnent entre ceux de (Miedema and Oudshoorn, 2001) et celles de (WHO, 2018). Plusieurs raisons sont avancées pour expliquer l'augmentation du ratio

%HA/Lden par rapport aux courbes de référence de 2001. Au-delà des différences et biais méthodologiques entre les études, la modification de la nature de l'environnement sonore, c'est-à-dire la baisse des émissions unitaires des avions mais l'augmentation significative du trafic, est un facteur explicatif possible. Cependant les auteurs constatent que deux des trois aéroports (Paris et Lyon) sont considérés comme étant à " faible variation du taux " (*low rate change*) du trafic, Toulouse-Blagnac étant classé dans la catégorie des " *high rate change* ", mais que l'augmentation du ratio %HA/Lden est observé sur les trois aéroports. **La croissance du trafic pourrait donc ne pas être le seul facteur explicatif.** Les auteurs regrettent l'impossibilité d'avoir pu utiliser davantage de métriques acoustiques d'événements (LAm_{ax}, NA), faute de leur disponibilité en dehors des sites d'observation.

- d'autre part, la prise en compte de facteurs environnementaux non-acoustiques, abaisse encore le ratio %HA/Lden. Parmi ces facteurs, le seul paramètre démographique positivement associés à la gêne sévère est l'âge. Les attentes vis-à-vis du cadre de la **qualité du cadre de vie** constituent également un paramètre associé au %HA.

On notera que ces résultats font écho aux critiques de (Gjestland, 2019) (voir §2.5.3), remettant en question la forte augmentation du %HA/Lden.

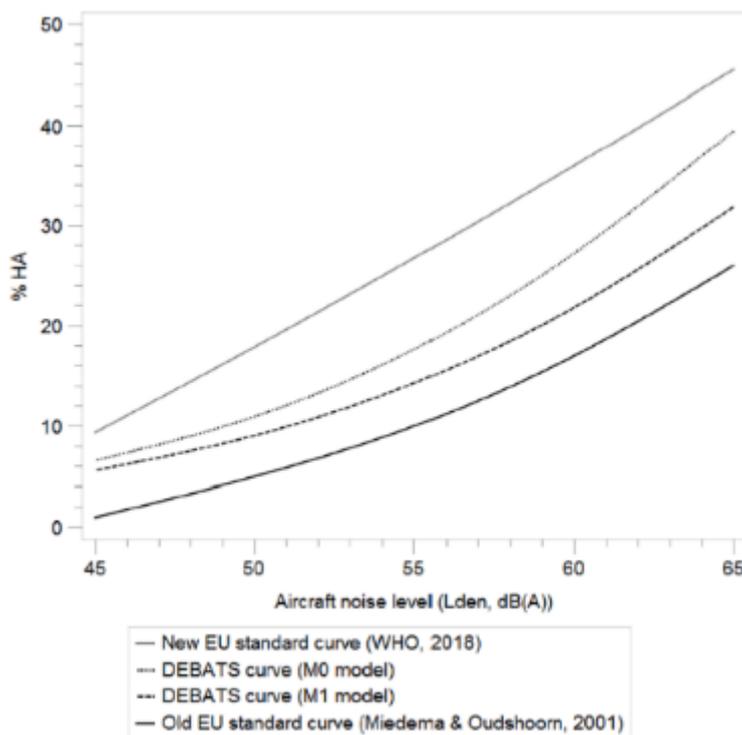


Figure 36: Relations exposition-réponse établies dans le cadre du projet DEBATS et comparée à celle proposées par l'OMS en 2018 et de (Miedema and Oudshoorn, 2001).

La courbe M0 est ajusté sur l'exposition au bruit des avions uniquement (en termes de Lden). La courbe M1 est ajustée sur l'exposition au bruit des avions et des facteurs non acoustiques (âge, sexe, éducation, activité professionnelle, propriété du logement, dépendance économique aux activités aéroportuaires, utilisation de la source de bruit, sensibilité au bruit, peur d'un accident d'avion, type de logement, présence d'espaces extérieurs, isolation des fenêtres ou du toit, satisfaction à l'égard du cadre de vie, attitudes des personnes vis-à-vis de la source et des autorités concernant les préoccupations liées au bruit des avions, et attentes concernant la qualité de vie dans le quartier.

2.5.6 Mise à jour des coefficients d'incapacité pour les états de santé (2024)

2.5.6.1 Introduction

Le 27 mai 2024, l'Organisation Mondiale de la Santé a publié le rapport intitulé " *Disability weights for noise-related health states in the WHO European Region* " (Coefficients d'incapacité pour les états de santé liés au bruit dans la région européenne de l'OMS, (WHO, 2024)). Sur la base de nouvelles études scientifiques, dont l'étude NOISE (Charalampous et al., 2024), le rapport propose une mise à jour des coefficients d'invalidité liés aux impacts sanitaires du bruit d'origine environnementale ou non. Ces coefficients sont utilisés pour le calcul des DALY (Disability Adjusted Life Years, ou Années de Vie Corrigées de l'Incapacité (AVCI)). Les DALY sont utilisés pour traduire les situations d'exposition d'une population en impacts sanitaires, mais également pour calculer les coûts externes (monétarisation) liés au bruit.

On examine dans ce qui suit les conséquences de la réévaluation de ces coefficients.

2.5.6.2 Rappel : calcul du DALY (Acouicité, 2024)

En 2011, à partir d'une étude internationale à l'échelle de l'Europe, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a mis en place une méthode destinée à quantifier l'impact de l'exposition au bruit de l'environnement sur la santé (WHO, 2011). Cette méthode a été révisée en 2018 dans les nouvelles lignes directrices relatives au bruit dans l'environnement de l'OMS (WHO, 2018).

En 2019, les relations dose-effet sont mises à jour dans la directive européenne 2002/49/CE relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement (Parlement et conseil européen, 2002).

Les principes de calcul des DALYs reposent sur l'estimation :

- Des années vécues avec la maladie ou un handicap *YLD* (Years Lived with Disability)
- Des années de vie perdues par une mort précoce *YLL* (Years of Life Lost)

Le DALY est le résultat de la somme de ces deux métriques :

$$DALY = YLD + YLL$$

Le calcul s'applique à une population, d'au moins 20 000 personnes pour assurer la robustesse statistique, en différenciant, chaque effet sanitaire *x* et la source de bruit des transports *y* (route, fer, aérien).

$$DALY_{population\ x,y} = YLD_{x,y} + YLL_{x,y}$$

avec :

$$YLD_{x,y} = N_{x,i,y} \cdot DW_x \cdot D$$

$$YLL_{x,y} = N_{x,m,y} \cdot D$$

Où :

- $N_{x,i,y}$ est le nombre de cas incidents attribuables au bruit au sein de la population de la commune.
- $N_{x,m,y}$ est le nombre de décès attribuables au bruit au sein de la population de la commune.
- DW_x est le **coefficient d'incapacité** associé à l'effet sanitaire *x*. Il traduit une dégradation de l'état de santé plus ou moins importante et varie de 0 (état de santé non dégradé) à 1 (décès). Il est dérivé d'enquêtes de population à grande échelle (Charalampous et al., 2024).
- *D* est la durée de la période d'évaluation exprimée en années, choisie à une année civile. Les conséquences de la révision des coefficients d'incapacité par effets sanitaires portent donc sur la valeur du DW_x , modifiant de façon linéaire le DALY, pour chaque effet sanitaire considéré.

Les effets sanitaires considérés pour estimer les DALY liées à l'exposition du bruit des transports sont : **la gêne, la perturbation du sommeil et les cardiopathies ischémiques.**

2.5.6.3 Nouvelles valeurs proposées OMS-2024

La révision des coefficients d'incapacité résulte de l'étude NOISE publiée en 2024.

L'étude se base sur une enquête réalisée en ligne auprès d'une cohorte de 4056 personnes (18-75 ans) en Hongrie, Italie, Suède et aux Pays-Bas. Elle comprenait des questions de comparaison par paires sur 82 états de santé différents. Contrairement aux études précédentes ayant permis d'établir les premiers coefficients d'incapacité (Global Burden of Disease, 2010), l'enquête a été conduite **en population générale et non , comme précédemment, auprès d'experts du domaine médical.** Selon les auteurs, c'est une des raisons qui expliquent les différences parfois très significatives observées.

Dans le tableau ci-dessous, on compare les coefficients d'incapacité GBD 2010 et 2024, pour les trois effets sanitaires principalement retenus aujourd'hui pour l'évaluation des impacts (la gêne, la perturbation du sommeil et les cardiopathies ischémiques).

Tableau 9 : Coefficients d'incapacité pour les 3 effets sanitaires retenus pour l'évaluation des impacts

Source : (WHO, 2011) et (WHO, 2024)

<i>DW</i>	Gêne sévère	Perturbation du sommeil	Cardiopathies ischémique*
GBD2010	0,02	0,07	0,4
OMS2024	0,011	0,01	0,374

*En considérant les coefficients d'incapacité associés aux infarctus aigus du myocarde (jours 1-2)

On constate ainsi

- une **division par 1,9** du coefficient lié à la **gêne sévère** ;
- une **division par 7** du coefficient lié à la **perturbation du sommeil** ;
- et une diminution plus marginale du coefficient associé aux cardiopathies ischémiques (6,5%).

2.5.6.4 Conséquences

- L'application de la diminution des coefficients d'incapacité liés à la gêne sévère et la perturbation du sommeil, principaux effets sanitaires considérés, aurait un impact très significatif sur l'évaluation des **coûts externes**.
- En fonction des situations d'exposition ces coûts pourraient diminuer d'un facteur compris, a priori, entre 2 et 7.
- Une première estimation (à confirmer) effectuée sur la région Auvergne-Rhône-Alpes, en utilisant les données de l'observatoire ORHANE (ORHANE, 2023), montre que le nombre de DALY passerait de 25000 à environ 8700 années de vie corrigées de l'incapacité, soit un rapport proche de 2,9.
- L'évaluation du " Coût social du bruit en France " publiée par l'Ademe (ADEME, 2021) en 2021, serait également à réviser avec une baisse significative : la part liée au bruit des transports avait été estimée à 66% (97.8 Milliards d'euros) et la part liée à la gêne et la perturbation du sommeil constitue plus de la moitié de ce chiffre .
- Cette révision impacte, à ce jour, **uniquement l'évaluation des coûts externes** liés au bruit. Elle ne modifie pas les **recommandations sur les niveaux de bruit** à respecter, les deux démarches étant découplées, pour le moment.
- Sans remettre en question la révision des valeurs de pondérations proposée par l'OMS, celle-ci met toutefois en évidence la **fragilité et les incertitudes du processus de quantification et de monétarisation des effets du bruit sur la santé**, et milite pour une mise à jour des études sanitaires. La robustesse statistique (taille de l'échantillon et représentativité géographique) des études ayant servis à ces nouvelles recommandations semblent pouvoir être discutée.

2.6 L'influence des facteurs non-acoustiques

Comme évoqué précédemment, certains facteurs non-acoustiques modulent l'impact sanitaire du bruit. Diverses études bibliographiques (notamment (Marquis-Favre et al., 2005), (Anses, 2013)) recensent ces facteurs non-acoustiques influant sur les effets sanitaires du bruit et les classent en trois catégories :

- les facteurs démographiques (e.g. âge, sexe, statut marital, catégorie socio-professionnelle) ;
- les facteurs d'attitude (e.g. la crainte de la source de bruit, la sensibilité au bruit) ;
- les facteurs situationnels (e.g. le temps passé au domicile, l'isolation acoustique du domicile, l'orientation du domicile).

Ces facteurs non-acoustiques n'ont pas tous un impact sur tous les effets sanitaires du bruit. Par conséquent, nous allons ci-après présenter, pour chaque catégorie de facteur non-acoustique, quelques exemples d'études ayant montré une influence de ces facteurs non-acoustiques sur la relation entre l'exposition au bruit aérien et un effet sanitaire, en nous appuyant notamment sur la bibliographie réalisée dans (Anses, 2020).

2.6.1 Influence des facteurs démographiques

En ce qui concerne une influence du facteur démographique " sexe ", dans le cadre du programme DEBATS, les auteurs ont observé une **prévalence de l'hypertension artérielle plus élevée chez les hommes que chez les femmes** (Evrard et al. 2017).

En réalisant une analyse poolée des données de DEBATS et de HYENA, (Baudin et al., 2019) ont également constaté une **diminution statistiquement significative de la variation horaire du cortisol, mais uniquement chez les femmes**. D'après les auteurs, cette observation appuie l'hypothèse d'un mécanisme d'action du bruit aérien conduisant à un stress psychologique chronique induisant une perturbation du fonctionnement endocrinien et du cycle circadien du cortisol. Ces modifications pourraient ensuite favoriser l'émergence de pathologies cardiovasculaires.

D'après (Anses, 2020), (Pyko et al., 2019) ont étudié les associations entre exposition au bruit des transports (seuls

ou combinés) et incidence de cardiopathie ischémique et d'AVC. Si les associations sont faibles entre chaque source d'exposition (routier, ferroviaire et aérien) et ces effets, les analyses stratifiées permettent de déceler des **associations plus fortes chez les femmes, significatives pour les cardiopathies ischémiques.** " (Halonen, 2019) rappelle qu'une étude suggérait auparavant que **les réponses au stress induit par le bruit aérien seraient plus importantes chez les femmes plutôt que chez les hommes** (mesures de cortisol) (Selander et al., 2009) tandis que le risque de maladie cardiovasculaire est généralement plus élevé chez les hommes (Deo and Albert, 2012) (Mozaffarian, 2016). "

En ce qui concerne une influence du facteur démographique " âge ", (Van Gerven et al., 2009) ont montré que les personnes de 40-50 ans expriment une gêne due au bruit plus importante que les autres.

2.6.2 Influence des facteurs d'attitude

En ce qui concerne une influence du facteur d'attitude " dépression ", d'après (Anses, 2020), (Seidler et al., 2017) ont examiné les relations entre dépressions et exposition au bruit des transport pour des personnes de plus de 40 ans vivant à proximité de l'aéroport de Francfort (Allemagne). " Une relation exposition-réponse linéaire est trouvée pour le bruit routier, tandis que pour le bruit aérien, cette association bien que significative n'est pas linéaire, atteignant un maximum pour des expositions comprises entre 50 et 55 dB LAeq 24h (...), pour décroître ensuite. Afin d'expliquer ceci, les auteurs avancent l'hypothèse d'un **biais de comportement** : aux niveaux de bruit les plus élevés, les personnes les plus vulnérables adopteraient des comportements visant à réduire ces expositions (ex : isolation phonique ou **déménagement hors de ces zones**). "

Dans le cadre de l'étude DEBATS (Baudin et al., 2018), des associations significatives ont été observées entre d'une part la gêne et les sentiments dépressifs et d'autre part entre la gêne et la détresse psychologique. D'après (Anses, 2020) " Les auteurs interrogent le sens de ces associations : les personnes gênées par le bruit aérien seraient-elles plus vulnérables aux troubles psychologiques ou bien est ce que les personnes préalablement affectées par des troubles psychologiques seraient plus à même d'être gênées ? "

En ce qui concerne une influence des facteurs d'attitude " Sensibilité au bruit " et " attitude par rapport à la source ", pour les bruits de transport et les bruits impulsifs, (Job, 1988) a observé que la sensibilité au bruit et l'attitude par rapport à la source expliquent plus de variance dans les réponses de gêne que le niveau sonore. (Miedema and Vos, 1999) ont montré que la peur de la source et la sensibilité au bruit ont une influence sur la gêne sonore plus importante que les facteurs démographiques. (Schreckenbergh and Schuemer, 2010) ont montré que l'attitude par rapport à la source et par rapport aux autorités ont un effet important sur la gêne sonore.

D'après (Anses, 2020), " (Elmenhorst et al., 2016) montrent qu'une perception négative du trafic aérien est significativement associée à des altérations de la qualité du sommeil (augmentation du temps d'endormissement, modification de l'architecture du sommeil). Néanmoins, si cette relation est bien significative, les auteurs s'interrogent sur le sens de la causalité de cette association : cette perception négative constitue-t-elle un facteur de vulnérabilité individuelle au bruit ou bien est-elle une conséquence des perturbations du sommeil ? "

Afin de tenir compte de l'influence de la sensibilité au bruit sur la relation entre exposition au bruit et gêne sonore, (Gille et al., 2016) proposent une modification du calcul des relations dose-réponse de (Miedema and Oudshoorn, 2001) et (Miedema and Vos, 2003). Les courbes dose-réponse ainsi obtenues (cf. Figure 37) dépendent de la source, du niveau de sensibilité (peu sensible, moyennement sensible, très sensible) et du niveau de gêne considéré (peu gêné, moyennement gêné, très gêné). En fonction de la sensibilité de la population et de l'exposition sonore, il est alors possible d'estimer le pourcentage de personnes très gênées par exemple. Les différences d'allure des courbes montrent l'influence de la sensibilité au bruit. Il convient cependant de noter que ces courbes ont été obtenues sur un échantillon faible et nécessiteraient de nouvelles enquêtes avec la mesure de sensibilité afin d'être consolidées.

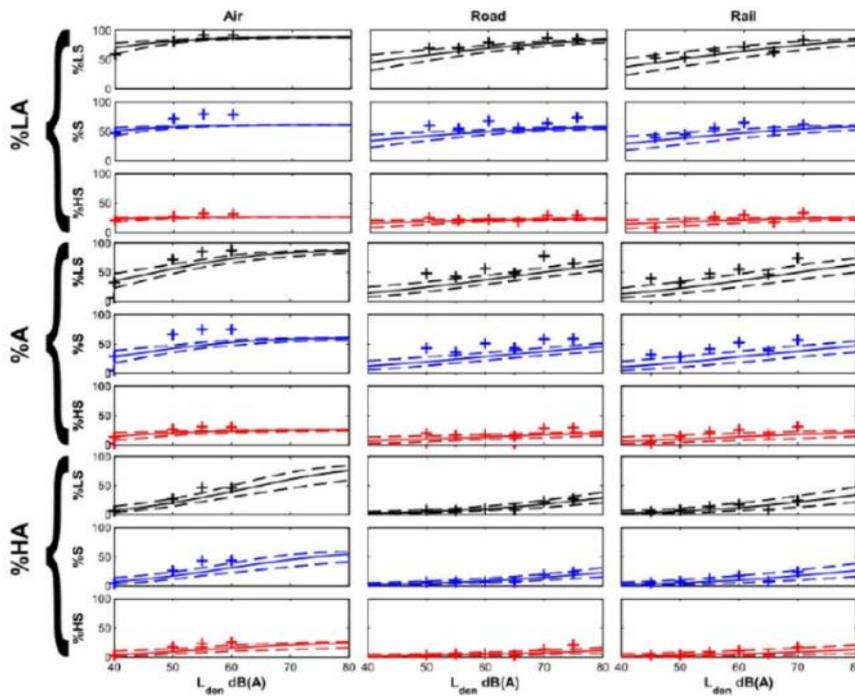


Figure 37 : Courbes dose-réponse en considérant la sensibilité au bruit pour le bruit aérien, routier et ferroviaire en fonction du L_{den} , avec les intervalles de confiance à 95%. Les pourcentages mesurés sont représentés par les croix. Source : (Gille et al., 2016)

En ce qui concerne une influence du facteur d'attitude "Habituation au bruit", d'après (Anses, 2020), "Basner et al. ont mesuré les effets du bruit aérien sur le sommeil chez des individus précédemment exposés au bruit aérien (riverains d'aéroport) et les ont confrontés à ceux d'individus non habitués au bruit aérien (Basner et al., 2015). [...] Des mesures ont été effectuées au domicile de 64 riverains d'un aéroport (Cologne Bonn), dont 20 d'entre eux ont également participé aux études en laboratoire. La comparaison des résultats de ces derniers avec ceux issus de 36 individus non habituellement exposés au bruit aérien (domicile non exposé) montre de **plus grandes probabilités d'éveil pour les riverains d'aéroport pour des événements sonores de mêmes intensités**. Pour les auteurs, ces résultats suggéreraient que l'habituation au bruit est spécifique aux expositions sonores et/ou à l'environnement sonore donné et que cette capacité d'habituation ne se transfère pas à d'autres situations sonores. L'exposition au bruit au domicile pourrait même rendre les individus plus sensibles à de nouvelles expositions."

2.6.3 Influence des facteurs situationnels

D'après (Anses, 2020), "Van den Berg et al. observent à travers l'analyse de questionnaires remplis en ligne par 6 876 riverains autour de l'aéroport d'Amsterdam (Pays-Bas) une plus forte corrélation de la perturbation du sommeil avec la gêne liée au bruit (dont le bruit des avions) qu'avec l'exposition sonore calculée au domicile (Van den Berg, Verhagen, et Uitenbroek 2014). Cette relation entre gêne et perturbation du sommeil serait conditionnée **par divers facteurs dont notamment l'âge, l'usage de somnifères et le fait de résider seul.**" (Paunović et al., 2008) ont quant à eux montré un effet de l'orientation de la chambre par rapport à la rue sur la gêne due au bruit.

Afin d'étudier l'influence de plusieurs facteurs non-acoustiques sur la gêne sonore, (Gille, 2016) a proposé une modélisation en équation structurelle de la gêne partielle due au bruit aérien en situation de multi-exposition avec le bruit routier, sur la base d'une enquête réalisée en 2012 en France.

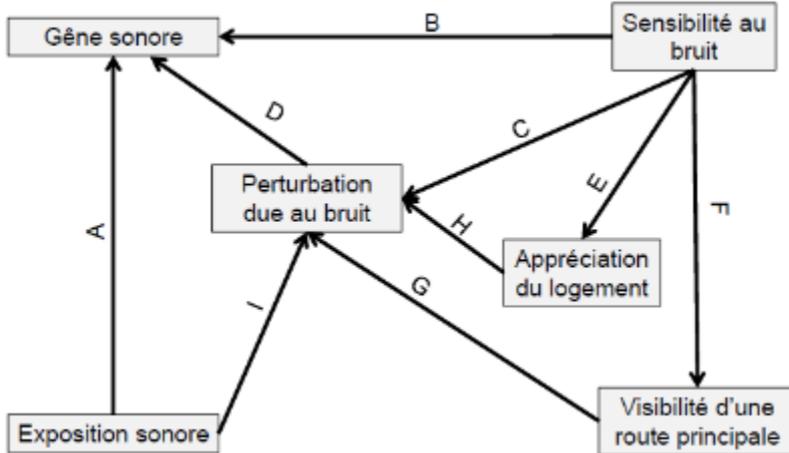


Figure 38: Modèle de la gêne sonore évalué à partir des données de l'enquête in situ

Source : (Gille, 2016)

Toutes les liaisons du modèle se sont avérées pertinentes, au regard des données de l'enquête. D'après (Gille, 2016), compte tenu que les liaisons E et H sont négatives, plus les personnes sont sensibles au bruit, moins elles apprécient leur logement et donc elles sont plus susceptibles d'être perturbées par le bruit. Au contraire, la liaison positive F entre la sensibilité au bruit et la visibilité d'une route principale depuis le logement laisse supposer que pour un paysage urbain donné, visible à partir de la pièce, les personnes sensibles au bruit se focalisent sur la route principale et que cela a une influence indirecte sur la gêne due au bruit aérien.

2.7 Synthèse de la Partie 2

Le passage de la description physique d'un bruit ou d'un son, à sa caractérisation perceptive, nécessite de considérer de nombreuses dimensions acoustiques, mais aussi non-acoustiques. Le choix de nouveaux indicateurs ou indices pour caractériser un bruit passe nécessairement par la priorisation des dimensions explicatives et qui dépendent du bruit particulier considéré. Les enquêtes de gêne et la verbalisation, retraduite en dimensions objectivables aident à la discrimination des attributs dominants.

La gêne exprimée, permet d'apprécier une situation d'exposition de façon multidimensionnelle et a largement été utilisée pour définir les seuils d'exposition réglementaires. Elle ne saurait cependant constituer le seul impact sanitaire (extra-auditif) à considérer, en particulier lorsqu'on s'intéresse aux conséquences de l'exposition chronique.

Le bruit agit comme un agent stressant pour l'organisme. En réaction à ce stress, diverses réponses de l'organisme (augmentation des fréquences cardiaque et respiratoire, de la pression artérielle, du volume sanguin, ...) vont avoir lieu afin de permettre à l'organisme de lutter contre le stress. A long terme, ces diverses réactions peuvent déclencher des effets sanitaires critiques (Maladies cardio-vasculaires ; Perturbations du sommeil ; Gêne ; Effets sur la cognition ; Effets auditifs) ou importants (Effets périnataux ; Qualité de vie, bien être et santé mentale ; Effets sur le métabolisme).

Par conséquent, de nombreuses études sanitaires se sont attachées à quantifier le lien entre exposition au bruit d'avions et effets sanitaires. Cependant, compte tenu :

- Du nombre important d'effets sanitaires ;
- Du nombre important de dimension acoustiques pouvant être prises en compte pour qualifier/quantifier l'exposition sonore (durée de l'événement/l'exposition, niveau sonore moyen/maximal, contenu spectral, ...);
- De la multiplicité des indicateurs permettant de caractériser ces dimensions acoustiques (Ld, Ln, Lden ou Ldn ; Lmax ; SEL ; NA(Lmax) ou NA(SEL) ; TA...);
- De la difficulté à mettre en relation des caractéristiques acoustiques de court terme avec des effets sanitaires de long terme ;
- De la variabilité interindividuelle des participants à l'étude en termes de :
 - Facteurs démographiques (par ex, sexe, âge, ...),
 - Facteurs d'attitude (par ex, dépression, sensibilité au bruit, attitude par rapport à la source, habitude au bruit, ...)

- Et facteurs situationnels (par ex, usage de somnifère, fait de résider seul, visibilité d'une source sonore, co-exposition, multi-exposition, ...)

il n'a pas été possible d'établir des relations dose-réponse pour tous les effets sanitaires connus du bruit aérien. De plus, lorsque des relations dose-réponse ont pu être établies, la réalisation de nouvelles études sanitaires a pu amener à mettre à jour ces relations. Cette modification des relations précédemment établies interroge sur les raisons de cette évolution. Cette modification peut-elle être expliquée par :

- Une évolution technologique ?
- Une évolution du trafic ?
- Une évolution de la perception de la source ?
- Une évolution de la population exposée ?

Compte tenu de la multiplicité des effets sanitaires à étudier et à mettre en relation avec de multiples caractéristiques acoustiques et non acoustiques, des recommandations ont été établies :

- Par le département de la Défense (USA) en termes de représentations de caractéristiques acoustiques pour décrire une situation d'exposition au bruit aérien,
- Par l'ANSES (France) en termes de méthode d'évaluation des impacts sanitaires (recommandations portant sur les facteurs acoustiques et sur les facteurs non-acoustiques, notamment facteurs démographiques, facteurs d'attitude et facteurs situationnels).

Pour construire des relations dose-réponse consolidées sur la base de plusieurs études sanitaires, il est souhaitable que les protocoles de mesure des différents paramètres (acoustique et non acoustique) soient aussi semblables que possibles. Aussi, ces recommandations pourraient servir de base pour la définition de protocole pour de nouvelles études sanitaires.

L'histoire de l'acoustique environnementale et plus généralement des sciences perceptives, est largement associée à la quête d'indicateurs capables de décrire la complexité du bruit. Ceux-ci peuvent participer à différents objectifs :

- Caractériser une ou plusieurs dimensions du bruit (niveau sonore, intensité maximale, tonalité, présence de basses ou de hautes fréquences...);
- Caractériser la perception par les riverains de ces dimensions sonores ;
- Caractériser l'exposition des populations et les effets sanitaires associés ;
- Caractériser tous les sons ou des sons particuliers (par exemple, il existe des indicateurs spécifiques au bruit d'avions);
- Réglementer, c'est-à-dire limiter l'exposition ;
- Informer à propos de l'exposition des populations...

Dans un premier temps (cf. §3.1), la sémantique et le processus d'élaboration d'indicateurs et d'indices sont définis, afin d'orienter la démarche de recherche d'indicateurs du bruit événementiel aérien ainsi que les modalités opérationnelles d'évaluation de ces indicateurs.

Dans la deuxième sous-partie (cf. §3.2), les indicateurs retenus et présentés sont ceux jugés pertinents au regard des parties précédentes et sont présentés tout d'abord en fonction de la grandeur caractérisée. Les familles d'indicateurs ainsi créées ont été agrégées par les auteurs du présent rapport. Ces familles ne sont pas la seule façon de classer ces indicateurs, un indicateur pouvant appartenir à plusieurs familles, mais résultent d'un choix méthodologique. C'est pour cela que le lecteur pourra trouver en Annexe 2 les indicateurs présentés individuellement en termes de définition et de calcul.

Dans un troisième temps (cf. §3.4), un benchmarking des pratiques internationales en termes de gestion du bruit aérien est réalisé. Les auteurs rappellent que ce benchmarking a vocation à illustrer l'utilisation qui peut être faite à travers le monde des différents indicateurs. Les cas d'illustration choisis servent donc d'exemple, et l'intégralité des pays/aéroports ayant la même pratique ne seront pas recensés.

La quatrième sous-partie (cf. §3.5) s'intéresse à la modélisation du bruit aérien, afin de recenser les indicateurs d'ores et déjà implémentés dans les logiciels et ceux pouvant, modulo des développements informatiques, l'être à partir des méthodes de calcul actuelles.

Enfin, une synthèse est proposée sous forme de tableau : les indicateurs sont caractérisés en fonction de leur utilisation, de la possibilité de les mesurer et/ou de les modéliser, en l'état des méthodes et outils actuelles.

3.1 Sémantique et processus d'élaboration d'indicateurs et d'indices

Dans la terminologie utilisée pour décrire les grandeurs permettant de quantifier ou qualifier une information sur un phénomène, on utilise alternativement et souvent de façon indifférenciée les termes d'"indicateurs", "indices" ou encore de métrique. Les définitions proposées dans la littérature scientifique sont nombreuses et dépendantes des domaines dans lesquelles elles s'appliquent, mais un consensus, semble se dessiner autour des définitions suivantes :

- **Indicateur** : de façon générale, dans la littérature scientifique, un indicateur est assimilable à une variable (numérique) ou à l'agrégation de variables portant une information sur un phénomène (données), ou un attribut d'un système (ex : température, pression, vitesse, niveau de pression acoustique...).
- **Indice** : pour faciliter la description d'un phénomène ou d'un système, il peut être utile d'agréger les informations de différents indicateurs. Le résultat de cette agrégation est alors dénommé "indice"
- **Métrique** : probablement issue de l'anglais *metrics*, une métrique est du point de vue étymologique, une grandeur mesurable (quantifiable). Les indicateurs constituent des métriques. Par extension, un indice serait une métrique "indirecte".

La frontière entre ces terminologies est mince et la distinction entre indicateurs et indices en particulier peut s'avérer confuse, les indicateurs étant parfois le résultat final de la combinaison d'autres indicateurs. Le Lden, par exemple, doit-il être considéré comme un indicateur ou un indice ? Force est de constater que les deux terminologies sont régulièrement employées. Construit sur la base de la mesure ou du calcul de niveaux de bruit physiques, sur les périodes de jour, soir et nuit, eux-mêmes pondérés A, puis moyennés énergétiquement et sommés avec pondérations pour tenir compte d'une sensibilité variable selon les périodes, le Lden semblerait tendre davantage du côté de l'indice.

Une distinction plus constructive dans les appellations peut être associée à leurs usages et leurs utilisateurs est rappelée par (Wu and Wu, 2012). En fonction du niveau d'agrégation des données initiales caractérisant un phénomène, les informations portées par les données (brutes)-les indicateurs-les indices s'adresseront plutôt, dans cet ordre aux : chercheurs/spécialistes-décideurs politiques-public (voir Figure 39).

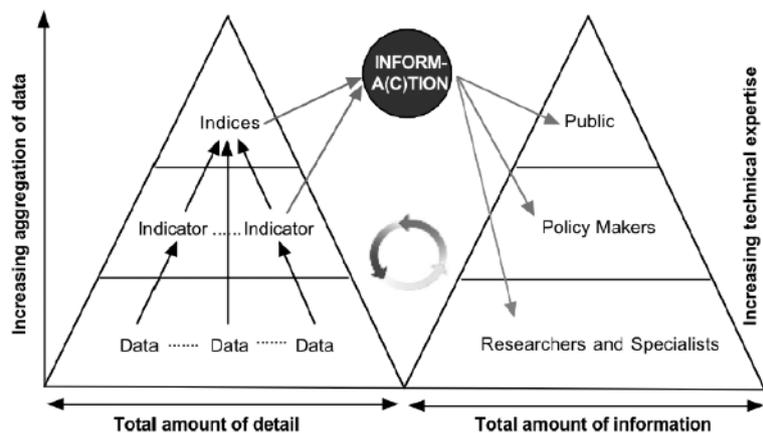


Figure 39 : Illustration de la relation entre données, indicateurs, indices et leurs (Wu and Wu, 2012)

La distinction terminologique prend alors un sens plus inspirant que le simple débat de vocabulaire, car elle nous incite, dans la démarche d'introduction de nouveaux "indicateurs" à penser en termes de bénéficiaires. Les choix qui pourraient être faits doivent ainsi être guidés par "l'utilisation et l'utilisateur".

Par exemple, la synthèse bibliographique des effets sanitaires présentée dans l'Annexe 3, rappelle les incertitudes ou lacunes de connaissances sur les effets liés au bruit. Cette question peut renvoyer au besoin de produire davantage de données spécifiques à destination de la recherche, pour dans un second temps produire les indicateurs pertinents (et éventuellement seuils/valeur de référence associés) dans un but réglementaire ou de régulation, et dans un troisième temps, pour en informer le public. L'ordre du raisonnement à son importance, car une démarche "à contre-sens" pourrait être contreproductive : construire un d'indice d'information sans argumentation scientifique peut générer de l'incompréhension et s'avérer inutile. Le questionnement, déjà évoqués sur le rôle du ratio entre nombre d'événements sonores/intensité des événements peut s'inspirer de ce raisonnement, en s'assurant, le cas échéant, que les nouveaux indicateurs proposés soit compatibles avec une démarche scientifique qui permettrait de conclure (établissement d'une fonction dose-réponse par exemple). Le même raisonnement pourrait être tenu pour la problématique des impacts potentiels des basses fréquences.

Un critère important de sélection de nouveaux indicateurs est donc la minimisation du risque de compromettre des travaux d'amélioration des connaissances par des choix non-motivés scientifiquement.

Pour éclairer ces choix il convient idéalement de construire les indicateurs avec l'ensemble des spécialistes concernés, et notamment ceux du domaine de la santé (*bottom-up*). La faible part explicative des indicateurs acoustiques dans la gêne exprimée (moins de 30%), et l'obstination à vouloir augmenter cette part, est pour partie une illustration d'une démarche inversée (*top-down*). Ce constat est malheureusement fréquent dans les tentatives de mise en relation des indicateurs de l'environnement et sanitaires. L'approche *bottom-up* est cependant relativement bien mise en œuvre dans le domaine de la qualité de l'air, où la définition d'indices (Atmo par exemple) de communication/alerte est précédée de l'identification des polluants présentant un risque avéré pour la santé ou l'environnement, puis la mise en place des indicateurs (mesurés, modélisés) pour étudier l'exposition et la confronter aux obligations réglementaires. Les indices sont amendés (ex : ajout des PM_{2,5}), de façon itérative en fonction des avancées scientifiques.

La présente étude a été motivée par une attente sociétale forte, exprimée dans le contexte des travaux menés sur les pics de bruit ferroviaires, avec pour origine une mobilisation citoyenne, relayée au niveau politique. Dans les deux cas, le constat du besoin de disposer d'une assise scientifique (sanitaire) plus robuste a été rapidement établi,

pour pouvoir dérouler les étapes *bottom-up* précédemment décrites. La mise à jour des études sanitaires dans le domaine du bruit (entre autres), s'inscrit dans le temps long (plusieurs années à dizaines d'années), pas toujours compatible avec les attentes exprimées.

Afin d'améliorer le partage de connaissance et de données entre les acteurs de l'environnement et de la santé, le Plan National Santé Environnement 4 a contribué, dès 2019, au développement de deux entités nationales nouvelles : le Green Data for Health (GD4H¹⁶) et le Health Data Hub (HDH¹⁷). Elles ont pour vocation d'identifier, de réunir et de mettre à disposition des données, indicateurs sur l'environnement et la santé, pour favoriser la transversalité et la multidisciplinarité. Le Cerema est membre du GD4H et un des contributeurs principaux sur le domaine du bruit dans l'environnement. Cette initiative prometteuse devrait permettre, au-delà de la mise en commun des données, des réflexions méthodologiques concertées.

3.2 Une classification des indicateurs/indices en fonction de la grandeur caractérisée

Afin d'éviter la confusion entre indicateur et indice on utilise ici la terminologie de métriques pour désigner l'un ou l'autre.

- **Les métriques de niveau sonore** traduisent l'intensité sonore. Différentes pondérations peuvent être appliquées en fonction du contenu spectral du bruit, afin de mieux rendre compte de la perception par l'oreille humaine. Ainsi, la pondération A (cf. § 2.2.2) est utilisée réglementairement et pour caractériser de nombreux sons de l'environnement. La pondération C est utilisée pour les sons avec un contenu basses fréquences, et la pondération G, pour les sons avec un contenu très basses fréquences (inférieur à 100 Hz).
- **Les métriques événementielles de niveau sonore**, traduisent l'intensité sonore d'un événement, délimité dans le temps.
- **Les métriques de niveau sonore pondérés par périodes**, calculées pour évaluer le niveau sonore sur une journée en attribuant des pénalités aux niveaux sonores de soirée et de nuit, afin de rendre compte de la gêne plus importante que le bruit est susceptible d'engendrer lors de ces périodes. Ces métriques bien que basés sur des niveaux physiques, introduisent donc une dimension perceptive destinée à tenir compte de la sensibilité.
- **Les métriques composites**, calculées a posteriori, à partir d'une ou plusieurs caractéristiques du bruit. Ces métriques ont été créées pour mesurer les impacts du bruit sur les populations.
- **Les métriques de tonalité**, sont utilisées pour caractériser la présence d'une ou plusieurs raies spectrales dans un bruit. Cette tonalité est alors perçue par l'oreille humaine et peut être isolée par celle-ci. Les tonalités sont donc source de gêne et plusieurs métriques ont été développées pour mesurer leur présence et leur perception par rapport au reste du signal du bruit étudié.
- **Les métriques spécifiques au bruit des aéronefs**, sont spécifiquement adaptées au bruit des aéronefs et se mesurent en PNdB.
- **Les métriques psychoacoustiques**, se distinguent des précédents indicateurs (dits acoustiques) en ce qu'elles mesurent le bruit perçu par l'oreille humaine et que chaque indicateur est lié à une sensation créée par le bruit. Ainsi, la sonie traduit l'intensité sonore perçue, la rugosité et la force de fluctuation permettent de décrire la sensation engendrée par un son modulé en amplitude.

Rappel théorique : Pour le calcul des indicateurs psychoacoustiques, le domaine fréquentiel n'est pas divisé en bandes d'octave ou de tiers d'octave mais en bandes critiques. Par la suite, on distinguera donc le spectre perceptif du spectre

¹⁶ <https://gd4h.ecologie.gouv.fr/>, Le GD4H est actuellement piloté par l'ANSES et rassemble 14 partenaires signataires d'une convention cadre : Ministère de la Transition écologique (DGPR, CGDD), Ministère de la Santé (DGS, DRESS), Ministère de l'Enseignement supérieur et de Recherche (DGRI), Inserm, Anses, Santé publique France, Ineris, Office français de la Biodiversité (OFB), CEREMA, ADEME, EHESP et Health Data Hub.

¹⁷ <https://www.health-data-hub.fr/> ; Le Health Data Hub est un groupement d'intérêt public (GIP) qui associe 56 parties prenantes, en grande majorité issues de la puissance publique. Elles sont réparties en neuf collèges et garantissent ainsi une représentation de l'ensemble de l'écosystème.

physique, en fonction de l'utilisation des bandes critiques ou d'octave pour le calcul de l'indicateur.

Le découpage fréquentiel en bandes critiques permet, entre autres, de rendre compte des phénomènes de masquage qui se produisent dans l'audition humaine, en particulier, du fait du fonctionnement de la cochlée. Lorsqu'un son complexe est composé de deux sons purs de fréquences suffisamment proches, les cellules ciliées seront excitées pareillement par ce son complexe ou par un son pur. Par conséquent, bien que le son complexe soit physiquement d'un niveau sonore plus élevé, la sensation de niveau sonore (la sonie) demeurera inchangée.

La bande critique est alors définie comme l'écart nécessaire entre deux fréquences pour que l'oreille soit capable de distinguer deux sons purs. La largeur de la bande critique ERB (Equivalent Rectangular Bandwidth) dépend de la fréquence. Les bandes critiques ne sont donc pas figées, puisqu'elles dépendent des fréquences présentes dans le signal reçu par l'oreille. Dans un souci de simplification le spectre auditif est découpé en 24 bandes critiques et une échelle a été créée : l'échelle des Bark (cf. Annexe 1).

3.3 Synthèse de la classification des indicateurs en fonction de la grandeur caractérisée

Le Tableau 10 présente, regroupés par famille, les différents indicateurs recensés dans la littérature et retenus comme pouvant permettre de caractériser le bruit d'avion ou l'exposition. Pour chaque indicateur, sont indiquées les caractéristiques acoustiques prises en compte dans le calcul (colonnes bleues). Ainsi, il est par exemple indiqué le type de spectre utilisé (physique en Hertz ou perceptif en Bark), et dans le cas de l'utilisation d'un spectre physique, si une pondération a été appliquée. Les colonnes grises indiquent les grandeurs caractérisées par l'indicateur. Enfin, les colonnes oranges indiquent si l'indicateur est une métrique d'événement unique, d'exposition cumulée ou journalière.

En considérant le Tableau 13, un premier constat peut être établi : **il existe d'ores et déjà un grand nombre d'indicateurs permettant de décrire plusieurs caractéristiques du bruit d'avion. Cependant, en fonction du besoin (réglementaire, communication, recherche), seul un nombre restreint d'indicateur est utilisé.**

Avant de proposer un nouvel indicateur, il faut donc s'interroger si un indicateur ou une combinaison d'indicateur pourrait permettre de répondre au besoin que l'on cherche à satisfaire, et également s'interroger sur les représentations de cet(s) indicateur(s).

Tableau 10 : Caractéristiques des indicateurs, classés par famille

Indicateur		Unité	Spéctre physique	Spéctre perceptif	Pondération	Niveau sonore	Intensité maximale	Répétitivité	Nombre d'événements	Evolution temporelle	Temporalité (jour/soirée/nuite)	Tonalité marquée	Présence de BF	Présence de HF	Métrique d'événement unique	Métrique d'exposition cumulée	Métrique journalière
NIVEAU SONORE																	
L _{Aeq}	A-weighted equivalent sound pressure level	dB(A)	x		A	x										x	
L _{Ceq}	C-weighted equivalent sound pressure level	dB(C)	x		C	x										x	
L _G	G-weighted sound pressure level	dB(G)	x		G	x							x		x		
LLF	Low frequency sound pressure level (16, 31.5, 63-Hz)	dB	x			x							x		x		
LNE	Adjusted sound exposure level	dB	x			x				x			x		x		
L _{A,LF}	A-weighted equivalent low frequency level (10-160 Hz)	dB(A)	x		A	x							x		x		
INDICATEURS EVENEMENTIELS DE NIVEAU SONORE																	
L _{max}	Maximum noise level	dB				x	x								x		
L _{min}	Minimum noise level	dB				x	x								x		
LFSL	Low Frequency Sound Level (25-80 Hz)	dB	x			x	x						x		x		
SEL	Sound Exposure Level	dB				x				x					x		
E _{evt}	Émergence événementielle	dB	x			x									x		
INDICATEURS DE NIVEAU SONORE PONDÉRES PAR PERIODES																	
DNL/ L _{dn}	Day-night noise level	dB(A)			A	x					x					x	
DENL/ L _{den}	Day-evening-night noise level	dB(A)			A	x					x					x	
INDICATEURS COMPOSITES																	
NPL	Noise Pollution Level	dB(A)	x		A	x				x						x	
TNI	Traffic Noise Index	dB(A)	x		A	x				x						x	
L _{xx}	Indicateur fractile	dB(A)	x		A	x				x						x	
PEI	Person-Event Index				A	x			x								x
AIE	Average Individual Exposure	%			A	x			x								x
NAT	Number of events Above a certain Threshold															x	
IR	Intermittent Ratio	%								x						x	
TA	Time Above								x	x							x

Harmonica			x	x		A	x					x					x	x
INDICATEURS DE TONALITE																		
Lta	Tonal audibility	dB				x						x						
TdBA – JNM	Joint Nordic Method based Tone-corrected Average A-weighted Sound Pressure Level	dB				x						x						
ARI	Air-conditioning and Refrigeration Institute	dB				x						x						
K	Aures Tonality			x		x						x						
TNR	Tone-to-Noise Ratio	dB		x								x						
PR	Prominence Ratio	dB		x								x						
INDICATEUR DE BRUIT AERIEN																		
PNL	Perceived Noise Level (Niveau de bruyance globale)	PndB	x			x	x										x	
PNLT	Tone-corrected Perceived Noise Level	PndB	x			x	x					x					x	
EPNL	Effective Perceived Noise Level	PndB	x			x	x			x		x					x	
IGMP	Indicateur Global Mesuré Pondéré	dB(A)	x			x												x
WECPNL	Weighted noise exposure forecast	PndB	x			x				x	x	x						x
NNI	Noise Number Index	PndB	x		A	x	x		x		x							x
CNR	Composite Noise Rating								x	x								x
NEF	Noise Exposure Forecast	PndB	x				x		x		x	x						x
ANEF	Australian Noise Exposure Forecast	ANEF	x				x		x		x	x						x
N70 Contour			x			A				x								x
INDICATEUR PSYCHOACOUSTIQUE																		
N	Loudness (Sonie)	sone		x		x					x							x
S	Sharpness (Acuité)	acum		x										x	x			x
R	Roughness (Rugosité)	asper		x							x							x
F	Fluctuation strength	vacil		x							x							x
PA	Psychoacoustic Annoyance			x		x	x				x			x	x			x
LLSEL	Loudness Level weighted Sound Exposure Level	phon	x			x					x			x				

3.4 Indicateurs réglementaires et dispositifs complémentaires d'observation de l'environnement sonore

Rappel théorique : La réglementation acoustique pour le bruit aérien diffère d'un État à l'autre. Cependant, les objectifs de ces réglementations sont communs. Ainsi, l'OACI – l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale, qui dépend de l'Organisation des Nations unies, a pour rôle de participer à l'élaboration des politiques et des normes qui permettent la standardisation du transport aéronautique international.

Ainsi, les 193 pays membres de l'OACI reprennent les documents et méthodologies établies par l'OACI dans leur réglementation, et appliquent des critères/limites, en fonction de leurs exigences. L'OACI a ainsi introduit le concept d'approche équilibrée de la gestion du bruit lié au trafic aérien qui repose sur quatre piliers :

- La réduction du bruit à la source ;
- La planification et la gestion de l'utilisation des terrains ;
- Les mesures opérationnelles d'atténuation du bruit ;
- Et les restrictions d'exploitation.

Ces quatre piliers sont déclinés dans les différentes réglementations nationales et les indicateurs utilisés pour définir des valeurs limites peuvent différer d'un État à l'autre. Ainsi, les différentes réglementations nationales se rejoignent en ce qu'elles traitent :

- Des spécificités acoustiques des aéronefs autorisés (cf. §3.4.1) ;
- De l'exposition au bruit environnement (cf. §3.4.2) ;
- De l'exploitation des plateformes aéroportuaires (cf. §3.4.1) ;
- Et des mesures de protection des riverains (cf. §1.1.8).

Dans cette partie, nous allons, pour chaque aspect des réglementations nationales, présenter les indicateurs utilisés dans différents pays de l'OACI. A noter que quelques exemples seront donnés par indicateurs, tous les pays les utilisant ne sont pas listés.

3.4.1 Les spécificités acoustiques des aéronefs utilisés : [EPNL en PndB](#) et l'exploitation des plateformes aéroportuaires

Rappel théorique : Pour réduire le bruit à la source, c'est-à-dire réduire le bruit des aéronefs, il existe deux leviers d'action principaux :

- Diminuer le bruit émis par les aéronefs : cela concerne alors les constructeurs aéronautiques et les motoristes, qui cherchent à concevoir des aéronefs plus performants d'un point de vue acoustique, soit en apportant des modifications aux moteurs, soit en modifiant le profil de l'avion (les avions électriques notamment sont considérés comme une solution prometteuse pour réduire le bruit) ;
- Interdire/limiter les avions les plus bruyants : cela est alors du ressort des autorités, qui peuvent prendre une décision soit au niveau national soit pour chaque aéroport.

Le document de référence de l'OACI concernant le bruit émis par les aéronefs est le " Volume I — Bruit des aéronefs " de l'Annexe 16. Il s'agit d'un document clé qui traite des normes et des recommandations internationales concernant le bruit des aéronefs. Ce document classe les avions par chapitre, en fonction de : la catégorie de l'aéronef (par exemple, avions à réaction, turbopropulseurs, etc.), de son poids maximal au décollage (MTOW) et de sa date de certification. On peut notamment citer :

- Le chapitre 2 : premières normes applicables aux avions à réaction conçus avant 1977 ;
- Le chapitre 3 : norme historique, introduite en 1977 ;
- Le chapitre 4 : introduite en 2006, elle impose des exigences plus strictes (10 dB de réduction par rapport au Chapitre 3) ;
- Le chapitre 14 : adoptée en 2017, cette norme s'applique aux avions certifiés après 2020. Elle impose des réductions supplémentaires de 7 dB par rapport au chapitre 4 ;

Des règles d'exploitation peuvent être mise en œuvre afin d'améliorer l'exposition sonore des riverains, sur la base d'indicateurs acoustiques. Parmi ces règles d'exploitation, on peut notamment citer :

- Les restrictions horaires,
- Les systèmes de taxation.

Pour être autorisé à opérer, un aéronef doit être certifié. Pour la partie acoustique de la certification, l'aéronef ne doit pas dépasser les normes de bruit définies dans le chapitre le concernant et mesurées par [l'EPNL en EPNdB](#). Les normes sont fixées en fonction du niveau de bruit maximal produit par l'aéronef, mesuré à 3 différents moments de son vol (au décollage, à l'atterrissage, en latéral).

3.4.1.1 Les restrictions horaires : couvre-feu, limitation des avions autorisés ou [compteur de mouvements](#)

Plusieurs aéroports à travers le monde sont concernés par des restrictions horaires, notamment la nuit pour limiter l'impact du bruit des avions sur le sommeil.

- [Aéroport de Paris-Orly \(France\) \(groupe ADP, 2024\)](#)

Depuis 1968, Paris-Orly est le seul aéroport international d'Europe à avoir un couvre-feu total entre 23:30 et 06:00.

- [Aéroport de Paris Charles-de-Gaulle \(France\) \(groupe ADP, 2024\)](#)

Des créneaux horaires sont attribués la nuit. Des décrets ont été pris pour ralentir la croissance du trafic nocturne : depuis 2012, les avions les plus bruyants sont interdits entre 22:00 et 06:00. Depuis 2014, les avions avec une marge acoustique comprise entre 8 et 10 EPNdB (*Effective perceived noise in decibels*, mesure de la bruyance d'un passage d'avion) sont également interdits.

- [Aéroport de Londres Heathrow \(Royaume-Uni\) \(Heathrow Our Company, 2024\)](#)

Il n'y a pas de décollage prévu entre 22:50 et 06:00 et pas d'atterrissage prévu entre 22:55 et 04:50. Il n'y a donc pas de vol planifié entre 22:55 et 04:50 (contrairement au cas d'Orly, il ne s'agit pas d'un couvre-feu total puisque sous condition, des avions peuvent atterrir). Par ailleurs, il n'y a pas de vol de fret entre 23:00 et 06:00.

Des restrictions sur les vols nocturnes sont appliquées depuis 1962, les dernières sont en vigueur depuis octobre 2022. Ainsi, la période nocturne est divisée en 2 périodes (qui se recouvrent) et qui portent toutes deux des restrictions sur certains types d'avions :

- la période 23:00 – 07:00
- et la période la plus restrictive : 23:30 – 06:00 appelée "[Night Quota Period](#) " (NQP) durant laquelle le nombre de mouvement est limité.
 - La limite annuelle est de 5 800 et est divisée en 3 250 en période estivale et 2 550 en période hivernale.
 - Il est possible de reporter jusqu'à 10 % de la limite hivernale " inutilisée " sur la période estivale, sans report d'une année sur l'autre.
- [Aéroport de Munich \(Allemagne\) \(Munich airport, 2024\)](#)

Les restrictions suivantes s'appliquent durant la nuit, définie comme la plage 22:00 – 06:00 :

- [Le nombre d'avions](#) est limité à 28 par nuit.
- Les avions doivent appartenir à une compagnie qui a une base d'opération à Munich.
- Les vols ne doivent pas générer un niveau sonore moyen supérieur à 75 dB(A), mesuré sur des stations dans le voisinage de l'aéroport.
- De plus, il existe un [quota annuel de bruit](#) qui ne doit pas être dépassé. En outre, [le niveau sonore continu équivalent en énergie \(Leq\)](#) ne doit pas dépasser 50 dB(A) au cours d'une nuit moyenne d'une année civile, aux points d'intersection des trajectoires de vol avec la limite de la zone de protection jour/nuit (cf. Figure 40).

Locations of Flughafen München GmbH fixed measurement points/ combined daytime and night-time control zone



Figure 40 : Position des points de mesure fixes autour de l'aéroport de Munich et zone de protection jour/nuit
Source : (Munich airport, 2024)

Entre 22:00 et minuit et entre 05:00 et 06:00, seuls les avions apparaissant sur la liste bonus du Ministère des transports allemands sont autorisés à opérer. Peuvent également être autorisés pour causes de mouvement retardé uniquement les avions conformes aux exigences du Chapitre 3 minimum.

- Aéroport de Francfort (Allemagne) (Fraport, 2024)

Les vols sont interdits entre 23:00 et 05:00. Entre 22:00 et 23:00 et entre 05:00 et 06:00, seuls 133 mouvements d'avions par nuit sont autorisés.

De plus, depuis 2015, l'aéroport de Francfort a mis en place une utilisation alternée de ces pistes en direction de l'Ouest, afin d'assurer aux résidents une heure de calme en plus du couvre-feu. Ainsi, une nuit, les résidents d'une zone peuvent dormir paisiblement de 22h00 à 5h00, tandis que ceux de l'autre zone bénéficient de ce calme de 23h00 à 6h00 – et inversement la nuit suivante.

3.4.1.2 Les systèmes de taxation : EPNL en PNdB

Pour inciter les compagnies aériennes à utiliser des avions plus silencieux, plusieurs aéroports appliquent une taxation en fonction de la certification acoustique de l'avion. Ainsi, les avions les plus bruyants doivent payer une taxe d'aéroport plus élevée. Parmi les aéroports qui appliquent un tel système de taxation, on peut citer les aéroports de Bruxelles (Brussels airport, 2024), Vienne (Vienna airport, 2025) ou Genève (Genève Aéroport, 2021) (cf. Tableau 11 pour d'autres exemples). La taxe est déterminée en fonction de l'EPNL de l'avion et 'écart avec les limites du chapitre correspondant du " Volume I — Bruit des aéronefs " de l'Annexe 16 de l'OACI. Le calcul de la taxe dépend de chaque aéroport.

Tableau 11 : Exemples d'aéroports appliquant une taxe en fonction du bruit

Source : (Calvo Torrijos et al., 2024)

CALCULATION METHODOLOGY	AIRPORT	COUNTRY	DESCRIPTION OF THE METHODOLOGY FOR THE CALCULATION OF NOISE CHARGES IN THE STUDIED AIRPORTS
Multiplier based on noise categorization	Paris Charles de Gaulle (CDG)	France	Landing fee (no take-off charge) is calculated on the basis of an amount per ton of MTOW, on which a noise multiplier is applied depending on the noise category of the aircraft and the time of day of the operation.
	Amsterdam Schiphol (AMS)	Netherlands	Landing and take-off rates and calculated on the basis of the MTOW, and a multiplier is applied to these as a percentage depending on the noise category, the time of day of operation, and the stand used by the aircraft.
Additional charge based on aircraft noise	Madrid Barajas (MAD)	Spain	The landing charge (no take-off charge) is increased by a percentage based on the aircraft's noise classification and the time of day.
	Munich (MUC)	Germany	Application of an extra noise charge for landings and take-offs based on the noise categorization of the aircraft (taking as a reference the average noise of the airport between 2020 and 2022) and the time of day.
	Zurich (ZRH)	Switzerland	Application of an extra noise charge on top of the landing noise charge (no take-off charge) taking into account the noise category set for the aircraft (compared to the airport's annual average noise) and the time of day it operates.
	Stockholm Arlanda (ARN)	Sweden	Application of an extra noise charge on top of the landing and/or take-off noise charge (as applicable for each airport) based on an airport-specific formulation that takes into account the certification of the aircraft at different stages of the flight:
	Taiwan (TPE)	Taiwan	<ul style="list-style-type: none"> • Approximation • Lateral • Overflight
Noise-based determination of landing and take-off charges	Dublin (DUB)	Ireland	
	London Heathrow (LHR)	United Kingdom	Landing and take-off charges are assigned according to the noise category of each aircraft and the time of day, being higher or lower depending on the category of the aircraft.
Surcharges and noise discounts	Tokyo Narita (NRT)	Japan	The noise rate considered is included in the landing fee (take-off is not charged), as this is calculated according to the aircraft's category, taking its 'Noise Rating Index' (NRI) as reference.
	Frankfurt (FRA)	Germany	Surcharges and discounts are applied on the basis of two different categorizations of aircraft noise. These surcharges or discounts also depend on the time of operation. Highly complex to calculate.

3.4.2 L'exposition au bruit environnemental en phase d'exploitation

Rappel théorique : La surveillance du bruit autour des aéroports est également un aspect essentiel du " Volume I — Bruit des aéronefs " de l'Annexe 16 de l'OACI. Les pays mettent en place des programmes de surveillance du bruit pour évaluer l'impact du bruit des avions sur les communautés locales. Ces programmes incluent :

- La cartographie du bruit dans les zones proches des aéroports, en utilisant des indicateurs comme **Lden** ou **Leq** sur différentes périodes, pour mesurer l'exposition au bruit des avions ;
- L'utilisation de stations de mesure acoustique pour enregistrer les niveaux de bruit en temps réel.

Les données recueillies permettent de vérifier si les niveaux de bruit respectent les normes établies et si des ajustements doivent être faits pour réduire les nuisances. Les ajustements peuvent consister en :

- La maîtrise de l'urbanisation à proximité des aéroports,
- L'amélioration des dispositifs anti-bruit entre l'aéroport et les populations (murs anti-bruit, isolement des logements, ...)

3.4.2.1 En Europe : **Lden et Ln**

La directive européenne 2002/49/CE du 25 juin 2002 impose aux États européens d'élaborer des cartes stratégiques de bruit (CBS) et des plans de prévention du bruit dans l'environnement (PPBE), à échéance quinquennale fixe (les CBS étant réalisée 2 ans avant les PPBE), notamment pour le bruit aérien autour des grands aéroports (plus de 50 000 mouvements d'aéronefs par an). En France, cela concerne 11 aéroports : Bâle-Mulhouse, Bordeaux Mérignac, Lyon St Exupéry, Marseille Provence, Nantes Atlantique, Nice Côte d'Azur, Paris Charles de Gaulle, Paris Le Bourget, Paris Orly et Toulouse Blagnac.

Les cartes de bruit stratégiques¹⁸ représentent un diagnostic cartographique des nuisances sonores. Elles permettent d'évaluer les zones affectées par le bruit, et d'estimer l'exposition des populations au bruit d'avion. Cette exposition est représentée en termes de **Lden** et de **Ln**, obtenus par modélisation du bruit du trafic aérien moyen annuel de chaque aéroport (cf. §3.7). Les valeurs de **Lden** ou de **Ln** sont représentées par aplat de couleur, par pas de 5 dB(A), de 55 à 75 dB(A).

Le PPBE¹⁹ est quant à lui un outil d'action pour prévenir et si possible réduire les effets des nuisances sonore. Les PPBE visent ainsi à prévenir les effets du bruit, voire à baisser les niveaux constatés, et à préserver les zones calmes. Ainsi, au sein d'un PPBE, on doit notamment retrouver un **décompte des populations impactées par une forte gêne** pour les cartes en indicateur **Lden** et **par une forte perturbation du sommeil** pour les cartes en indicateur **Ln**.

¹⁸ https://www.cerema.fr/fr/system/files?file=documents/2023/10/bruit_cbs-clesdelecture_2023.07.04_v8_lb.pdf

¹⁹ <https://outil2amenagement.cerema.fr/outils/plan-prevention-du-bruit-dans-lenvironnement-ppbe>

3.4.2.2 En France :

En plus des exigences européennes, la France impose également la réalisation de :

- Plan d'Exposition au Bruit (PEB) (cf. Figure 41) : il s'agit d'un document d'urbanisme fixant les conditions d'utilisation des sols exposés au bruit engendré par les avions. Le PEB vise à limiter ou interdire les constructions dans les zones impactées par ces nuisances sonores afin d'en limiter l'impact sur les populations riveraines. Le PEB est un dispositif préventif.

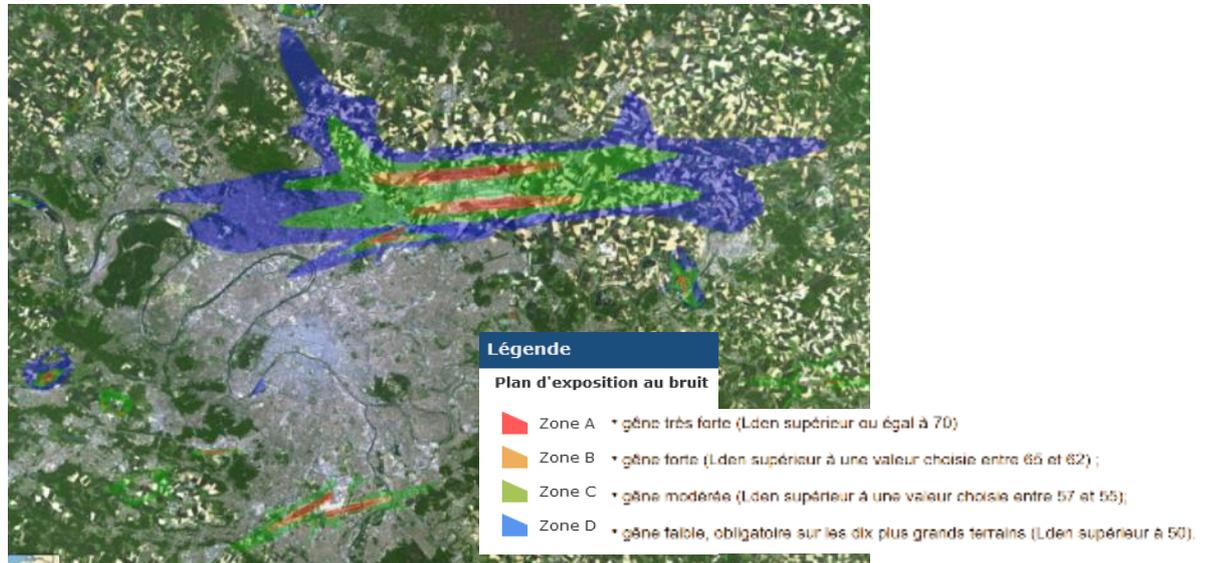


Figure 41 : Plan d'Exposition au Bruit autour des aéroports parisiens

Source : Geoportail

- et de Plan de Gêne Sonore (PGS) (cf. Figure 42) : Ce plan délimite les zones dans lesquelles les riverains d'aéroports peuvent bénéficier d'une aide à l'insonorisation de leur logement. Le PGS est un dispositif curatif :
 - la zone 1 dite de très forte nuisance comprise à l'intérieur de la courbe d'indicateur Lden 70 ;
 - la zone 2 dite de forte nuisance, entre la courbe d'indicateur Lden 70 et Lden 65 ou 62 ;
 - la zone 3 dite de nuisance modérée inclut entre la limite extérieure de la zone 2 et Lden 55.



Figure 42 : Plan de gêne sonore autour de Lyon Saint-Exupéry

Source : <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/plan-de-gene-sonore-pgs>

Un indicateur spécifique mis en place pour l'aéroport Paris-Charles de Gaulle : l'IGMP

Par l'arrêté du 28 janvier 2003 le ministère (l'équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer, à l'époque) a institué un indicateur représentatif de l'énergie sonore engendrée par l'activité aérienne de l'aérodrome de Paris - Charles-de-Gaulle. Cet indicateur global mesuré pondéré (IGMP) " détermine l'énergie sonore totale mesurée durant une année pour les décollages et pour les atterrissages, rapportée à l'énergie calculée pour l'année de référence (la moyenne des années 1999 à 2001 correspond à une valeur de 100) " (Min. Ecologie, 2025) L'IGMP est calculé par périodes glissantes couvrant 3 années. Ainsi, l'IGMP 2022 couvre les mouvements aériens des années 2019, 2020 et 2021. Il a vocation à suivre l'évolution de l'environnement sonore de la plateforme CDG. De par sa

Accompagnement pour l'élaboration d'indicateurs acoustiques évènementiels du bruit des transports aériens

spécificité, il est avant tout utilisé par le gestionnaire de l'aéroport.



Figure 43: Evolution de l'IGMP et des énergies sonores évalués entre 2013 et 2023. (DGAC, 2023)

Le rôle des observatoires en France

En complément des dispositions réglementaires certains aéroports se sont dotés de dispositifs d'information proposant des données issues de réseau de mesure (permanent et ponctuel) et pouvant proposer à des indicateurs événementiels ou agrégés.

SURVOL, est un réseau de surveillance du bruit lié au trafic aérien indépendant, accessible au public, déployé par Bruitparif. Il couvre les deux aéroports internationaux : Paris Charles de Gaulle et Paris-Orly. Grâce à un grand nombre de capteurs acoustiques répartis autour des aéroports, il permet d'accéder à une palette conséquente d'indicateurs réglementaires ou événementiels. Les données produites sont disponibles en Opendata, consultables par les riverains et peuvent également alimenter des travaux connexes (études sanitaires par exemple).

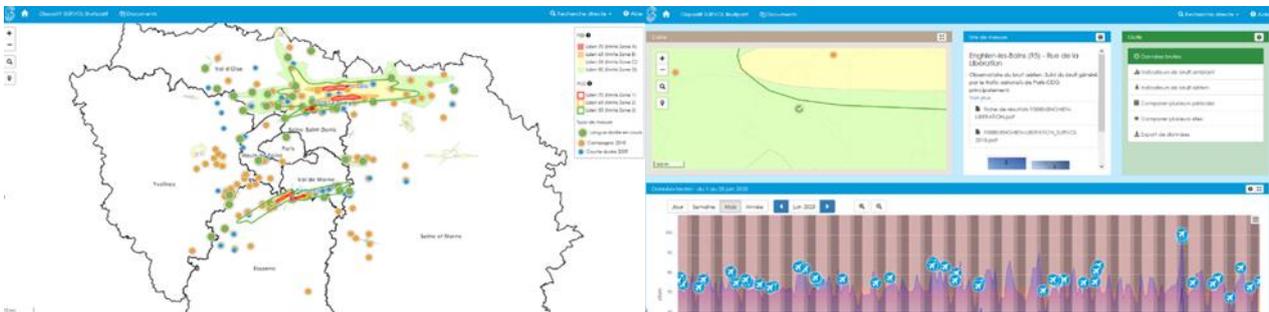


Figure 44: Plateforme d'information SURVOL Bruitparif (<https://survol.bruitparif.fr/aerial>)

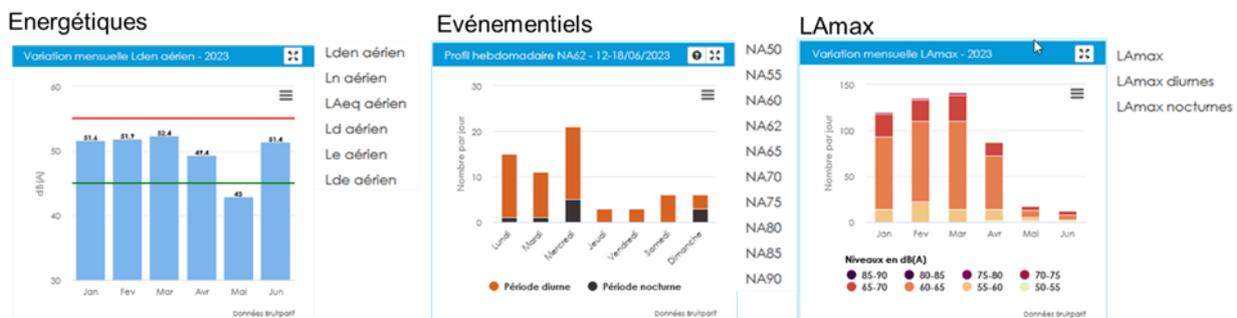


Figure 45: Exemple de représentations d'indicateurs agrégés et événementiels accessibles sur la plateforme SURVOL Bruitparif.

Rapportage de plaintes

Pour faciliter les dépôts de plaintes des riverains d'aéroports, des outils en ligne sont mis en place par les gestionnaires. On peut citer le portail " Entre voisins " (<https://entrevoisins.groupeadp.fr/>) pour les aéroports et aérodromes d'Ile de France, ou encore CONSTAS pour l'aéroport de Lyon-Saint-Exupéry (<https://riverains.lyonaeroports.com/>).

Observatoires de la co-exposition aux pollutions atmosphériques et sonores

Des initiatives régionales menées en régions Auvergne-Rhône-Alpes, depuis 2010 (<https://orhane.fr/>) et en Ile-de-France, depuis 2018 (<https://carto.airparif.bruitparif.fr/>), ont conduit à la mise en place d'observatoires ou plateformes de la co-exposition aux pollutions atmosphériques et sonores liées aux transports (routiers, ferroviaires, aériens) et à certaines industries polluantes (cf. Figure 46). L'objectif était de disposer d'une information synthétique à résolution fine, homogène et cohérente sur l'ensemble de grands territoires. Dans ce but, de nouveaux indicateurs ou indices ont été proposés pour rendre compte des enjeux prioritaires de co-exposition. ²⁰

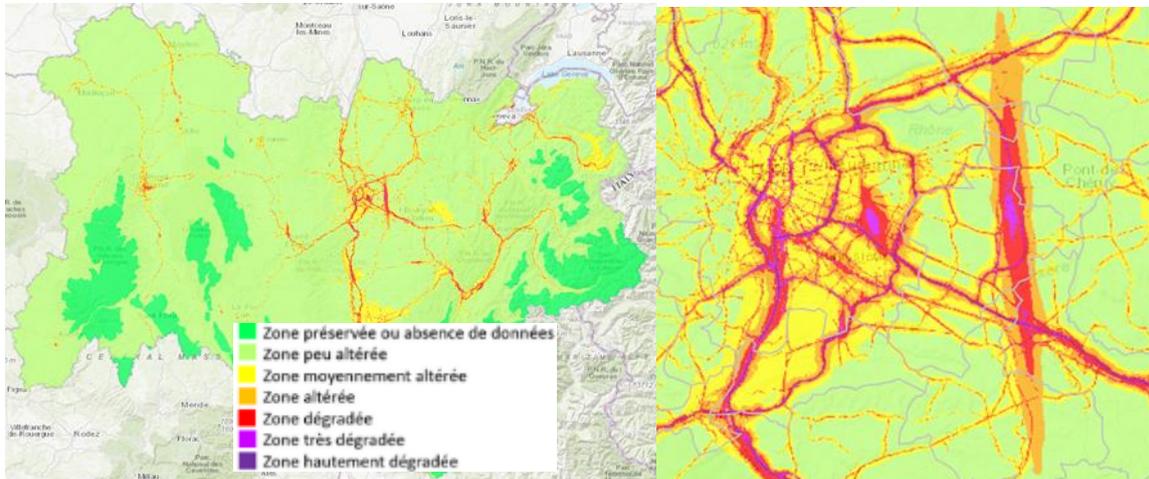


Figure 46: Cartographies de la co-exposition Air-Bruit en Auvergne-Rhône-Alpes. Orhane.fr.

A gauche, vue régionale de l'indicateur ; à droite zoom sur la région Lyonnaise. Réalisation : Acoucité-Atmo AuRA-Cerema.

Pour rappel la directive " bruit " 2002/49/CE, impose la réalisation de cartographies stratégiques par types de sources, mais laisse la possibilité de produire des cartographies de multi-exposition, sans toutefois en fixer les modalités. La représentation de l'exposition cumulée au bruit (multi-exposition) ne fait aujourd'hui pas l'objet d'un consensus scientifique. Dans le cas d'Orhane, un tel sous-indice a été calculé en se basant sur un principe de cumul de la gêne équivalente entre les sources (Atmo Aura/Acoucité/Cerema, 2022), plutôt que sur la sommation énergétique des contributions des différentes sources. Aujourd'hui ce calcul est effectué en utilisant les recommandations OMS de 2018. De plus, depuis 2024, Orhane propose des indicateurs d'impact sanitaires, calculés à l'échelle des EPCI²¹, par type d'effets (gêne, troubles du sommeil, cardiopathies ischémiques) et exprimés en années ou mois de vie ajustés sur l'incapacité (DALY).

La méthodologie de représentation adoptée sur l'Ile de France diffère sensiblement avec l'utilisation d'une représentation à deux dimensions permettant de conserver une lecture par type de nuisance (Figure 47).

²⁰ Le projet ONNE (Observatoire National des Nuisances Environnementales), lancé en 2024 par le Cerema, vise une couverture nationale de la cartographie de co-exposition Air-Bruit.

²¹ Établissement public de coopération intercommunale

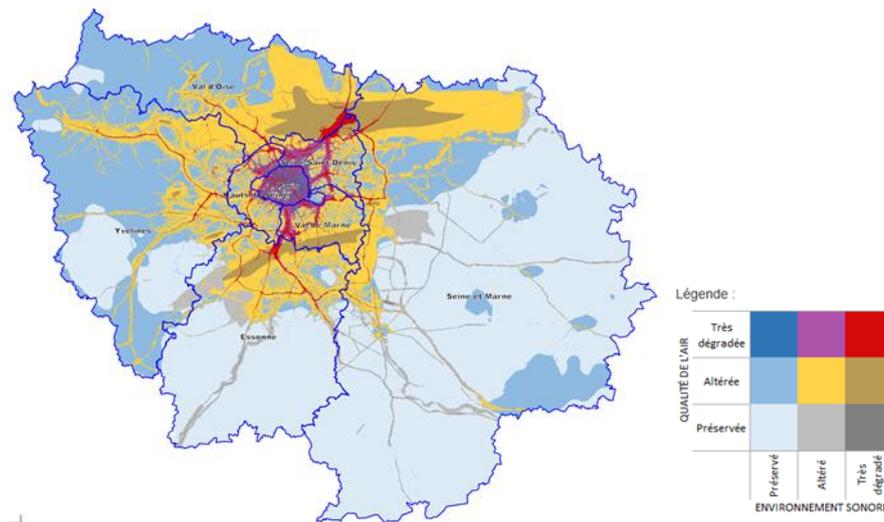


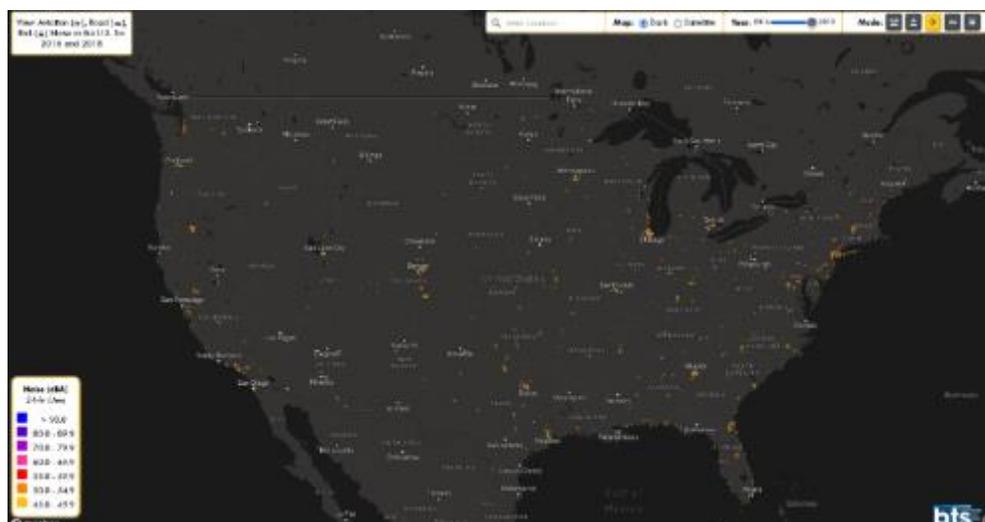
Figure 47: Cartographies de la co-exposition Air-Bruit en Ile-de-France
 Source : (carto.airparif.bruitparif.fr)

Dans la partie §2.6 de ce document, **l'importance des paramètres non-acoustiques** a été rappelée. Les démarches d'observatoires telles que celles présentées ci-dessus, permettent d'élargir le spectre des déterminants de la santé considérée et de mieux appréhender la complexité, multifactorielle des situations d'exposition et **la qualité de l'environnement de vie**. Ainsi, les données de l'observatoire Orhane sont également versées dans l'observatoire santé environnement (OSE : <https://www.balises-auvergne-rhone-alpes.org//OSE.php>) de la région Auvergne-Rhône-Alpes, et peuvent être mise en relation avec d'autres indicateurs de l'état de santé des populations, mais aussi des déterminants socio-économiques (niveau de vie, d'éducation...), des caractéristiques populationnelles (âge, sexe...).

3.4.2.3 Aux États-Unis d'Amérique : [DNL ou 24-hr LAeq](#)

Le règlement 14 CFR Part 150 de la FAA définit la méthodologie et les critères à suivre pour la création des cartes de bruit aéroportuaire (cf. Figure 48 et Figure 49). Ces cartes de bruit sont ensuite utilisées pour :

- La planification urbaine : Déterminer les zones où les nouvelles constructions doivent être limitées ou insonorisées, en fonction de l'exposition au bruit (prévention).
- La compensation pour les résidents et les établissements scolaires : les zones fortement exposées au bruit (DNL \geq 65 dB) sont éligibles à des subventions pour l'insonorisation des bâtiments, voire si nécessaire l'achat de terrains autour des aéroports pour les rendre inhabités et le relogement des habitants.
- Le suivi de l'efficacité des mesures de réduction du bruit : Après l'implantation de nouvelles stratégies de gestion du bruit (par exemple, le changement de trajectoire des vols, l'amélioration de la flotte d'avions, la construction de murs ou de barrières anti-bruit.), les cartes sont mises à jour pour mesurer l'impact des actions.



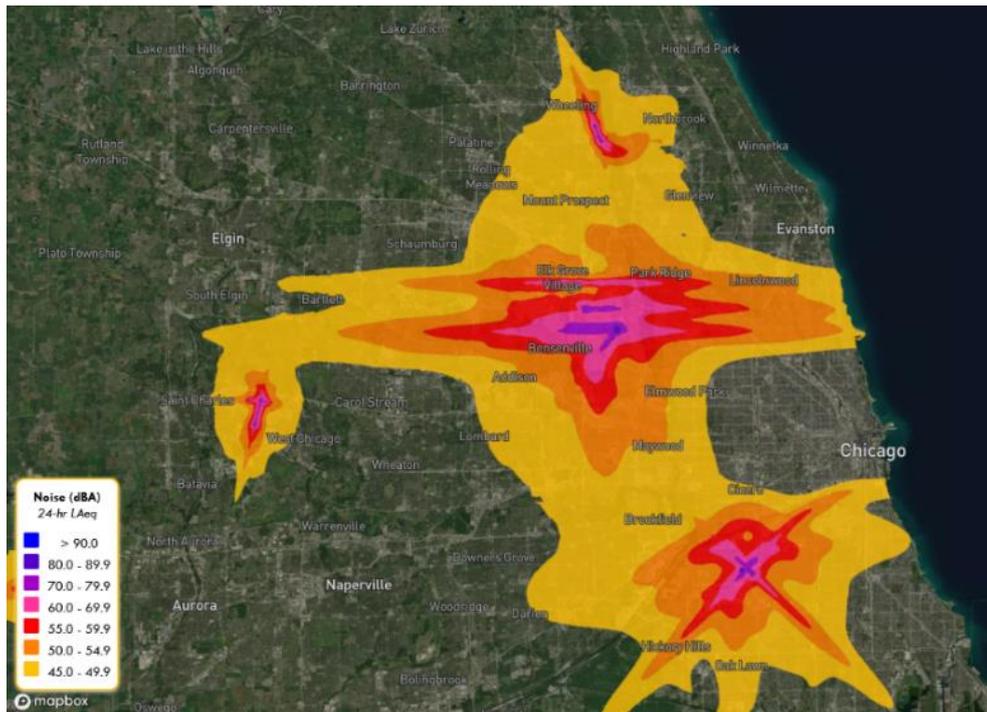


Figure 49 : Carte de l'exposition au bruit aérien autour de Chicago en 24-hr LAeq
 Source : <https://maps.dot.gov/BTS/NationalTransportationNoiseMap/>

On peut également signaler la mise en place de dispositifs d'information complémentaires d'identification et de caractérisation des événements sonores. C'est le cas pour l'aéroport de Reagan/Dulles, qui utilise le système ANEEM de classification des événements sonores et communique les relevés de L_{DN} , L_{max} , nombre d'événements (cf. Figure 50). L'aéroport a également mis en place un registre de plaintes accessible via une application mobile ou sur son site internet. Le niveau de précision de l'origine de la gêne est particulièrement détaillé et susceptible d'être exploité en étant rapproché des indicateurs/indices acoustiques. Nous ne disposons cependant pas d'information qui pourrait confirmer une utilisation dans ce sens.

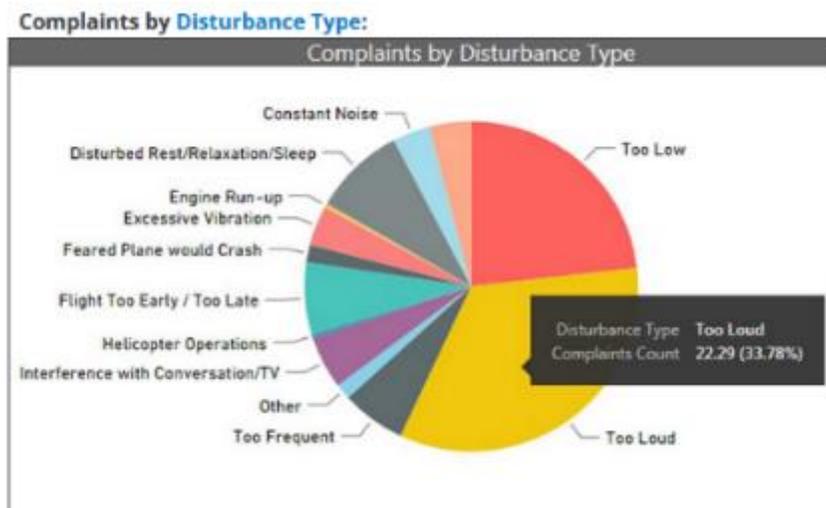
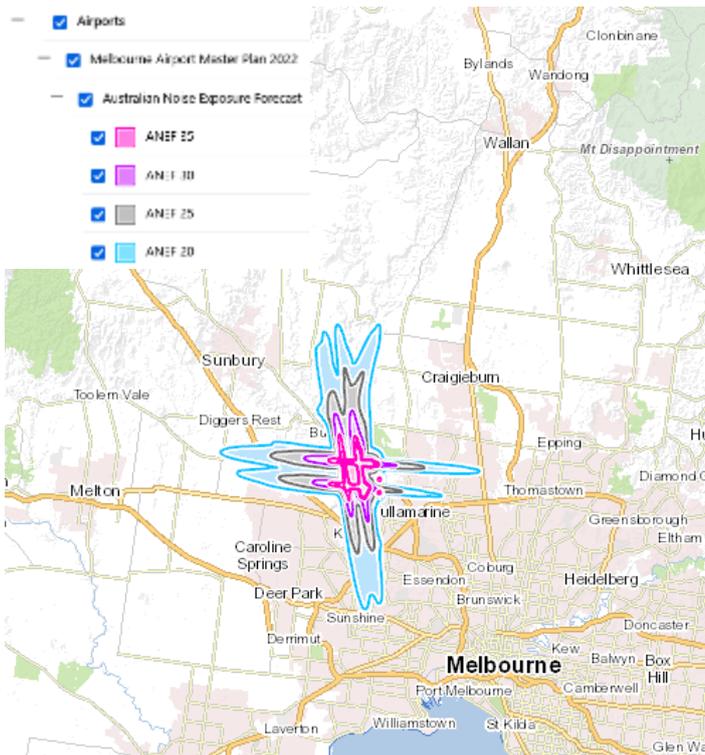


Figure 50 : Exemple de représentation des causes des plaintes pour gêne (aéroport de [Reagan-Dulles](#))

3.4.2.4 En Australie : ANEF (Australian Noise Exposure Forecast), NA et L_{Amax}

L'Airports Act de 1996 implique que tous les aéroports principaux disposent de plans de gestion du bruit environnemental et élaborent des cartes d'exposition sonore conformes à l'Australian Standard AS 2021-2015 " Acoustics – Aircraft Noise Intrusion – Building Siting and Construction ".



Contrairement à la réglementation en Europe ou aux États-Unis d'Amérique, les cartes de bruit australiennes représentent l'exposition sonore en termes d'ANEF, c'est-à-dire d'un indicateur qui rend compte à la fois de l'énergie acoustique mais aussi du nombre d'événements sur les 3 périodes de la journée (jour/soir/nuit) (cf. Figure 51).

Ces cartes sont utilisées pour contrôler les projets d'urbanisation, imposer des mesures d'insonorisation pour les bâtiments situés dans les zones ANEF élevées et éviter l'implantation d'écoles, d'hôpitaux ou de zones résidentielles dans des zones exposées à un bruit excessif.

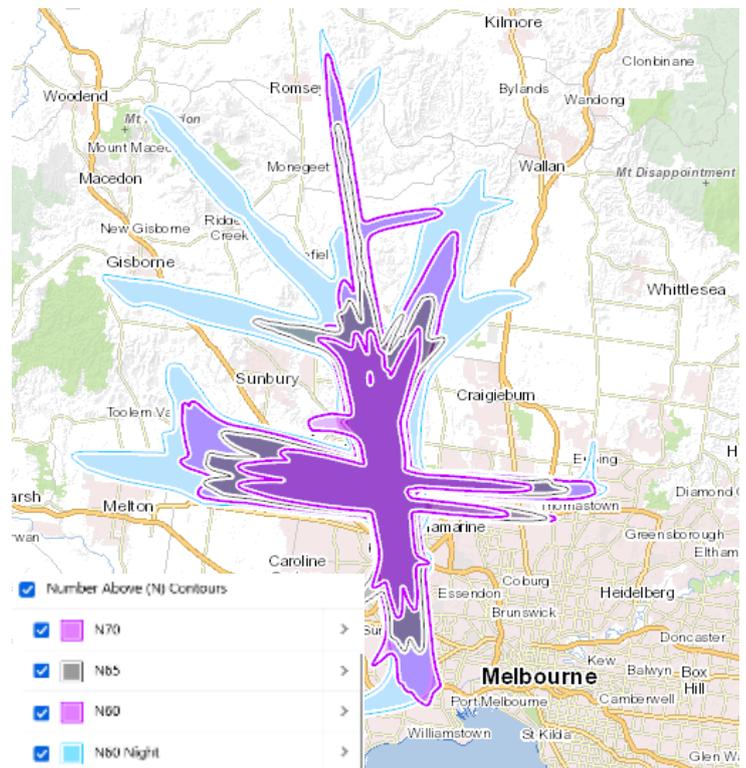
Figure 51 : Carte de l'exposition au bruit aérien autour de de l'aéroport de Melbourne pour le bruit aérien en ANEF

Source : <https://mapshare.vic.gov.au/vicplan/>

Certains aéroports australiens produisent également à titre purement informatif les contours en termes de nombre d'événements de niveau supérieur à une limite donnée (NA70) par exemple) (cf. Figure 52) ou encore le niveau maximal L_{Amax} , pour certains types d'avion, en fonction de leur destination et de la trajectoire de vol (cf. Figure 53).

Figure 52 : Carte de l'exposition sonore autour de l'aéroport de Melbourne pour le bruit aérien en NA

Source : <https://mapshare.vic.gov.au/vic>



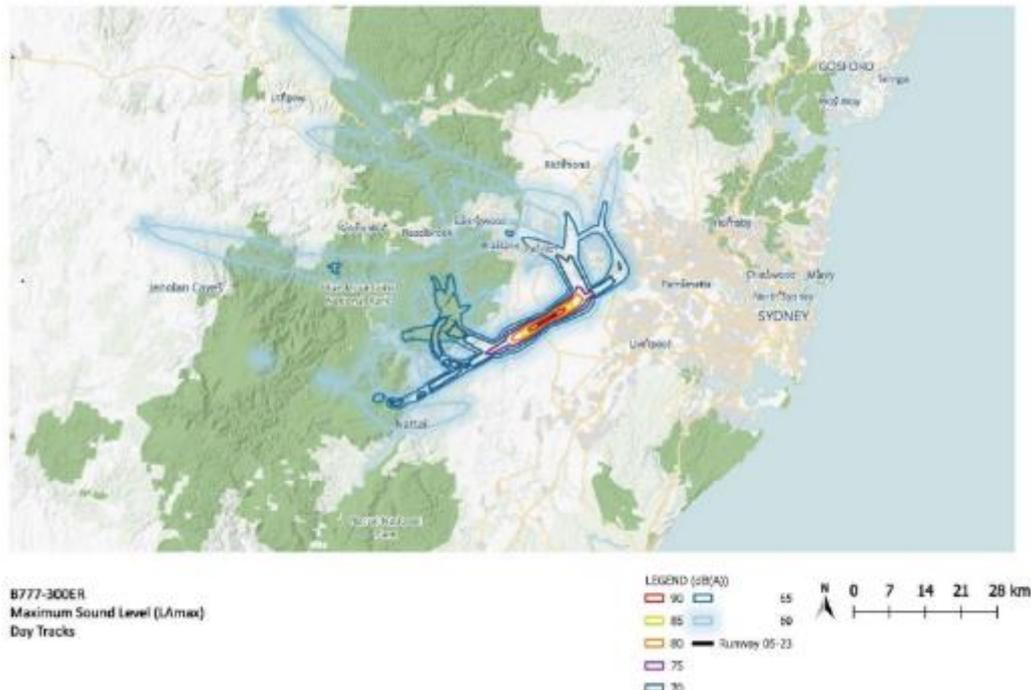


Figure 53 : Carte de l'exposition sonore autour de l'aéroport de Sydney pour le bruit aérien en L_{Amax} pour un B777-300ER de jour
Source : (Commonwealth Coat of Arms, 2024)

3.4.2.5 Au Japon : [WECPNL](#)

Au Japon (Ministry of the Environment - Government of Japan, 2024), les cartes de bruit sont réalisées en WECPNL, c'est-à-dire un indicateur qui tient compte de l'énergie moyenne des pics de bruit et du nombre d'événements (pénalisé par un facteur) au cours des périodes de la journée.

Les zones autour de l'aéroport sont classées en 2 types :

- les zones avec un WECPNL ≤ 70 dB(A) : zone résidentielle uniquement
- les zones avec un WECPNL ≤ 75 dB(A) : zone où des conditions de vie normales doivent être préservées.

Ces valeurs limites ont été introduites par la loi n°91 de 1993. Dans ce texte, le Japon instaure un programme pour que les aéroports existants se conforment à ces valeurs limites dans un délai compris entre 5 et 10 ans, en fonction de l'importance de l'aéroport. Ces valeurs limites doivent donc à ce jour être respectées pour tous les aéroports japonais.

3.4.2.6 Au Canada : [NEF](#)

Au Canada, l'utilisation des terrains à proximité des aéroports s'appuie sur le système de prévision de l'ambiance sonore (PAS) (cf. Figure 54). Il " permet de mesurer le bruit actuel et prévu des aéronefs à proximité des aéroports. Ce système tient compte des réactions subjectives de l'oreille humaine à des stimuli particuliers liés au bruit des aéronefs, comme l'intensité sonore, la fréquence, la durée, les heures d'occurrence et la tonalité. Cette mesure permet de prévoir la réaction d'une collectivité au bruit des aéronefs. Un niveau PAS supérieur à 25 générerait vraisemblablement un certain inconfort. Si le niveau PAS dépasse 35, les plaintes seront probablement nombreuses. Cela permet aux municipalités et aux administrations locales de prévoir le zonage et aux résidents de prévoir le niveau de bruit attendu. " (cf. (Gouvernement du Canada, 2018)).

Transport Canada – en charge de réglementer les activités de l'industrie aéronautique, d'appliquer les règlements sur le bruit des aéronefs, de la réalisation d'enquête quand une infraction est signalée et d'imposer des sanctions pécuniaires lorsqu'il y a bel et bien eu infraction (cf. (Padova, 2013)) – recommande " de ne pas construire de nouveaux quartiers résidentiels dans les secteurs où le PAS dépasse 30. Si de tels projets sont entrepris en dépit de cet avertissement, une analyse détaillée du bruit devrait être réalisée et des pratiques d'atténuation du bruit devront être mises en œuvre. Dans une telle situation, il incombe à l'entrepreneur d'informer les résidents éventuels des problèmes de bruit possibles. " (cf. (Gouvernement du Canada, 2018)).

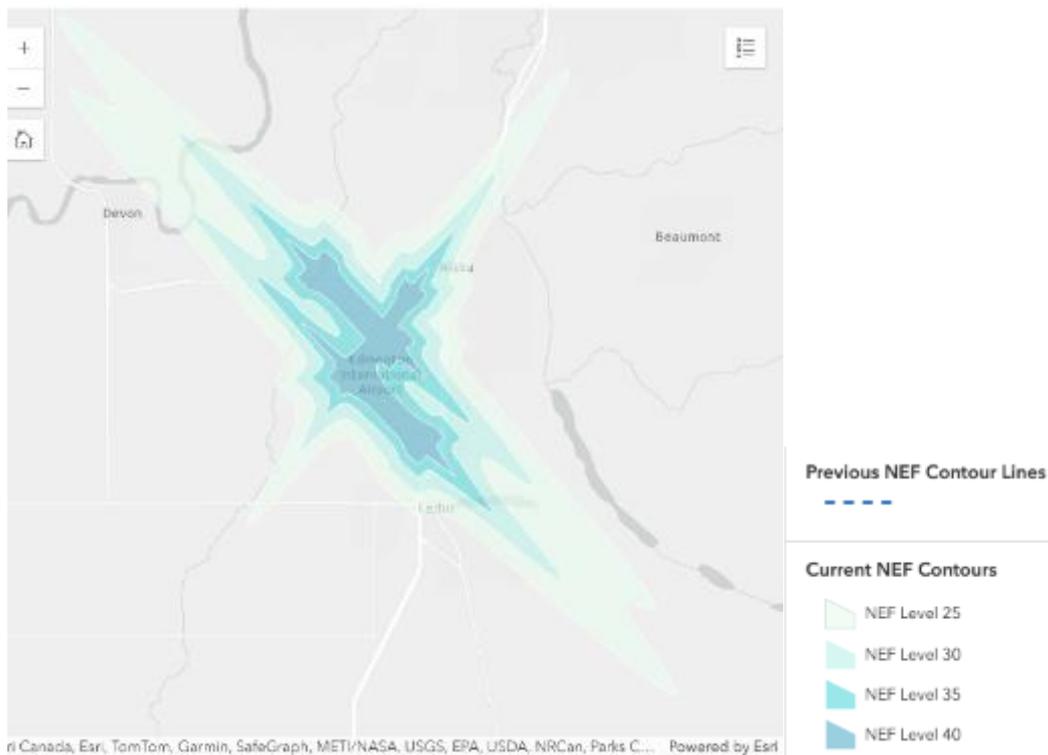


Figure 54 : Carte de l'exposition sonore autour de l'aéroport de Leduc pour le bruit aérien en NEF
 Source : <https://www.leduc.ca/airport-vicinity-protection-area/nef-contours-and-city-leduc>

3.5 Norme NF S 31-190 : descripteurs acoustiques et du trafic mesurés

La norme NF S 31-190 de mars 2008 (en cours de révision) expose les méthodes de mesure et de caractérisation du bruit des activités aéronautiques (civiles et militaires) dans l'environnement. Cette norme, non-obligatoire, définit les notions d'événements : acoustique, acoustique discret, aéronautique ; et introduit la notion d'émergence événementielle (E_{evt}) : " émergence se caractérisant par la différence entre un niveau sonore décrivant le bruit avant l'apparition de l'événement aéronautique et un niveau sonore maximal mesuré pendant cet événement ". Elle se calcule de la façon suivante :

$$E_{evt} = L_{Aeq5s \max} - L_{A50}$$

Où le L_{A50} est le niveau fractile 50% prenant en compte le bruit ambiant observé avant l'apparition de l'événement aéronautique concerné et évalué sur 5 minutes.

Pour chaque survol identifié, ces descripteurs sont les suivants :

- $L_{Aeq 1s}$
- LAE ou SEL
- Horaire d'apparition et durée
- E_{evt}

En plus de ces descripteurs individuels, la norme propose de caractériser de façon acoustique et statistique le trafic aéronautique à l'aide de :

- La durée globale d'exposition sonore (aux événements aéronautiques), sur la durée de mesurage considérée
- Le nombre d'événements aéronautiques : NE
- L'analyse distributive des $L_{Aeq 1s}$, LAE (SEL), E_{evt} et des intervalles événementiels.

Remarque 1 : l'ensemble de ces indicateurs proposés, mais non-réglementaires, offre donc une description très détaillée de l'exposition en un point donné.

Remarque 2 : la révision en cours de la norme pourrait voir modifiée la durée d'intégration du niveau sonore maximal en adoptant une valeur de 1s. Le $L_{Aeq5s\ max}$ serait ainsi remplacé par le $L_{Aeq1s\ max}$, proche du L_{Amax} .

Remarque 3 : si la quasi-totalité des descripteurs proposés à la mesure par la norme sont également accessibles par la modélisation, la dépendance du E_{evt} à la valeur du bruit ambiant, rend sa prévision plus incertaine. Elle nécessiterait une modélisation de l'ensemble des sources de bruit (hors événement caractérisé) : autres sources aéronautiques éventuelles, autres sources liées aux transports (routiers, ferroviaires), bruits de voisinage ou d'activités. Ces autres sources peuvent avoir une activité temporelle très variable, en fonction des périodes considérées. **Par conséquent, ces contraintes limitent fortement l'utilisation de l'indicateur d'émergence événementielle en modélisation.**

3.6 ISO 20906 :2009 : surveillance automatique du bruit des aéronefs au voisinage des aéroports

Les aéroports sous l'autorité de l'ACNUSA doivent être équipés de système de monitoring des aéroports conformes à la Norme Internationale ISO 20906 : 2009 " Surveillance automatique du bruit des aéronefs au voisinage des aéroports ". Cette norme établit les exigences et les procédures pour garantir des mesures fiables du bruit des avions à l'aide de systèmes de surveillance installés de manière permanente.

Ainsi, la norme précise les performances requises pour les instruments de mesure, à savoir conformité à la classe 1 des sonomètres selon la norme IEC 61672-1, leur installation sans surveillance et leur fonctionnement.

Elle décrit une **méthode de reconnaissance des événements sonores dans un environnement complexe** où coexistent plusieurs sources de bruit, y compris le bruit résiduel. L'objectif est de pouvoir identifier et marquer de manière fiable les événements de bruit d'aéronef.

Cette norme définit les grandeurs acoustiques qui doivent être déterminées pour décrire le bruit des aéronefs, telles que les niveaux de pression acoustique et les niveaux d'exposition sonore, mais également les informations non-acoustiques relatives à l'évènement à inclure, à savoir les données météorologiques, la localisation radar des sources ainsi que les informations relatives aux vols. Elle inclut également une procédure pour déterminer l'incertitude de mesure des données rapportées.

3.7 Modélisation du bruit aérien

3.7.1 Contexte

La modélisation acoustique constitue depuis de nombreuses années un outil indispensable et complémentaire à la métrologie du bruit dans l'environnement. Les usages sont multiples, parmi lesquels :

- Etablissement d'une situation initiale (voire passée) d'exposition sur un territoire
- Calcul **prévisionnel** tenant compte de l'évolution des sources, des procédures de vol, de l'environnement
- Elaboration de cartographies réglementaires de l'exposition (cf. Plan d'exposition au bruit (PEB), Plan de gêne sonore (PGS), cartographies stratégiques du bruit selon la directive européenne 2002/49/CE)
- Identification et analyse quantitative des populations exposées
- Production de statistiques sur les effets sanitaires de l'exposition au bruit
- Calcul d'indicateurs agrégés (long terme) ou d'événements

La modélisation comble certaines des limites inhérentes à la mesure, en permettant d'accéder à des représentations cartographiques de l'exposition au bruit à des échelles géographiques variées (du bâtiment à un vaste territoire), avec peu ou pas de limites de résolution spatiale et y compris pour des scénarios fictifs ou prospectifs. Si la mesure acoustique reste indispensable pour le constat et la vérification/validation des prévisions issues des modèles, ceux-ci constituent des outils incontournables dans les démarches de régulation, planification mais aussi de communication.

Les premiers modèles de calcul de prévision du bruit aérien, ont vu le jour autour dès les années 1970. Basés sur des

approches empiriques (mesures), ils ont connu des améliorations au fil du temps avec l'intégration de modèles physiques. La demande croissante, au niveau international, de disposer d'indicateurs à la fois agrégés et relatifs aux événements sonore uniques (*single noise events*) renforce les exigences et nécessite une description de plus en plus fine des nombreux paramètres à prendre en compte : description des émissions acoustiques du parc aéronautique, hypothèses sur les trajectoires et paramètres de performance des aéronefs, prise en compte des conditions météorologiques et de l'ensemble des paramètres liés à l'environnement de propagation...

Les développements successifs depuis plus de 40 ans, ont également conduit les Etats et organisations internationales à fixer et réactualiser régulièrement les recommandations concernant les méthodes de calcul prévisionnel. En 2008, l'ICAO²² publie la première édition de ses recommandations (ICAO, 2008), et pose les bases d'un référentiel international. Ces recommandations ont été réactualisées en 2018 (ICAO, 2018).

En 2012, la commission européenne a souhaité fixer le cadre commun des méthodes de calcul applicables pour l'établissement des cartes de bruit stratégiques (Dir. EU 2002/49/CE). Le rapport (Kephelopoulos et al., 2012) du " Joint Research Center " (centre de recherche commun de la commission européenne) décrit l'ensemble des méthodes dites CNOSSOS-EU et applicables aux quatre types de sources concernées par la directive européenne : routières, ferroviaires, aériennes et industries bruyantes. Sur la base d'un comparatif des " meilleures pratiques. La méthode retenue est celle portée par la Conférence Européenne de l'Aviation Civile (CEAC), intitulée ECAC.CEAC Doc 29 (ECAC, 2016) et utilisant la base de données internationale ANP (Aircraft Noise and Performance Data) validée par l'ICAO (Organisation de l'aviation civile internationale). La commission européenne laisse également la possibilité de compléter, les données liées aux émissions, par la base AzB (Bopst, 2019) allemande, couvrant un plus large spectre d'aéronefs (36 classes incluant les hélicoptères et avions militaires). La commission européenne souligne que la méthode ECAC.CEAC Doc 29 est conforme à celle préconisée par l'ICAO.

On constate aujourd'hui une harmonisation, à l'échelle internationale des méthodes de calcul, basées sur le Doc29 de l'ECAC.CEAC et le doc 9911 de l'ICAO. Le choix des logiciels intégrant ces méthodes est lui laissé à la discrétion des autorités ou organismes en charges de la production des cartes et indicateurs. Ainsi l'administration fédérale de l'aviation (FAA), impose l'outil AEDT (Aviation Environmental Design Tool) (FAA, 2024) pour toutes les analyses réglementaires nationales américaines (US). En France, la Direction Générale de l'Aviation Civile, en charge de produire les cartes relatives à l'exposition au bruit des aéronefs, utilise depuis 2020 le logiciel IMPACT (DGAC, 2021; Eurocontrol, 2025), sauf pour le bruit relatif aux hélicoptères pour lequel le logiciel INM (Boeker et al., 2008), précédemment utilisé reste en vigueur (DGAC, 2014).

De façon générale, toutes ces recommandations et méthodes associées décrivent la façon de calculer des indicateurs de bruit des aéronefs à partir de l'agrégation temporelle variable (jour, mois, année...) des indicateurs relatifs à chaque événement sonore.

L'objectif de ce qui suit est de dresser l'état des lieux des indicateurs effectivement modélisables aujourd'hui, en regard des propositions d'indicateurs événementiels qui pourraient enrichir la description des situations d'exposition. Les incertitudes liées à ces calculs sont également abordées. Cette analyse doit permettre d'apporter un critère de priorisation sur le choix d'indicateurs qui pourraient compléter ceux actuellement utilisés pour décrire le bruit événementiel aérien, sans toutefois présager des développements à venir.

3.7.2 Principes de la modélisation du bruit des aéronefs

On rappelle ci-après, les principes de calcul considérés comme les " meilleures pratiques " (*best practices*) actuelles en matière de calcul prévisionnel d'indicateurs acoustiques pour le bruit aérien. Les méthodes de calcul des indicateurs acoustiques et des cartographies associées reposent sur quatre étapes principales (voir Figure 55). En fonction des outils ou de la précision de attendues des méthodes alternatives peuvent être employées et conditionnent en partie les incertitudes attachées aux résultats.

²² L'OACI (Organisation de l'aviation civile internationale) est une institution spécialisée et autonome des Nations Unies qui rassemble les 193 Etats membres de l'ONU. Elle est en charge de standardiser les politiques et normes du transport aéronautique international.

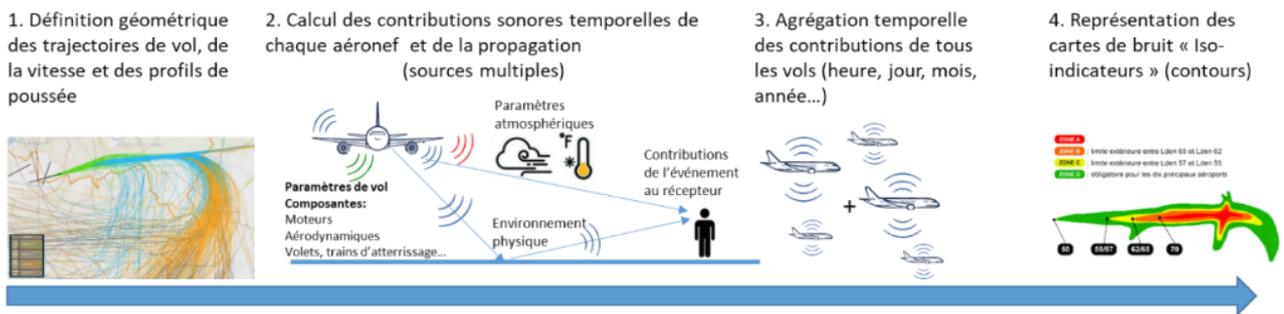


Figure 55: Etapes de modélisation du bruit aérien

3.7.2.1 Définition des trajectoires et profils de vols :

Cette étape importante vise à décrire l'ensemble des trajectoires et profils de vols, c'est-à-dire le mouvement tridimensionnel de chaque avion dans le plan vertical, au-dessus de la trajectoire au sol, selon les paramètres de : position, vitesse, angle d'inclinaison et réglage de la puissance du moteur.

Concernant les **trajectoires de vol**, plusieurs méthodes peuvent être envisagées (ECAC, 2016), (ICAO, 2018), résumées ici par ordre de précision et de recommandation :

- **Option 1** : L'exploitation des **données d'enregistreurs de vol** (*flight data recorder* ou FDR) ou des **traces radars** individuelles enregistrées par les systèmes de monitoring des aéroports constituent les données les plus précises utilisables. Les premières permettent à la fois de déduire à la fois les trajectoires de vols et les paramètres de poussée. L'ensemble des vols individuels peut théoriquement être utilisé, mais dans la pratique seule une portion de ces traces est exploitée en utilisant certaines traces moyennes, associées à une occurrence statistique (voir Figure 56).
- **Option 2** : Si les données radar ne sont pas disponibles, la seconde option préférentielle est l'utilisation **d'outils de simulation du trafic aérien**. Comme pour la première option, il est possible de prendre en compte l'ensemble des vols ou des trajectoires moyennes.
- **Option 3** : à défaut de données radars ou de simulation, il est possible de définir des "étapes procédurales (*procedural steps*) adaptée à chaque situation et le cas échéant en exploitant les données des radars situés au sol.
- **Option 4** : il est toujours possible d'utiliser les étapes procédurales fournies par défaut et définies dans la base de données ANP (Aircraft Noise and Performance Data) (EASA, 2020), enrichies également des données de radars au sol. Cette méthode est notamment appliquée dans le cas d'études de scénarios prospectifs.

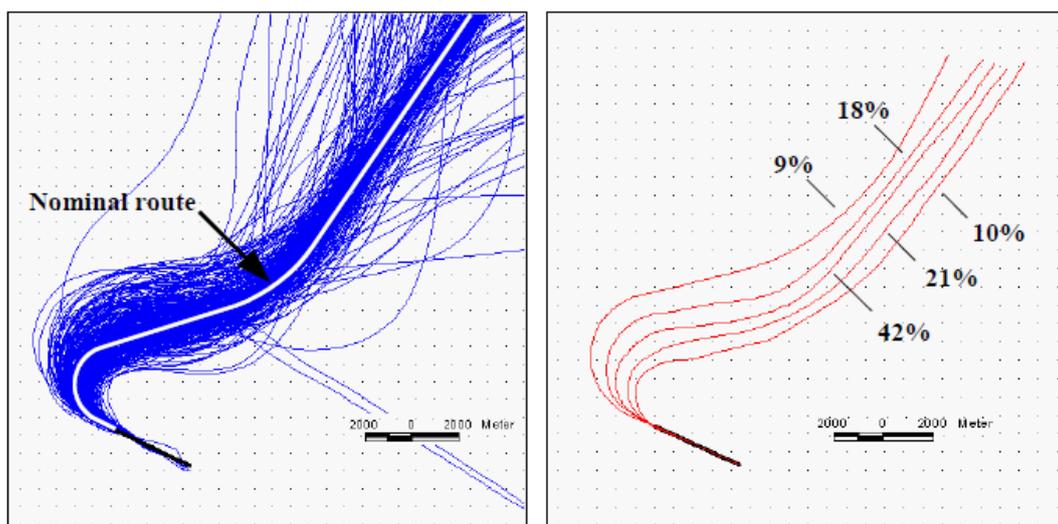


Figure 56: Exemple de traces radars individuelles enregistrées pendant la phase de décollage (à gauche), et traces "moyennes" avec occurrence (%) exploitées pour la modélisation.

Source : (ECAC, 2016)

En pratique l'ICAO souligne que l'utilisation des étapes procédurales reste la méthode la plus utilisée, faute d'accès systématique aux données FDR ou de simulation.

3.7.2.2 Calcul des contributions de chaque événement au(x) point(s) récepteur(s)

Emissions des aéronefs

Les données d'émissions acoustiques de chaque aéronef sont issues de la base de données ANP sous la forme de table de " Noise Power Distance " (NPD) indiquant les valeurs d'indicateurs (principalement SEL, EPNL, LAmax, PNLTM) en fonction de la distance à l'aéronef et du paramètre de poussée. La contribution sonore théorique fournie correspond à celle d'un avion parcourant, à vitesse constante, une ligne horizontale fictive de longueur infinie. Ces données sont établies pour des conditions atmosphériques standards et corrigées le cas échéant, pour tenir compte des conditions atmosphériques réelles. Les valeurs initiales de niveaux sont mesurées, par bande de tiers d'octave, avant le calcul des indicateurs d'événement.

Les données spectrales (1/3 d'octave) servent à définir les " classes spectrales " (spectral classes) des aéronefs, afin de simplifier le processus de modélisation. L'utilisation de ces classes, plutôt que les valeurs de spectres mesurés, constitue une approximation et une source potentielle d'erreurs dans le calcul des indicateurs d'événements (van der Grift et al., 2023). Les erreurs constatées sur les indicateurs calculés en dB(A) restent peu significatives (quelques dixièmes de dB), sauf pour des distances de propagation importantes (jusqu'à 3,5 dB(A) d'écart sur le SEL par exemple). L'utilisation d'indicateurs pondérés (A par exemple) limite au final l'erreur d'estimation de l'indicateur, les différences constatées entre les spectres mesurés et le recours aux classes spectrales étant liées, en particulier à une mauvaise (sous-) estimation des niveaux dans les basses et hautes fréquences.

NOISE ID	TYPE	THR SET	CURV TYPE	L200	L400	L630	L1000	L2000	L4000	L6300	L10000	L16000	L25000
2CF680	MAX	7000	A	96,3	89,8	85,2	80,2	71,9	63,2	56,9	50,8	44,1	37,7
2CF680	MAX	12000	A	97,5	90,9	86,3	81,3	73	64,4	58,3	52,3	45,8	39,6
2CF680	MAX	17000	D	98,2	91,5	87	82,1	74,2	65,8	59,7	53,6	46,9	40,4
2CF680	MAX	25000	D	98,5	92,6	88,3	83,7	76,4	68	62	55,6	48,7	41,8
2CF680	MAX	33000	D	101,5	95,8	91,7	87,3	80,2	71,8	65,8	59,4	52,5	45,5
2CF680	MAX	41000	D	104,4	99	95,2	91	84,1	75,8	69,7	63,2	56	48,8
2CF680	SEL	7000	A	98,1	93,9	90,8	87,4	81,4	75	70,3	65,7	60,6	55,7
2CF680	SEL	12000	A	99,3	95	91,9	88,5	82,5	76,2	71,7	67,2	62,3	57,6
2CF680	SEL	17000	D	100	95,6	92,6	89,3	83,7	77,6	73,1	68,5	63,4	58,4
2CF680	SEL	25000	D	100,3	96,7	93,9	90,9	85,9	79,8	75,4	70,5	65,2	59,8
2CF680	SEL	33000	D	103,3	99,9	97,3	94,5	89,7	83,6	79,2	74,3	69	63,5
2CF680	SEL	41000	D	106,2	103,1	100,8	98,2	93,6	87,6	83,1	78,1	72,5	66,8

Figure 57: Exemple de données NPD (Noise Power Distance) issues de la base ANP.

Les indicateurs présentés ici sont les Lmax et SEL, pondérés A ou D, pour différentes valeurs de poussée (THR SET), à des distances comprises entre 200 et 25000 pieds de l'aéronef (ici Boeing 767-300 – ID 2CF680).

Source : (Granøien and Gjestland, 2012)

Les données ANP (EASA, 2020) sont établies par les fabricants d'aéronefs, en conformité avec les réglementations internationales et les normes de l'OACI, tout en étant validées et encadrées par les autorités de l'aviation civile de chaque pays (FAA, DGAC). Ces données constituent le socle commun à toutes les méthodes et logiciels de modélisation acoustique. Elles contiennent à la fois :

- Les données de performance de l'aéronef : informations détaillées sur les capacités techniques de l'avion, comme la vitesse maximale, l'altitude de croisière, la consommation de carburant, la capacité de charge, les distances de décollage et d'atterrissage, ... Ces paramètres sont utilisés dans les modélisations acoustiques car ils modifient les paramètres d'émission.
- Les données de bruit (Noise Data) qui concernent le niveau de bruit généré par l'aéronef, que ce soit pendant le décollage, l'atterrissage ou en vol. De la qualité de cette donnée dépend largement celle des calculs d'indicateurs aux récepteurs.

La base ANP ne couvre pas l'ensemble de la flotte existante et des méthodes de substitution, décrites notamment par l'ICAO, permettent de corriger en partie cette limite.

Remarque : Si les mesures servant à la constitution des bases de données des émissions sont réalisées en tiers d'octave, pour pouvoir tenir compte des variations des paramètres atmosphériques, seules les valeurs globales pondérées sont exploitées. De fait, l'estimation d'indicateurs acoustiques nécessitant la connaissance du spectre et non contenus dans les sorties de la base ANP n'est pas possible en l'état. L'introduction de tels indicateurs reste théoriquement possible à condition de réaliser les développements nécessaires dans les méthodes actuelles.

Segmentation des trajectoires

Le processus de calcul de la contribution de chaque vol à la variabilité temporelle des indicateurs passe par la discrétisation de la trajectoire de vol, consistant en un découpage de la trajectoire continue en segments (cf. Figure 58).

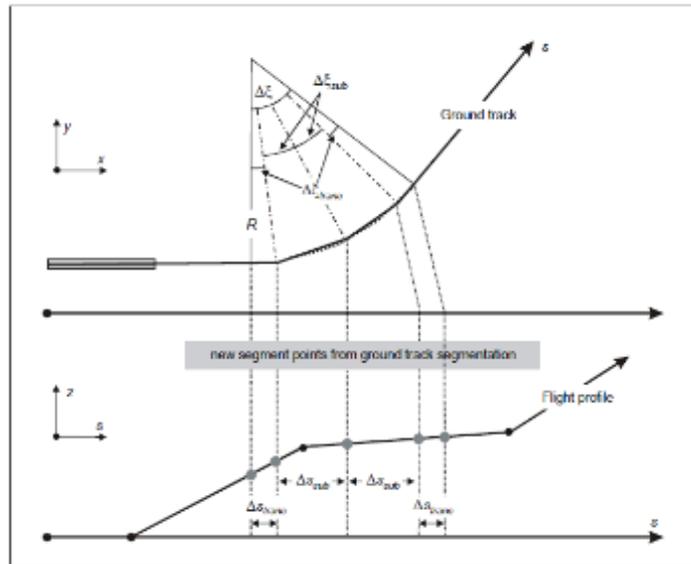


Figure 58: Segmentation d'une trajectoire de vol (en haut : dans le plan horizontal, en bas dans plan vertical)
Source : (ICAO, 2018)

La contribution sonore de chaque segment, au niveau des points récepteurs, est estimée à partir des données acoustiques de la base NPD, en tenant compte des paramètres de vol à chaque position. Compte tenu du nombre limité de valeurs (distance, puissance...) contenues dans la base (voir Figure 57), les valeurs intermédiaires sont déterminées par interpolation. La précision de la modélisation est également de fait, dépendante de la finesse de la discrétisation et particulièrement sensible lorsque la distance source-récepteur est réduite ou lorsque la trajectoire et le profil de vol change rapidement, typiquement lors des phases d'approche ou de décollage des aéronefs. Une attention particulière doit donc être portée à la segmentation dans l'espace aérien voisin des aéroports mais également dans la description des mouvements au sol, où la segmentation doit tenir compte de la variabilité de la vitesse des aéronefs.

Calcul des indicateurs d'événement

Une fois la contribution sonore de chaque segment, calculée, les indicateurs peuvent être déduits. A titre d'exemples les niveaux maximum L_{max} ou le niveau d'exposition L_E sont évalués par :

$L_{max} = \max(L_{max,segment,i})$: valeur maximale des L_{max} des différents segments

$L_E = 10\log(\sum 10^{L_{E,segment,i}/10})$: somme énergétique des niveaux d'exposition issus de tous les segments

3.7.2.3 Corrections apportées aux données NPD et incertitudes :

Un certain nombre de caractéristiques dans la base de données NPD peuvent être modifiées pour que la modélisation soit plus fidèle à la réalité décrite. Ces paramètres sont listés ci-après et pour certains, une illustration de la sensibilité est présentée.

- **Absorption atmosphérique** : les données NPD sont établies pour des conditions atmosphériques standards. L'influence des paramètres de température, humidité, pression atmosphérique sur les constantes de propagation peut être significative lorsque l'on s'éloigne des conditions de référence (voir §1.1.7). C'est pourquoi il est recommandé d'ajuster l'impédance de l'air en fonction de conditions réalistes.
- **Profils de vols** : la prise en compte de paramètres (vitesse, puissance moteur, hauteur de l'aéronef...) réalistes ou constatés, plutôt que calculés (*balanced motion equation*), peut conduire à des écarts significatifs sur l'estimation des indicateurs d'événement ou agrégés, et ce pour toutes les phases de vol. La Figure 59, donne un exemple du décalage des isophones de plusieurs centaines de mètres à plusieurs kilomètres en fonction de la méthode utilisée. Ces écarts semblent d'autant plus importants que la distance entre la source et le récepteur augmente.

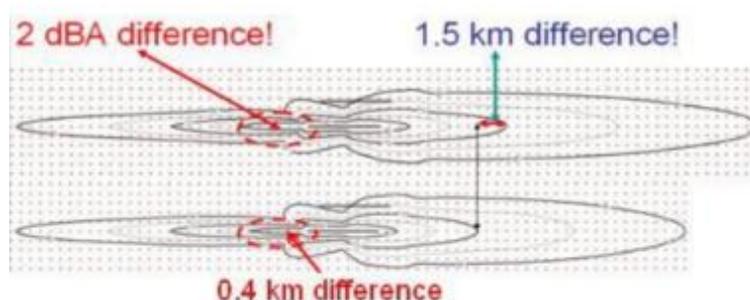


Figure 59: Illustration des différences de positionnement des courbes isophones calculées à partir : en haut : des paramètres de vol réel ; en bas : de l'approche "balance motion" (résolution de l'équation de mouvement NPD). Phases de décollage et d'atterrissage d'un B-737-400 - Source : (Zaporozhets and Levchenko, 2021)

- Directivité latérale** : les aéronefs constituent des sources acoustiques particulièrement complexes à décrire. Si les moteurs constituent les sources principales, la configuration géométrique de l'avion implique des phénomènes de réflexion, de diffraction ou de réfraction des ondes acoustiques qui modifient la directivité. Le rayonnement acoustique autour de l'avion n'est ainsi pas uniforme et des corrections de directivité doivent être apportées aux données de la base NPD. Comme illustré sur la Figure 60, la position des moteurs (sur le fuselage ou sur les ailes) réduit le facteur de directivité latéral, modifiant le niveau de bruit reçu au niveau des récepteurs en fonction du roulis (rotation autour de l'axe longitudinal). Ce phénomène est suffisamment significatif (plusieurs dB) pour être pris en compte dans les modèles et améliorer la détermination des indicateurs d'événements.

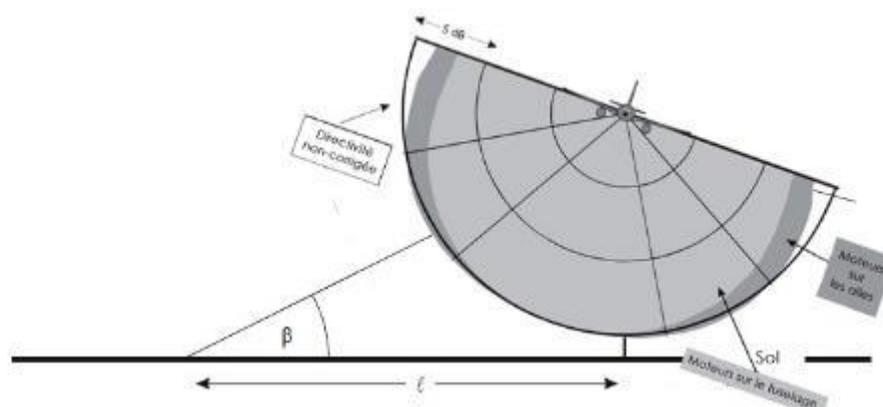


Figure 60: Correction de la directivité latérale en fonction du type de montage des moteurs
Source : (ICAO, 2018)

Une étude sur la précision des modèles de calcul, publiée en 2021, met en évidence le besoin d'une différenciation de la directivité en fonction des types de moteurs en vue d'améliorer sensiblement les corrections " forfaitaires " proposées par l'ICA (cf. Figure 61 et (Zaporozhets and Levchenko, 2021)). Les auteurs de l'article indiquent que la prise en compte de modèles de directivité plus fidèles aux types de motorisation peut conduire dans certaines configurations de vol (approche, décollage), à des écarts (5 à 10 dB(A)) sur l'estimation des indicateurs d'événements.

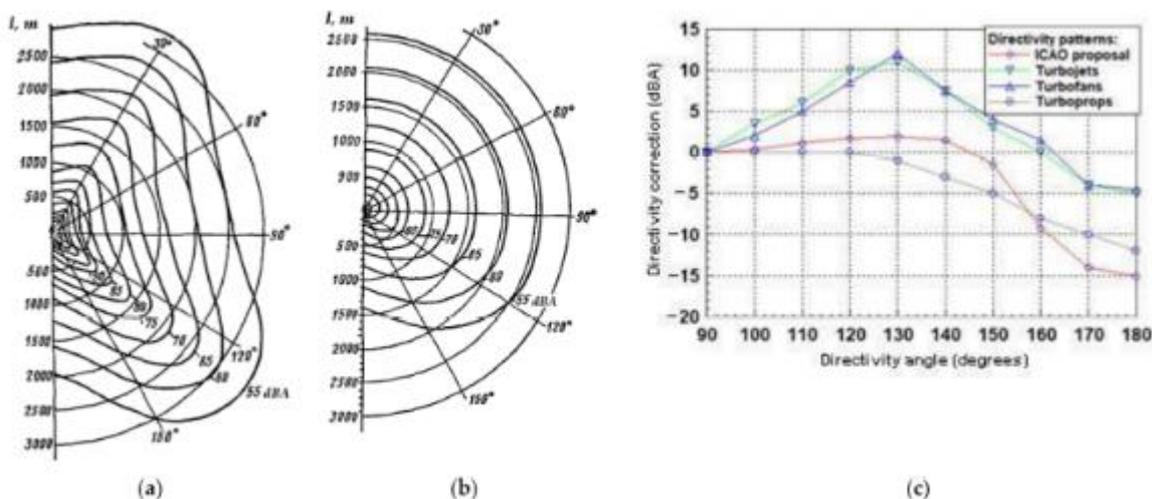


Figure 61: Diagramme de directivité des moteurs d'avion.

Avec : (a) Turbofan avec un faible taux de dilution ; (b) Turboprop ; (c) Comparaison turbojets/turbofans/turboprops avec le Doc 9911 de l'OACI pour la direction arrière.

Source : (Zaporozhets and Levchenko, 2021)

Prise en compte de la topographie et l'environnement physique :

Le relief, la végétation ou l'environnement bâti, sont susceptibles de modifier l'estimation des distances aux points récepteurs ou encore de créer des effets de masques entre sources et récepteurs. La prise en compte de la topographie lors du calcul de la propagation reste optionnelle et pratiquement rarement intégrée mais peut impacter sensiblement l'estimation des indicateurs acoustiques comme le révèle une étude récente (Ramseier et al., 2024). Des diminutions ou augmentations des niveaux de bruit, pouvant aller jusqu'à plus de 10 dB(A), dues au masquage ou à des réflexions sur les bâtiments sont constatées par les auteurs. Ceux-ci concluent sur la pertinence d'une prise en compte de ces effets dans le cadre d'études locales approfondies, mais tempèrent le recours à une description précise de l'environnement pour la production de cartes stratégiques à plus grande échelle. La question de l'enrichissement des modèles, avec pour conséquence une complexification du processus de calcul, se pose lorsque l'on s'intéresse à la prévision d'indicateurs d'événements, dont la sensibilité à la description de l'environnement physique et des sources a déjà été soulignée. La qualité des résultats repose alors en grande partie sur l'expertise du modélisateur, qui doit apprécier ces facteurs de sensibilité.

Autres bases de données utilisées

Pour palier certaines lacunes ou améliorer la précision de la base de données ANP, des alternatives sont proposées par les développeurs de logiciels de modélisation. Ainsi, Eurocontrol produit la base BADA (Base of Aircraft Data) couplée notamment au logiciel IMPACT© utilisé par la DGAC ou encore par le logiciel AEDT©.

3.7.2.4 Calcul des indicateurs agrégés à partir des contributions de chaque événement

Le calcul des indicateurs énergétiques (L_{eq} , L_{den} ...) ne pose pas de difficulté particulière et se base sur la sommation des contributions énergétiques de tous les segments de chaque vol modélisé, sur la période de référence considérée.

En revanche la détermination d'indicateurs agrégés sur la base des niveaux maximum, comme par exemple le niveau maximal moyen (au sens énergétique) pose la question des événements effectivement considérés dans cette moyenne : d'une part un même survol peut provoquer l'apparition de plusieurs événements qu'il convient d'identifier ; d'autre part, et en l'absence de prise en considération d'un bruit ambiant dans la modélisation, il peut être recommandé de fixer un seuil " d'émergence " pour tenir compte ou non d'un événement.

Le Doc 9911 de l'ICAO introduit trois métriques découlant du L_{max} : $\overline{L_{max}}$ la moyenne (énergétique), la valeur maximum des L_{max} , ou encore le nombre d'événements dépassant un certain seuil X (NA_X).

Remarque : Dans le cas, de modélisations de vols identiques pouvant conduire à la non prise en compte de la dispersion réelle des résultats, le Doc 9911 propose l'introduction de la description statistique des événements à l'aide d'une Gaussienne. Cette méthode applicable aux L_{max} mais également aux NA_X peut limiter l' " effet de seuil " associé à la modélisation.

3.7.2.5 Représentation cartographique des résultats

Les courbes de niveaux d'indicateurs constituent un des résultats les plus utilisés en sortie de modèle. Le choix des

grilles de représentation et des méthodes d'interpolation entre les points récepteurs peuvent modifier sensiblement la représentation finale, ou le décompte de populations exposées par exemple. C'est pourquoi des recommandations (non reprises ici) sont formulées dans le Doc 9911 afin d'homogénéiser les pratiques.

3.7.2.6 Indicateurs de bruit en usage par les membres de l'ICAO

Le Doc 9911 présente les indicateurs modélisables sélectionnés par les Etats adhérents pour leur usage national. Ces indicateurs sont les suivants :

- L_{den} , L_{dn}
- L_{Aeq} ,
- NEF,
- B,
- WEPCNL,
- ANEF.

3.7.3 Modélisation du bruit aérien : ce qu'il faut retenir

- Les procédures ou **méthodes de modélisation** sont aujourd'hui **harmonisées** au niveau international et se base sur les documents de l'ECAC.CEAC (Doc 29) et de l'ICAO (doc 9911)
- Des **différences** peuvent néanmoins exister entre les **outils** qui implémentent ces méthodes. En fonction des demandes des différents pays, la palette d'indicateurs en sortie des modèles, en particulier pour les indicateurs événementiels peut varier.
- Le processus de modélisation implique de **nombreux de paramètres** d'entrée avec une **sensibilité potentiellement significative** sur la précision d'estimation des indicateurs d'événements (single events). Ces paramètres sont notamment :
 - les trajectoires de vol ;
 - les profils de vol ;
 - les conditions atmosphériques ;
 - la description des émissions acoustiques (y compris directivités des différents aéronefs) ;
 - et la prise en considération des spectres via des classes spectrales.
- **La sensibilité s'avère moindre** sur les résultats d'évaluation des indicateurs agrégés (L_{den} , L_{Aeq} ...)
- **Les métriques d'événements (single events) sont limitées** par les indicateurs renseignés dans la base NPD :
 - SEL,
 - EPNL, (disponibilité non-exhaustive pour tous les aéronefs),
 - L_{max} ,
 - et PNLTM (Maximum Tone Corrected Perceived Noise Level).
- **Indicateurs agrégés** fournis en sortie des logiciels (sous forme de cartes de contours ou grilles de récepteurs)
 - SEL, EPNL, L_{den} , DNL, L_{Aeq} , L_{Amax} , PNLTM, N_{Ax} .
 - Certains logiciels proposent le calcul d'indicateurs définis par l'utilisateur.
- Les indicateurs SEL et L_{max} sont fournis **pondérés A ou D**, ce qui limite le calcul d'autres indicateurs nécessitant les valeurs par 1/3 d'octave. L'information existant à la source, cette limitation n'est cependant pas rédhibitoire et le cas échéant les méthodes pourraient être adaptée pour élargir le champ des indicateurs évaluables.

3.8 Synthèse de la Partie 3

La présente étude a notamment pour objectif la proposition d'indice(s)/indicateur(s) susceptibles de caractériser le bruit aérien. Plusieurs aspects de l'objectif doivent être définis afin d'être en capacité de proposer les indice(s)/indicateur(s) *ad hoc*.

Ainsi, il convient dans un premier temps de définir les termes " indice ", " indicateur " et " métrique " :

- **Indicateur** : un indicateur est assimilable à une variable (numérique) ou à l'agrégation de variables portant une information sur un phénomène (données), ou un attribut d'un système (ex : température, pression, vitesse, niveau de pression acoustique...).
- **Indice** : pour faciliter la description d'un phénomène ou d'un système, il peut être utile d'agréger les informations de différents indicateurs. Le résultat de cette agrégation est alors dénommé " indice ".
- **Métrique** : une métrique est du point de vue étymologique, une grandeur mesurable (quantifiable). Les indicateurs constituent des métriques. Par extension, un indice serait une métrique " indirecte ".

Ces termes peuvent également être distingués en fonction de leur usage et par conséquent, du public auquel ils s'adressent. Ainsi :

- les indices s'adressent au grand public,
- les indicateurs s'adressent aux décideurs politiques,
- tandis que les métriques ou les données brutes s'adressent aux chercheurs.

Ainsi, si l(es) indice(s)/indicateur(s) proposés doivent permettre d'alimenter la recherche sur les effets sanitaires du bruit aérien, alors, il faudra plutôt se tourner vers des métriques ou des indices. Au contraire, si l'objectif est de mieux communiquer/informer le public, alors des indicateurs agrégés peuvent s'avérer plus adaptés.

Après avoir défini l'usage et les utilisateurs de ce(s) indice(s)/indicateur(s), il faut s'interroger sur la(les) grandeur(s) acoustique(s) du bruit aérien que l'on souhaite caractériser. Pour faciliter le choix de la(les) métrique(s) adaptée(s), une classification des métriques a été proposée en fonction de la(les) grandeur(s) caractérisée(s) Ainsi, 7 familles de métriques ont été agrégées (cf. Tableau 10) :

- **Les métriques de niveau sonore ;**
- **Les métriques événementielles de niveau sonore ;**
- **Les métriques de niveau sonore pondérés par périodes ;**
- **Les métriques composites ;**
- **Les métriques de tonalité ;**
- **Les métriques spécifiques au bruit des aéronefs ;**
- **Les métriques psychoacoustiques.**

Des exemples internationaux d'utilisation de ces métriques pour caractériser le bruit aérien ont été présentés. Il en ressort que pour la gestion réglementaire du bruit aérien (utilisateurs = décideurs politiques) ne sont utilisés que :

- Des métriques de niveau sonore,
- Des métriques de niveau sonore pondérés par période,
- Des métriques spécifiques au bruit des aéronefs.

Pour la communication auprès des riverains (utilisateurs = grand public), en plus de ces métriques, peuvent également être présentées :

- Des métriques événementielles de niveau sonore ;
- Des métriques composites.

Ainsi, aucun exemple (hors recherche) d'utilisation des métriques de tonalité ou des métriques psychoacoustiques n'a été recensé.

Enfin, pour la proposition d'indice(s)/indicateur(s) susceptibles de caractériser le bruit aérien, en fonction de l'utilisation qui aura été défini, il faudra s'interroger sur le besoin de modélisation du(des) indice(s)/indicateur(s) retenu(s). Ainsi, un état de l'art de la modélisation a été dressé. Il en ressort qu'en l'état actuel, des métriques

d'événement et des indicateurs de niveau sonores agrégés par périodes sont d'ores et déjà disponibles dans les logiciels de modélisation. Les indicateurs SEL et Lmax sont fournis pondérés A ou D, ce qui limite le calcul d'autres indicateurs nécessitant les valeurs par 1/3 d'octave. L'information existant à la source, cette limitation n'est cependant pas rédhibitoire et le cas échéant les méthodes pourraient être adaptées pour élargir le champ des indicateurs évaluables.

Afin de compléter l'information des grandeurs mesurées par chaque métrique donnée dans le Tableau 10, le Tableau 12 synthétise pour les différentes métriques :

- l'objet qu'il permet de caractériser
 - source ;
 - perception de la source ;
 - effets sanitaires ;
- l'utilisation qui en est fait
 - communication → grand public ;
 - réglementaire → décideurs politiques ;
 - recherche → chercheur ;
- son caractère mesurable, et si oui à partir de quelle donnée brute :
 - le LAeq ;
 - le spectre en tiers d'octave ;
 - le spectre en bandes fines ;
 - le signal audio ;
- son caractère modélisable
 - actuellement ;
 - après adaptation des logiciels de modélisation.

Tableau 12 : Grandeur caractérisée par les indicateurs, leur utilisation et leur caractère mesurable ou modélisable

Indicateur		Unité	Caractérise la source	Caractérise la perception	Caractérise les effets sanitaires	Réglementaire	Pour la communication	Mesurable	À partir du LAeq	À partir du 1/3 d'octave	À partir des bandes fines	À partir de l'audio	Modélisable	immédiatement	Après adaptation logicielle
INDICATEUR DE NIVEAU SONORE															
LAeq	A-weighted equivalent sound pressure level	dB(A)	X			France, Royaume-Uni		X	X					X	
LCEq	C-weighted equivalent sound pressure level	dB(C)	X					X		X					X
LG	G-weighted sound pressure level	dB(G)	X					X		X					X
LLF	Low Frequency Sound pressure level (16, 31.5, and 63-Hz)	dB	X					X		X					X
LNE	Adjusted sound exposure level	dB	X					X		X					
LA,LF	A-weighted equivalent low frequency level (10-160 Hz)	dB(A)	X					X		X					X
INDICATEUR EVENEMENTIEL DE NIVEAU SONORE															
Lmax	Maximum noise level	dB	X				Australie	X	X				X	X	
Lmin	Minimum noise level	dB	X					X	X						
LFSL	Low Frequency Sound Level (25-80 Hz)	dB	X					X		X					X
SEL	Sound Exposure Level	dB	X					X	X					X	
E _{evt}	Émergence événementielle	dB	X					X	X						
INDICATEUR DE NIVEAU SONORE PONDERE PAR PERIODES															
DNL ou Ldn	Day-night noise level	dB(A)			X		USA						X	X	

Indicateur		Unité	Caractéristiques			Réglementaire	Pour la communication	Mesurable	À partir du LAeq	À partir du 1/3 d'octave	À partir des bandes fines	À partir de l'audio	Modélisable	immédiatement	Après adaptation logicielle
			Caractérise la source	Caractérise la perception	Caractérise les effets sanitaires										
DENL ou Lden	Day-evening-night noise level	dB(A)		X		Europe						X	X		
INDICATEUR COMPOSITE															
NPL	Noise Pollution Level	dB(A)	X				X	X							
TNI	Traffic Noise Index	dB(A)	X				X	X							
Lxx	indicateur fractile	dB(A)	X				X	X							
PEI	Person-Event Index			X								X	X		
AIE	Average Individual Exposure	%		X								X	X		
NAT	Number of events Above a certain Threshold			X			X	X				X	X		
IR	Intermittent Ratio	%	X				X	X							
TA	Time Above		X				X	X							
indice Harmonica			X			X	X								
INDICATEUR DE TONALITE															
Lta	Tonal audibility	dB	X				X		X						
TdBA JNM	Joint Nordic Method based Tone-corrected Average A-weighted Sound Pressure Level	dB	X				X		X						
ARI	Air-conditioning and Refrigeration Institute	dB	X				X		X						
K	Aures tonality		X				X		X						
TNR	Tone-to-Noise Ratio	dB	X				X		X						
PR	Prominence Ratio	dB	X				X		X						

Indicateur		Unité	Caractérise la source	Caractérise la perception	Caractérise les effets sanitaires	Réglementaire	Pour la communication	Mesurable	À partir du LAeq	À partir du 1/3 d'octave	À partir des bandes fines	À partir de l'audio	Modélisable	immédiatement	Après adaptation logicielle
PNL	Perceived Noise Level	PndB	X					X		X					
PNLT	Tone-corrected Perceived Noise Level	PndB	X					X		X					
EPNL	Effective Perceived Noise Level	PndB	X			OACI		X		X			X	X	
IGMP	Indicateur Global Mesuré Pondéré	dB(A)	X			France (obsolète)							X		
WECPNL	Weighted noise exposure forecast	PndB	X			Corée, Chine, Nigeria, Japon		X		X			X	X	
NNI	Noise Number Index	PndB			X	Royaume-Uni (obsolète)		X		X			X		X
CNR	Composite Noise Rating		X					X		X					
NEF	Noise Exposure Forecast	PndB	X			Canada, Chine, Australie (ANEF)		X		X			X	X	
ANEF	Australian Noise Exposure Forecast	ANEF	X			Australie		X		X			X	X	
N70 Contour			X				Australie						X	X	
INDICATEUR PSYCHOACOUSTIQUE															
N	Loudness (Sonie)	sone		X				X				X			
S	Sharpness (Acuité)	acum		X				X				X			
R	Roughness (Rugosité)	asper		X				X				X			
F	Fluctuation strength	vacil		X				X				X			

Indicateur		Unité	Caractérise la source	Caractérise la perception	Caractérise les effets sanitaires	Réglementaire	Pour la communication	Mesurable	À partir du LAeq	À partir du 1/3 d'octave	À partir des bandes fines	À partir de l'audio	Modélisable	immédiatement	Après adaptation logicielle
PA	Psychoacoustic Annoyance			X				X				X			
LLSEL	Loudness Level weighted Sound Exposure Level	phon	X					X				X			

PARTIE 4. DONNEES EXPLOITEES DANS LE CADRE DU GROUPE DE TRAVAIL SUR LES INDICATEURS DE PIC DE BRUIT AERIEN

Afin d'alimenter les discussions du groupe de travail sur les indicateurs du bruit aérien, des calculs d'indicateurs ont été réalisés par le Cerema et par BruitParif. Ce calcul d'indicateurs avait deux objectifs :

- Vérifier la faisabilité du calcul de ces indicateurs à partir de mesures *in situ* ;
- Ecarter ou au contraire, retenir des indicateurs en fonction de leur pertinence pour décrire le bruit aérien et de leur complémentarité avec les indicateurs réglementaires actuels : des indicateurs de niveau sonore pondéré A.

Trois jeux de données, fournis par des exploitants aéroportuaires, ont permis le calcul, par le Cerema, d'indicateurs événementiels, présélectionnés par le GT selon des critères présentés dans la Partie 4.1.1. BruitParif a en parallèle exploité les données issues de son réseau de mesures permanentes pour évaluer des indicateurs agrégés sur la journée. De façon indépendante et non-coordonnée, les deux organismes ont analysé les corrélations entre indicateurs, en ont extrait les dimensions principales et ainsi ont identifié des indicateurs pouvant compléter utilement les indicateurs aujourd'hui utilisés.

4.1 Jeux de données exploités par le Cerema

Trois jeux de données acoustiques fournis par les membres du GT ou d'aéroports ont été exploités. L'exercice visant l'analyse statistique, les corrélations et la faisabilité de calcul des indicateurs à partir de données disponibles, l'origine précises des données n'est volontairement pas précisée :

- **Jeu de données n°1** : issu de 16 jours de mesures consécutives sur un aéroport et permet donc d'étudier la variabilité qu'il peut y avoir sur un seul point de mesure, à proximité d'un aéroport.
- **Jeu de données n°2** : issu de mesures de plusieurs heures sur plusieurs aéroports et permet donc d'observer la variabilité entre aéroport.
- **Jeu de données n°3** : issu de plusieurs stations permanentes, d'un seul aéroport, sur un an. Les données disponibles concernent les passages d'avion identifiés uniquement.

4.1.1 Les indicateurs retenus par le groupe de travail pour caractériser les événements de bruit d'avion

En ce qui concerne la recherche d'indicateurs pour caractériser le bruit événementiel aérien, plusieurs décisions ont été prises par le GT, suite à la présentation des présents travaux et des discussions du GT :

1. Compte tenu des stations de mesure installées sur les différents aéroports français, il a été décidé de ne retenir que des indicateurs pouvant être calculés à partir de la mesure du L_{Aeq} ou du spectre en tiers d'octave. En effet, le GT a souhaité utiliser les mesures déjà réalisées pour réaliser la présente étude et faire des recommandations en accord avec les technologies en place. Les caractéristiques minimales des appareils de mesure des stations en place ont donc été considérées.
2. Par conséquent, les indicateurs de tonalité et psychoacoustiques ont été écartés de l'analyse.
3. La durée d'un événement aérien a été défini comme la durée pendant laquelle le $L_{Aeq(1s)}$ est inférieur au $L_{Amax} - 10$ dB(A). D'autres critères auraient pu être appliqués (par exemple, un critère d'émergence par rapport au bruit de fond), mais pour des raisons d'homogénéité de traitement des données disponibles et compte tenu des résultats obtenus lors des travaux sur la LOM 90, le choix a été fait de se référer au niveau maximal.

Les indicateurs événementiels retenus dans la suite sont donc :

- Pour caractériser le niveau de bruit :
 - SEL (en dB(A))
 - L_{Ceq} (en dB(C))
 - EPNL (en EPNdB)
- Pour caractériser la durée :
 - La durée de l'événement (en seconde)
 - L_{NE} (en dB)
- Pour caractériser les basses fréquences :
 - L_{LF} (en dB)
 - $L_{A,LF}$ (en dB(A))
 - LFSL (en dB)
 - L_{NE} (en dB)

4.1.2 Jeu de données n°1 : un seul aéroport, 15 jours de mesures consécutives

4.1.2.1 Description du jeu de données

Ce jeu de données contient la mesure en tiers d'octave du niveau sonore par pas de 100 ms sur une durée de 15 jours (16 jours consécutifs, mais une journée exclue en raison des conditions météo). Les événements de bruit d'avion ont été identifiés et classés par type d'avion (affaire, tourisme, piaggio, électrique ou hélicoptère) par la station de mesure de l'aéroport, et rappelés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 13 : Répartition des événements par jour et par type d'avion - Jeu de données n°1

Date	Jeudi 1	Vendredi 1	Samedi 1	Dimanche 1	Lundi 1	Mardi 1	Mercredi 1	Jeudi 2	Vendredi 2	Samedi 2	Dimanche 2	Lundi 2	Mardi 2	Mercredi 2	Jeudi 3	Vendredi 3	Total	
Affaire	4	1	2	3	3	4	1	1	1	1		1	1	PROBLEME DE METEO	7	5	35	
Electrique					2													2
Hélico	1	1		2	3		2	3	2	3	2	2	1			2	4	28
Piaggio	2	2	2	1	2						1	1	2			3	2	18
Tourisme	51	21	37	25	34	24	16	33	41	30	22	20	23			54	41	472
Total	58	25	41	31	44	28	19	37	44	34	25	24	27			66	52	555

4.1.2.2 Calcul des indicateurs

Les indicateurs retenus dans la partie §4.1.1 ont été calculés pour chaque événement en utilisant le logiciel Scilab.

4.1.2.3 Corrélations entre indicateurs

L'objectif étant de compléter l'information actuellement disponible, les coefficients de corrélation de Spearman (r) entre indicateurs ont été calculés. Ce sont les indicateurs qui ne sont pas (ou peu) corrélés entre eux qui permettent de donner des informations complémentaires, tandis que les indicateurs fortement corrélés entre eux portent une information redondante. Par conséquent, les corrélations ont été calculées pour chaque type d'avion afin d'observer l'effet de ce paramètre

Rappel théorique : Le coefficient de corrélation r est la mesure spécifique qui quantifie la force de la relation linéaire entre deux variables. Les valeurs de r sont classiquement associées à une force de la corrélation, conformément au Tableau 14).

Tableau 14 : Force de la corrélation en fonction de la quantité de r

Quantité de r	Force de la corrélation
$0,0 < 0,1$	Aucune corrélation
$0,1 < 0,3$	Faible corrélation
$0,3 < 0,5$	Corrélation moyenne
$0,5 < 0,7$	Corrélation élevée
$0,7 < 1$	Corrélation très élevée

Il s'avère que les conclusions ne dépendent pas du type d'avion, les coefficients de corrélation sont donc présentés

ci-dessous (Tableau 15) pour tout type d'avion confondu (cf. Annexe 5 pour les tableaux de coefficients de corrélation par type d'avion). . NB : compte tenu que seuls 2 avions électriques ont été mesurés sur cet aéroport, il n'a pas été possible de calculer les coefficients de corrélation entre indicateurs en ne considérant que ce type d'avion.

Les indicateurs ont été regroupés par paramètre acoustique principal caractérisé :

- Sur fond rouge, la durée
- Sur fond bleu, le niveau de bruit
- Sur fond jaune, le contenu basses fréquences.

Tableau 15 : Coefficients de corrélations entre indicateurs événementiels - Jeu de données n°1

Corrélations	Durée	L _{Amax}	SEL	L _{NP}	L _C	PNLT _{max}	EPNL	L _{LF}	L _{NE}	L _{A,LF}	LFSL
Durée	1										
L _{Amax}	-0,56	1									
SEL	-0,59	0,99	1								
L _{NP}	-0,61	0,97	0,98	1							
L _C	-0,47	0,81	0,83	0,83	1						
PNLT _{max}	-0,49	0,91	0,91	0,90	0,93	1					
EPNL	-0,49	0,89	0,90	0,90	0,94	0,98	1				
L _{LF}	-0,18	0,35	0,37	0,37	0,65	0,55	0,56	1			
L _{NE}	0,01	0,24	0,25	0,25	0,56	0,45	0,46	0,98	1		
L _{A,LF}	-0,39	0,70	0,72	0,72	0,87	0,79	0,80	0,37	0,30	1	
LFSL	-0,05	0,23	0,25	0,25	0,55	0,44	0,45	0,93	0,95	0,33	1

Les corrélations en gras et en rouge sont celles supérieures à 0,70, pour identifier les indicateurs fortement corrélés entre eux. Il apparaît, logiquement, que les indicateurs permettant de caractériser le même paramètre acoustique sont fortement corrélés entre eux. Au contraire, les indicateurs permettant de caractériser des paramètres acoustiques différents ne sont pas corrélés entre eux.

Seul l'indicateur L_{A,LF} présente un comportement différent. En effet, on constate que cet indicateur développé pour caractériser le contenu basses fréquences à l'intérieur des bâtiments est fortement corrélés aux indicateurs de niveau de bruit et moyennement avec les indicateurs de contenu basses fréquences, soit l'inverse de ce qui était attendu. On peut donc en conclure que lorsque la pondération A est appliqué au contenu basses fréquences du bruit d'avion alors l'indicateur L_{A,LF} se rapproche d'un niveau sonore. Cela montre que la pondération A n'est pas adaptée pour caractériser le contenu basses fréquences. Cet indicateur n'est ainsi pas adapté pour caractériser le contenu basses fréquence du type de bruit étudié, le bruit d'avion mesuré à l'extérieur, alors que cet indicateur a été développé pour le bruit à l'intérieur des logements.

4.1.3 Jeu de données n°2 : plusieurs aéroports

4.1.3.1 Description du jeu de données

Ce jeu de données contient des mesures par tiers d'octave, avec un pas de 1s, sur une durée comprise entre 1h et 14h à différents moments de la journée, sur plusieurs aéroports français, sans distinction du type d'avion. Compte tenu des différences de période d'enregistrement et d'aéroport, il y a en moyenne entre 2 et 32 passages d'avion par heure. Au total, 853 passages d'avions ont pu être extraits de ces enregistrements.

4.1.3.2 Calcul des indicateurs

Les mêmes indicateurs que pour le jeu de données n°1 ont pu être calculés sur les 853 enregistrements, à savoir les indicateurs retenus dans la partie §4.1.1.

Tableau 16 : Coefficients de corrélations entre indicateurs événementiels - Jeu de données n°2

Corrélations	Durée	L _{Amax}	SEL	L _{NP}	L _C	PNLT _{max}	EPNL	L _{LF}	L _{NE}	L _{A,LF}	L _{FSL}
Durée	1										
L _{Amax}	-0,62	1									
SEL	-0,66	0,99	1								
L _{NP}	-0,69	0,99	0,99	1							
L _C	-0,49	0,89	0,90	0,86	1						
PNLT _{max}	-0,43	0,89	0,89	0,85	0,98	1					
EPNL	-0,27	0,83	0,83	0,79	0,94	0,96	1				
L _{LF}	-0,19	0,59	0,61	0,55	0,85	0,83	0,84	1			
L _{NE}	-0,03	0,49	0,5	0,44	0,77	0,77	0,81	0,98	1		
L _{A,LF}	-0,56	0,89	0,89	0,88	0,91	0,89	0,85	0,71	0,63	1	
L _{FSL}	-0,1	0,59	0,6	0,55	0,83	0,83	0,84	0,96	0,96	0,72	1

Les résultats obtenus sur le jeu de données n°2 (Tableau 16) sont similaires à ceux obtenus sur le jeu de données n°1, les conclusions sont donc similaires.

4.1.4 Jeu de données n°3 : un aéroport, événements identifiés sur une année complète

4.1.4.1 Description du jeu de données

Ce jeu de données contient la mesure en tiers d'octave du niveau sonore par pas de 1 s pour chaque événement de bruit d'avion identifié par cinq stations de mesure permanentes autour d'un aéroport (cf. Figure 62), sur l'année 2024, soit 40 267 événements. Pour la plupart des événements, lorsque cela est possible, les informations concernant le vol ont été récupérées (type d'avion, type de propulsion, mouvement (décollage, atterrissage, au sol), distance, altitude).

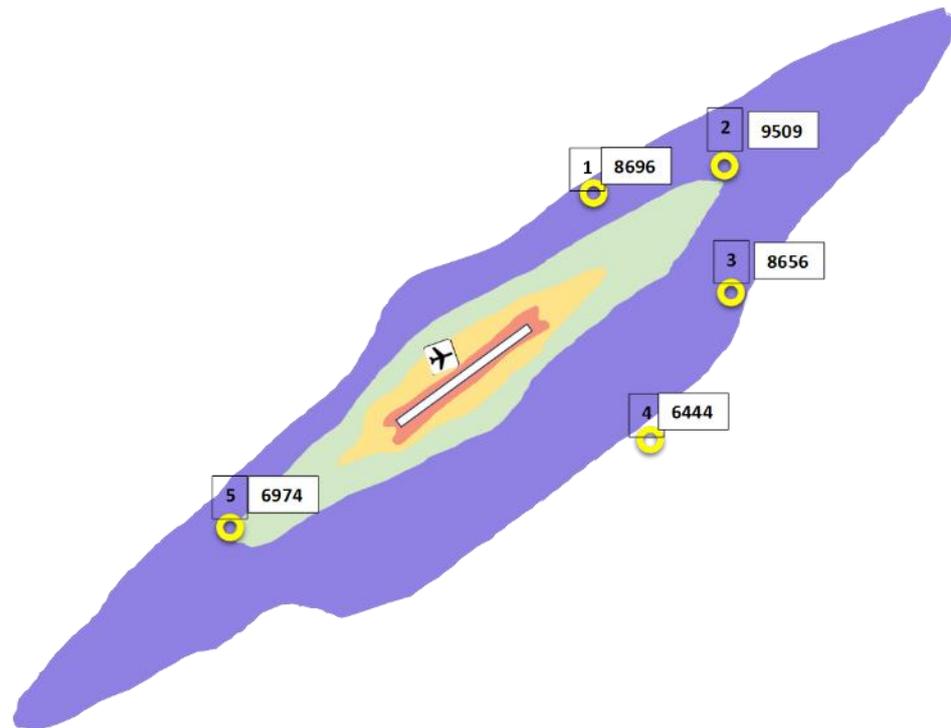


Figure 62 : Position des 5 stations de mesure autour de l'aéroport étudié pour le jeu de données n°3. Les nombres indiqués à côté de chaque station représentent le nombre de passages d'avion enregistrés sur cette station en 2024. Le fond de couleur représente les zones du PEB (rouge : zone A, jaune : zone B, vert : zone C et bleu : zone D). NB : l'orientation de l'aéroport a été modifiée pour garantir l'anonymat des données.

Les mêmes indicateurs que pour les jeux de données n°1 & n°2 ont pu être calculés sur les enregistrements, à savoir les indicateurs retenus dans la partie §4.1.1.

Tableau 17 : Coefficients de corrélations entre indicateurs événementiels - Jeu de données n°3

Corrélations	Dist.	Alti.	Durée	L _{Amax}	SEL	L _{NP}	L _C	PNLT _{max}	EPNL	L _{LF}	L _{NE}	L _{A,LF}	LFSL
Distance	1,00												
Altitude	-0,18	1,00											
Durée	0,01	0,12	1,00										
L _{Amax}	-0,36	0,15	-0,34	1,00									
SEL	-0,36	0,14	-0,37	0,99	1,00								
L _{NP}	-0,36	0,13	-0,38	0,98	0,99	1,00							
L _C	-0,20	0,09	-0,10	0,29	0,29	0,29	1,00						
PNLT _{max}	-0,18	0,09	-0,07	0,26	0,26	0,26	0,99	1,00					
EPNL	-0,19	0,09	-0,08	0,27	0,27	0,26	0,99	1,00	1,00				
L _{LF}	-0,13	0,06	-0,03	0,10	0,10	0,10	0,93	0,93	0,93	1,00			
L _{NE}	-0,15	0,07	0,05	0,11	0,11	0,10	0,82	0,80	0,81	0,96	1,00		
L _{A,LF}	-0,28	0,14	-0,08	0,36	0,35	0,35	0,94	0,92	0,93	0,82	0,71	1,00	
LFSL	-0,16	0,06	0,03	0,08	0,08	0,07	0,93	0,92	0,92	0,99	0,94	0,83	1,00

On constate que la distance, l'altitude et la durée ne sont corrélées à aucun autre indicateur.

Contrairement aux résultats précédents, on constate que les indicateurs L_{Amax} et SEL sont fortement corrélés entre eux d'une part, et que les indicateurs L_C, PNL_{Tmax}, EPNL et les indicateurs basses fréquences sont également fortement corrélés entre eux d'autre part.

Par ailleurs, les corrélations ont été également calculées séparément pour les avions au décollage, à l'atterrissage ou au sol et les mêmes tendances ont été obtenus.

4.1.5 Éléments d'interprétation

Il ressort des tableaux de corrélations que pour caractériser les événements du bruit aérien, le choix d'un indicateur dans chacune des trois catégories suivantes fournit une description des trois dimensions complémentaires :

- Un indicateur de niveau de bruit : L_{Amax}, SEL, L_{NP}, L_{Ceq}, PNL_{Tmax} ou EPNL
- Un indicateur de basses fréquences : L_{LF} (en dB) ou LFSL (en dB)
- La durée de l'événement (en seconde)

Les indicateurs L_{A,LF} et L_{NE} sont retirés des propositions d'indicateurs. En effet, comme dit précédemment, le L_{A,LF} ne semble pas adapté pour caractériser le contenu basses fréquences du bruit événementiel aérien mesuré à l'extérieur. Quant au L_{NE}, cet indicateur est obtenu en combinant le L_{LF} (pour caractériser le contenu basses fréquences) et la durée de l'événement. Or, il s'avère fortement corrélé avec le L_{LF}, et pas du tout avec la durée. Il ne semble donc pas adapté pour rendre compte de ces deux caractéristiques en simultanément.

4.2 Les travaux de BruitParif sur les indicateurs événementiels et sur les indicateurs agrégés

BruitParif a exploité les données de 21 stations de mesure de long terme classe 1 RION NA37 du réseau permanent de mesure du bruit aérien en Île-de-France sur l'ensemble de l'année 2023. Ces systèmes de mesure disposent d'une fonctionnalité de détection automatique des événements (cf. Annexe 5 pour plus de détails). Il a donc été possible pour BruitParif de réaliser à la fois le calcul d'indicateurs événementiels, mais également le calcul d'indicateurs agrégés à l'heure ou à la journée. Par contre, les données disponibles consistent en l'historique du L_{Aeq}, il n'a donc pas été possible de calculer les indicateurs pour lesquels le spectre en fréquence est nécessaire. Ces travaux sont donc complémentaires de ceux réalisés par le Cerema.

Les travaux de BruitParif ont fait l'objet d'un rapport, reproduit en Annexe 6. Les principales conclusions de ce

rapport sont synthétisées ci-après puis confrontés aux résultats obtenus par le Cerema.

4.2.1 Les indicateurs retenus par BruitParif pour caractériser les événements de bruit d'avion

Sur la base des données de mesure disponibles, BruitParif a sélectionné les indicateurs suivants pour caractériser les événements de bruit d'avion :

- Pour caractériser le niveau de bruit :
 - L_{Amax} (en dB(A))
 - $L_{Aeq,evt}$ (en dB(A))
 - LAE ou SEL (en dB(A))
- Pour caractériser l'émergence :
 - $E_{evt} = L_{Amax} - L_{A90,10min}$ (en dB(A))
- Pour caractériser la durée :
 - La durée de l'événement (en seconde)
- Et un indicateur expérimental proposé par BruitParif " Noise point " ou nombre de points par événement sonore :
 - $np = 2^{\frac{SEL-SEL_{réf}}{s}}$ avec $S = 10$ pour les données exploitées ici.

4.2.2 Les indicateurs agrégés horaires retenus par BruitParif pour caractériser l'exposition au bruit d'avion

Sur la base des données disponibles, BruitParif a sélectionné les indicateurs suivants agrégés sur une heure :

- Pour caractériser le niveau de bruit :
 - $L_{Aeq,T}$: Niveau de pression acoustique équivalent associé au bruit aérien sur la durée considérée (en dB(A))
- Pour caractériser l'émergence :
 - Emergence aérien : moyenne arithmétique des émergences événementielles calculées pour les événements aériens de l'heure considérée (en dB(A))
- Pour caractériser le nombre d'événements :
 - NE_h : Le nombre d'événements détectés par heure ;
 - NAX : Le nombre d'événements dont le L_{Amax} est supérieur au seuil X par heure ($X = [60 ; 65 ; 70]$ dB(A)) ;
 - NTAX : Le nombre d'événements dont la durée est supérieure à X secondes ($X = [10 ; 20 ; 30]$) ;
 - NEAx : Le nombre d'émergences événementielles supérieures au seuil X par heure ($X = [10 ; 20]$).

4.2.3 Les indicateurs agrégés journaliers retenus par BruitParif pour caractériser l'exposition au bruit d'avion

Sur la base des données disponibles, BruitParif a sélectionné les indicateurs suivants agrégés sur la journée :

- Pour caractériser le niveau de bruit :
 - L_{den} (en dB(A))
 - $L_{Aeq,24h}$: Niveau de pression acoustique équivalent sur 24h des événements aériens (en dB(A))
- Pour caractériser le nombre d'événements :
 - NPC " Noise Point Counter ", développé par BruitParif sur la base du calcul d'un nombre de points affecté par événement sonore sommés en s'exprimant selon la forme :

- $NPC, day = \sum_{i=1}^n np, day$
- $NPC, evening = \sum_{i=1}^n np, evening$
- $NPC, night = \sum_{i=1}^n np, night$
- $NPC, variante 1 = NPC, day + \sqrt{2} NPC, evening + 2 * NPC, night$
- $NPC, variante 2 = NPC, day + 3.16 NPC, evening + 10 * NPC, night$
- NE_j: Le nombre d'événement détecté par jour.
- NAX : Le nombre d'événement supérieur au seuil X en L_{Amax} par jour.

4.2.4 Résultats et éléments d'interprétation de l'étude BruitParif

Rappel théorique : " Un dendrogramme est un diagramme de regroupement hiérarchique, permettant d'organiser des données en arborescence en fonction de leurs similitudes ". (DataScientest, 2021)

Pour chaque station de mesure, BruitParif a proposé une fiche d'analyse des résultats présentant :

- Les matrices de corrélation (Pearson) entre indicateurs événementiels " au survol " pour les configurations tous mouvements confondus, décollages et atterrissages
- La matrice de corrélation (Pearson) et un dendrogramme (Ward) pour les indicateurs horaires en situation tous mouvements confondus
- La matrice de corrélation (Pearson) et un dendrogramme (Ward) pour les indicateurs journaliers en situation tous mouvements confondus.

Des éléments d'interprétation ont été fournis par BruitParif (cf. Annexe 5). Les principaux résultats sont repris ci-après :

- Indicateurs événementiels " au survol " :
 - Les indicateurs L_{Amax}, SEL et np sont fortement corrélés entre eux
 - Les indicateurs L_{Amax}, SEL et np ne sont corrélés ni avec l'indicateur d'émergence (qui dépend du niveau de bruit de fond sur site hors survol d'avions), ni avec la durée des événements (y compris pour le SEL).
 - Les indicateurs d'émergence et de durée ne sont pas corrélés entre eux.
- Indicateurs horaires et journaliers :
 - La classification hiérarchique des indicateurs horaires et journaliers fait apparaître pour la plupart des sites deux grands groupes d'indicateurs :
 - Un groupe associé aux indicateurs énergétiques (type LA_{eq} aérien, L_{den}, L_d, L_e, L_n)
 - Un groupe associé aux indicateurs de nombre d'événements (NE, NA, NPC, NEA, NTA).
 - L'indicateur NPC est fortement corrélé avec le nombre total d'événements NE.

En première approche, ces éléments confirment l'intérêt de retenir différents types d'indicateurs agrégés pour la description du bruit des aéronefs :

- Un indicateur énergétique type LA_{eq} ou SEL/LAE.
- Un indicateur de nombre d'événements type NE (Nombre total d'Événements), NPC (compteur à points) ou NA.

Le NE présente l'inconvénient de ne pas prendre en compte le niveau sonore des événements aériens. Les indicateurs NA présentent l'inconvénient d'un effet de seuil associé, si un nombre limité de valeurs de niveaux est utilisé (voir §5.2). Cet effet tend à disparaître pour des seuils faibles (NA55 ou NA60), mais l'indicateur tend alors à se rapprocher du NE.

D'après BruitParif, le compteur à points NPC peut représenter un compromis entre le NE et le NA en comptant l'ensemble des événements sonores aériens et en prenant en compte leurs niveaux de bruit de manière continue tout en s'affranchissant des effets de seuil.

Une autre option consiste à représenter la distribution des événements en adaptant la plage de valeur de niveaux de l'indicateur, la largeur des classes de niveaux et donc le nombre de classes à la situation rencontrée. Ainsi, dans les travaux sur la LOM 90 (Olny et al., 2025), le groupe a conclu : " **La représentation des NAX pour une large plage de valeur de niveaux semble toutefois plus difficile à appréhender, d'où la proposition du groupe de travail de limiter le pas de représentation des résultats à 5 dB et de compléter par la représentation graphique des distributions des indicateurs de niveaux (plus compréhensible), en choisissant un pas compris entre 1 et 5 dB, à adapter à chaque situation.** " (voir §5.2.2)

4.3 Synthèse de la Partie 4

En ce qui concerne les indicateurs événementiels, les conclusions obtenues par le Cerema sont proches de celles obtenues par BruitParif :

- Les indicateurs caractéristiques d'une composante du bruit aérien (niveau sonore, contenu basses fréquences) sont corrélés entre eux.
- Les indicateurs de niveau sonore ne sont pas corrélés avec les indicateurs de contenu basses fréquence, la durée de l'événement ou l'indicateur d'émergence.

En ce qui concerne les indicateurs agrégés sur une période (l'heure ou la journée), il existe deux groupes d'indicateurs :

- Les indicateurs énergétiques
- Les indicateurs de nombre d'événements.

Un parallèle peut être fait entre les résultats sur les indicateurs événementiels et ceux sur les indicateurs agrégés : les indicateurs énergétiques peuvent être associés à la durée (pour les indicateurs événementiels) ou au nombre d'événements sur une période de temps donnée (pour les indicateurs agrégés) pour mieux décrire la situation acoustique.

Ceci semble être en accord avec la demande exprimée par le représentant des associations de riverains au sein du groupe de travail, à savoir la prise en compte de la répétitivité des événements aériens (croisement entre la durée des événements et leur nombre) dans la description de l'exposition au bruit d'avion des riverains.

Les parties précédentes ont permis de rappeler à la fois les spécificités du bruit lié au trafic aérien, en termes de nature des sources et d'évolutions prévisibles. Les mécanismes de la perception humaine et l'état des connaissances sur les effets sanitaires ont été rappelés. Les principales métriques utilisées aujourd'hui ou par le passé ont été présentées et les interdépendances entre les indicateurs d'événements ont été analysées au travers de l'exploitation de jeux de données récents, issus de mesures acoustiques. Un état des pratiques concernant la modélisation des indicateurs, et les limites actuelles des méthodes et outils de calcul a complété le panel des moyens disponibles pour évaluer les métriques acoustiques.

Cette dernière partie vise à dresser une synthèse des constats effectués et présente certaines propositions concernant les indicateurs complémentaires qui pourraient être introduits et testés pour améliorer la caractérisation du bruit aérien. Un regard de côté est porté sur les travaux récents menés depuis 2019 sur le bruit ferroviaire et motivés par la volonté du législateur d'intégrer des indicateurs événementiels. Au-delà du choix d'indicateurs, d'autres pistes d'amélioration des connaissances sont abordées.

5.1 Constats

Plusieurs points saillants se dégagent du travail de synthèse réalisé et des échanges au sein du groupe de travail:

1. La problématique de l'exposition au bruit aérien, si elle ne concerne qu'une part faible de la population, relativement à d'autres nuisances liées aux transports (routier ou ferroviaire), cristallise des attentes fortes en termes d'action publique, que ce soit au niveau national ou international. Avec la réduction des émissions de gaz à effet de serre, de polluants locaux, le bruit des avions reste une priorité en matière de protection de l'environnement.
2. En parallèle de la question énergétique, des efforts importants ont été faits, depuis plus de cinquante ans, pour réduire les nuisances associées au bruit aérien: durcissement des normes pour les constructeurs, accélération du renouvellement de la flotte, stratégies de plan de vol, approche équilibrée, restrictions de vols, contraintes d'urbanisme, renforcement des protections des riverains, amélioration de l'information des riverains...
3. Malgré ces actions, le bruit du trafic aérien reste un sujet prégnant qui mobilise l'ensemble des acteurs : du secteur aéronautique, chercheurs, politiques, société civile. Plusieurs raisons sont identifiées pour tenter d'expliquer ce fait :
 - l'augmentation générale et continue du trafic aérien, répondant en partie à l'évolution des modes de déplacement, des attentes et enjeux/modèles économiques,
 - la densification urbaine, en particulier autour des aéroports,
 - les progrès dans l'appréhension scientifique et la communication sur les effets sanitaires (extra-auditifs), et notamment les conséquences de l'exposition chronique,
 - en corollaire, les attentes croissantes de la population vis-à-vis de la qualité du cadre de vie, sain et apaisé,
 - les attentes de transparence sur les conditions d'exposition et l'accès facilité à ces informations.
4. Au fil des travaux scientifiques, techniques et réglementaires, de nombreuses propositions et évolutions ont eu lieu sur la façon d'objectiver les situations d'exposition. Si les indicateurs énergétiques (L_{Aeq}, L_{den}...) constituent une base incontournable, certains pays ou aéroports ont fait le choix d'indicateurs complémentaires, permettant en particulier d'évaluer la dimension événementielle du bruit. Certains de ces indicateurs ont été abandonnés ou ont évolué, et il n'existe pas de consensus sur le choix de ces indicateurs, même si certains indicateurs sont davantage utilisés : L_{max}, SEL, NEF, NE.
5. Si les connaissances scientifiques concernant les effets extra-auditifs se sont enrichies ces dernières années, amenant de nouvelles positions de l'OMS, l'analyse détaillée de ces travaux et les modifications, parfois mal comprises (cf. mise à jour des fonctions dose-réponse ou des poids affectés aux pathologies), révèlent des manques de robustesse dans ces résultats. Ce constat est d'une part dû à un manque récurrent de données

épidémiologiques ou sanitaires et à la difficulté de disposer systématiquement d'indicateurs acoustiques pertinents (LAmax par exemple) pour mener ces études,

6. d'autre part, la complexité et le temps nécessaire à la réalisation d'études sanitaires statistiquement robustes (menées sur plusieurs années ou dizaines d'années) peut amener à un décalage entre les résultats, l'évolution des situations d'exposition (trafic, nature des émissions, environnement) ou encore l'évolution des méthodologies.
7. Au-delà des choix d'échantillonnage, ou de la disponibilité d'indicateurs acoustiques pertinents, certains " biais " ou insuffisances méthodologiques, indissociables de toute étude sanitaire, ont pu être mis en évidence : insuffisance de la prise en compte de facteurs non-acoustiques (facteurs démographiques, perception de l'environnement, attentes, facteurs socio-économiques), de l'isolation des bâtiments, des situations de multi-exposition...L'amélioration progressive de l'accès à ces données, devrait bénéficier progressivement aux études et enquêtes et à l'appréhension des facteurs déterminants. Le développement d'études pluri- ou multidisciplinaires, l'accès facilité aux données environnementales, constituent en ce sens des pistes de progrès à considérer.
8. En conséquence, il est aujourd'hui très difficile de proposer des indicateurs ou indices (destinés au public) acoustiques et des valeurs de référence à respecter, totalement pertinents du point de vue sanitaire (validés scientifiquement), pour rendre compte des enjeux de l'exposition au bruit. Ce constat n'est pas propre au bruit du trafic aérien et peut être fait pour les autres sources de transport.
9. Cependant, pour combler progressivement, à moyen ou long terme, les verrous précédemment évoqués, il est d'ores et déjà possible d'améliorer les dispositifs d'observation (et de prévision) du bruit dans l'environnement, en complétant les descripteurs acoustiques actuels. Les principales dimensions mises en évidence dans ce rapport, et pour lesquelles plusieurs options d'indicateurs/indices d'événements ont été proposées concernent :
 - Les indicateurs événementiels de niveau sonore, pour lesquels les besoins font l'unanimité. Ils complètent utilement l'information énergétique, contribuent à consolider les connaissances scientifiques, répondent à une attente exprimée de la société civile.
 - Les indicateurs de durée : durée des événements ou inter-événements (répit). Ces indicateurs ne sont pas strictement acoustiques mais apportent une information compréhensible, enrichissante pour la description de l'environnement sonore.
 - Les indicateurs de basses fréquences, mettent en exergue une dimension peu étudiée dans les problématiques de gêne ou sanitaires, mais dont les effets sont parfois verbalisés. Ils portent une information également utile pour objectiver l'évolution de la nature spectrale du bruit en lien avec l'évolution des motorisations.
10. En plus des indicateurs d'événements, le panel d'indicateurs se doit d'être complété d'indicateurs agrégés par périodes, pour pouvoir évaluer l'exposition chronique.
11. L'évaluation des indicateurs agrégés, par la modélisation est un prérequis quasi-incontournable, même si empreint d'incertitudes, et qui permet de dresser une représentation spatiale, voire temporelle de l'exposition, au travers de cartographies.

5.2 Retour d'expérience : travaux réglementaires sur les " pics de bruit " ferroviaires

5.2.1 Rappel du contexte des travaux relatifs à l'article 90 de la Loi d'Orientation des Mobilités

Texte issu du rapport de bilan de la phase 1 (Olry et al., 2025) de mise en œuvre de l'arrêté du 29 septembre 2022

La mise en service, en juillet 2017, de deux lignes à grande vitesse Bretagne Pays de Loire (BPL) et Sud Europe Atlantique (SEA), bien que respectant la réglementation en vigueur, a suscité de nombreuses plaintes en lien avec les nuisances acoustiques et vibratoires, qui ont conduit à la mobilisation des élus locaux et parlementaires. En 2019, le rapport de la médiation relative aux nuisances générées par les TaGV (Trains à Grande Vitesse) des lignes BPL et SEA, publié par le

CGEDD (Baudoïn et al., 2019), a soulevé la nécessité d'approfondir les études, pour mieux prendre en compte notamment le caractère événementiel des circulations ferroviaires ou "pics de bruit" et leurs impacts sur la santé. Le 24 décembre 2019, la Loi d'Orientation des Mobilités (dite LOM) intègre l'article 90, versé depuis dans le code de l'environnement ([Article L571-10-2](#)) rédigé comme suit :

" Les indicateurs de gêne due au bruit des infrastructures de transport ferroviaire prennent en compte des critères d'intensité des nuisances ainsi que des critères de répétitivité, en particulier à travers la définition d'indicateurs de bruit événementiel tenant compte notamment des pics de bruit.

Un arrêté conjoint des ministres chargés des transports, de l'environnement et du logement précise les modalités d'évaluation des nuisances sonores des transports ferroviaires en fonction des critères mentionnés au même premier alinéa. "

À la suite de la saisine du Conseil National du Bruit et du Cerema par le ministère en charge de l'écologie, des travaux ont été menés entre 2019 et 2022, pour aboutir à la publication de l'arrêté du 29 septembre 2022 fixant "à titre expérimental les modalités de détermination et d'évaluation applicables à l'établissement d'indicateurs de gêne due au bruit événementiel des infrastructures de transport ferroviaire".

La rédaction de cet arrêté s'est basée, notamment, sur les trois avis du CNB (Col. CNB, 2019, 2020, 2021), issus de la mobilisation intense des membres du CNB, du Cerema, ainsi que de gestionnaires d'infrastructures ferroviaires.

Pour rappel (extrait de l'arrêté du 29/09/2022) :

" Le présent arrêté précise les modalités applicables, durant une période d'observation de trois années, d'évaluation des nuisances sonores des infrastructures de transports ferroviaires, visant à quantifier la pertinence technique et fonctionnelle de différents indicateurs de bruit événementiel pour ces infrastructures. Il complète par ailleurs sur la même période d'observation de 3 années, des dispositions en faveur de la prise en compte d'une ambiance sonore dite "très modérée", ainsi qu'une évaluation des niveaux de pression acoustique en soirée. "

Les travaux menés sur le bruit d'origine ferroviaire se distinguent de ceux conduits dans la présente étude, commandée au Cerema par l'Acnusa, et en parallèle de ceux menés au sein du GT "Pics de bruit aérien", car initialement motivés par l'adoption la Loi d'Orientation des Mobilités. L'article 90 a ainsi vocation à être accompagné par un arrêté s'appliquant aux études d'impact.

Il convient de noter que ce texte n'impose pas explicitement d'introduire de nouveaux seuils réglementaires pour les nouveaux indicateurs. Ce point pourrait évoluer dans le futur, au travers d'arrêtés futurs éventuels, mais les recherches et analyses effectuées par les groupes de travail "pics de bruit ferroviaires" n'ont à ce jour pas abouti à des propositions en ce sens. En cause, le manque d'études sanitaires qui n'a pour le moment pas permis d'orienter le législateur vers des valeurs de référence pertinentes et suffisamment robustes pour imposer de nouveaux objectifs (seuils) réglementaires.

La présélection des indicateurs caractérisant à la fois chaque événement et les indices agrégés par périodes s'est basée sur un examen des pratiques dans les autres domaines (bruit de voisinage, bruit des ICPE, bruit aérien). L'introduction du NA (Noise Above) est par exemple directement inspirée des pratiques dans le domaine aéronautique. A contrario, certains indicateurs et notamment les indicateurs d'émergence (événementielle, spectrale ou globale) n'ont pas été retenus, alors qu'employés par exemple pour caractériser les événements aériens.

5.2.2 Rappel et commentaires à propos des indicateurs événementiels introduit dans l'arrêté du 29/09/2022

L'arrêté du 29/09/2022 étant empreint d'une dimension expérimentale, plusieurs indicateurs permettant de caractériser chaque événement sonore ferroviaire ont été maintenus dans un premier temps :

- **LpASmax** : niveau de pression acoustique maximum, utilisant la pondération temporelle "S" slow (=lente) avec une constante de temps de 1 seconde lorsque l'indicateur est mesuré ;
- **LAeq,1s,max** : niveau de pression acoustique équivalent continu maximum, évalué sur 1 seconde lorsque l'indicateur est modélisé (concerne essentiellement la phase 2) ;
- **Tevt** : la durée de détection de l'événement sonore lié à la circulation ferroviaire ;
- **LAeq,Tevt** : niveau de pression acoustique continu équivalent évalué sur la durée Tevt ;
- **LAE** (également parfois noté SEL_A) : niveau acoustique d'exposition. L'indicateur est calculé de la façon suivante : $LAE = LAeq, Tevt + 10 \log_{10}(Tevt/T0)$, où $T0=1s$;

Le législateur a également laissé la possibilité de compléter la liste par d'autres indicateurs en justifiant de leur intérêt.

Pour les circulations à grande vitesse ($v > 250 \text{ km/h}$), les indicateurs acoustiques sont également évalués en **dB(C)**. Ce choix a été motivé par l'intensité significative des émissions acoustiques, en particulier à **basses fréquences**, pour ce type de circulation. Bien qu'il n'existe aujourd'hui pas suffisamment de résultats scientifiques permettant de quantifier le rôle joué par les basses fréquences, certaines études laissent penser qu'elles pourraient jouer un rôle explicatif dans la gêne perçue ou d'autres effets extra-auditifs.

Concernant les indices agrégés, l'arrêté du 29/09/2022 prévoit l'évaluation des NA_X , pour l'ensemble des indicateurs d'événements précédent,

- **$\text{NAX}_{\text{LpASmax}}$ ou $\text{NAX}_{\text{LAeq,1s,max}}$;**
- **$\text{NAX}_{\text{LAeq,Tevt}}$;**
- **NAX_{LAE} (ou $\text{NAX}_{\text{SEL}_A}$).**

les NAX_X étant évalués à partir de $X=50 \text{ dB(A)}$, par pas de 2 dB(A) . Les NAX sont également évalués en **dB(C)** pour les Lignes à Grande Vitesse.

A ce stade de la mise en œuvre de l'arrêté du 29 septembre 2022, les recommandations intermédiaires ont porté sur la pertinence des indicateurs selon trois critères :

- **Pertinence technique** : capacité à évaluer les indicateurs en situation de mesurage. La faisabilité de la modélisation des indicateurs sera analysée lors de la deuxième phase qui s'achèvera en septembre 2026.
- **Pertinence fonctionnelle** : capacité des indicateurs à traduire l'intensité et la répétitivité des événements ferroviaires
- **Lisibilité par le grand public** : capacité des indicateurs à être compris

A l'issue de la première phase d'expérimentation, des recommandations ont été formulées visant d'une part à limiter le nombre d'indicateurs d'événement évalués, sur la base des 3 critères précités ; et d'autre part pour améliorer la lisibilité de certains indicateurs (NA_X). Ces recommandations restent provisoires, dans l'attente des conclusions de la phase 2.

Tableau 18: Proposition de liste réduite d'indicateurs événementiels à retenir pour l'évaluation du bruit ferroviaire, en plus des indicateurs réglementaires actuels.

*On rappelle que la norme de mesurage du bruit ferroviaire NFS 31-088 prévoit de conserver l'ensemble des données brutes nécessaires pour évaluer ces indicateurs.

Infrastructures ferroviaires concernées	Indicateurs évalués pour chaque événement	Indicateurs agrégés sur les périodes réglementaires
Toutes infrastructures ferroviaires	<p>Obligatoire : LAeq,1s,max</p> <p>Facultatif * : Tevt SEL_A/LAE Autres indicateurs éventuels</p>	<p>Obligatoire : $\text{NAX}_{\text{LAeq,1s,max}}$ par pas de 5 dB(A), à partir de 50 dB(A) Représentation complémentaire du nombre de LAeq,1s,max par classes de 1 dB(A) à 5 dB(A)</p> <p>Facultatif : $\text{NAX}_{\text{SEL}_A}$ Temps cumulé Représentation de la distribution des Tevt Autres indicateurs agrégés</p>
LGV supportant des trains circulant à plus de 250 km/h	<p>Obligatoire : LCeq,1s,max</p> <p>Facultatifs* : SEL_C/LCE, Autres indicateurs éventuels</p>	<p>$\text{NAX}_{\text{LCeq,1s,max}}$ par pas de 5 dB(C), à partir de 50 dB(C) Représentation complémentaire du nombre de LCeq,1s,max par classes de 1 dB(C) à 5 dB(C)</p> <p>Facultatif : $\text{NAX}_{\text{SEL}_C}$ Autres indicateurs agrégés</p>

En synthèse, les premières recommandations issues de la phase 1 ont conduit à limiter la caractérisation de chaque événement au LAeq,1s,max , de façon obligatoire. Les niveaux de corrélation élevés entre les indicateurs d'événements ont en partie permis de justifier ce choix. Certains indicateurs, considérés comme porteurs d'une information alternative d'intérêt, sont proposés pour une évaluation facultative (Tevt , SEL). En corollaire, un seul indicateur agrégé est rendu obligatoire : $\text{NAX}_{\text{LAeq,1s,max}}$, complété de la représentation de la distribution des LAeq,1s,max ,

selon un pas adapté à chaque situation d'exposition. Pour les LGV, la caractérisation des mêmes indicateurs/indices en dB(C) est conservée, dans un souci d'information mais aussi de potentielles avancées sur la connaissance des effets des basses fréquences.

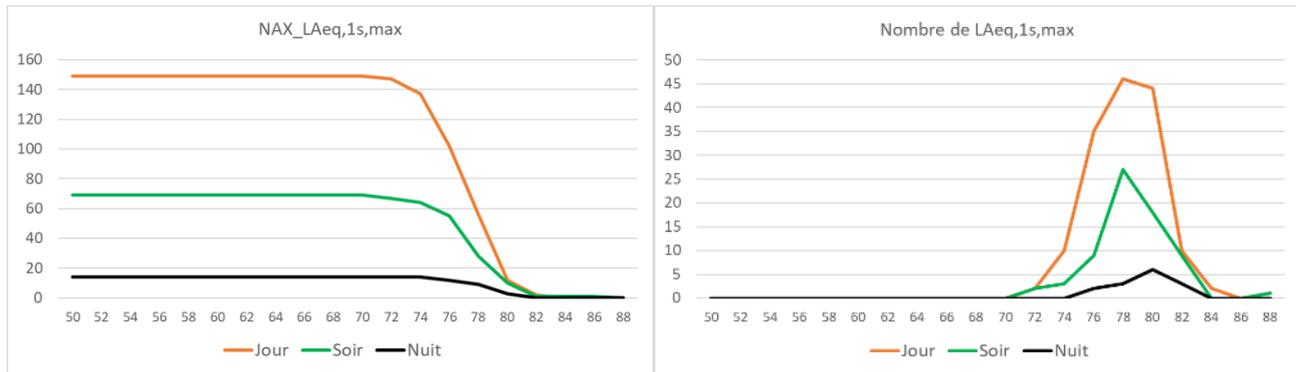


Figure 63 : Exemples de représentation des $NAX_{LAeq,1s,max}$ (gauche) et de la distribution du nombre de $LAeq,1s,max$ (droite), pour des événements ferroviaires, pour les trois périodes jour, soir, nuit, par pas de 2dB.

5.2.3 Analogies et distinctions entre les problématiques de pics de bruit " ferroviaires " et " aériens "

Il existe des similitudes évidentes entre les enjeux et les réflexions menées sur la caractérisation des événements sonores liés aux infrastructures ferroviaires et au trafic aérien. La nature des sources du point de vue spectral ou temporel, les leviers de réduction des expositions, la perception liée à certains paramètres extra-auditifs, l'historique du traitement réglementaire ou encore l'influence du contexte institutionnel ou normatif (national ou international), peuvent amener à certaines nuances dans la façon d'aborder les deux problématiques.

Dans les deux cas, que la demande soit d'origine sociétale, scientifique, ou institutionnel, il existe une attente de meilleures prises en compte des phénomènes événementiels dans la caractérisation et la réduction des expositions à ces deux modes de transport.

Un constat partagé, y compris au niveau international, est le manque d'assise scientifique qui permettrait d'isoler le ou les paramètres physiques explicatifs d'impacts sanitaires avérés. De façon symptomatique, cet état de fait a conduit l'OMS à abandonner²³ en 2018 (WHO, 2018) les recommandations faites sur le L_{Amax} dans ces avis précédents (WHO, 2000), même si l'intérêt de l'indicateur pour étudier les effets du bruit ferroviaire et aérien, sur le sommeil avait été mis en évidence.

Cette décision était également motivée par le souhait de l'organisation non gouvernementale, de mettre en cohérence ses recommandations avec les indicateurs (L_{den} , L_n) de la " directive bruit " 2002/49/CE, dans un souci de simplification d'application. Ce souhait de simplification ou de convergence, gage d'une meilleure compréhension par le grand public, peut constituer un critère de choix pour de nouveaux indicateurs. C'est pourquoi il nous paraît nécessaire d'assurer un lien entre les démarches menées sur les problématiques du bruit ferroviaire et aérien, tout en conservant certaines spécificités. Il est ainsi possible d'identifier certains objectifs communs :

- Compléter la caractérisation du bruit par rapport aux indicateurs réglementaires existants en explicitant la dimension événementielle (intensité, nombre d'événements, répétitivité...)
- Dans la limite des connaissances scientifiques, introduire des indicateurs susceptibles de faciliter une mise en relation avec les impacts sanitaires de court et de long terme.

²³ Extrait de du rapport "Environmental noise guidelines for the European Region", OMS,2018 (p10): "In many situations, average noise levels like the L_{den} or L_{night} indicators may not be the best to explain a particular noise effect. Single-event noise indicators – such as the maximum sound pressure level ($L_{A,max}$) and its frequency distribution – are warranted in specific situations, such as in the context of night-time railway or aircraft noise events that can clearly elicit awakenings and other physiological reactions that are mostly determined by $L_{A,max}$. Nevertheless, the assessment of the relationship between different types of single-event noise indicators and long-term health outcomes at the population level remains tentative. The guidelines therefore make no recommendations for single-event noise indicators."

- Sélectionner des indicateurs évaluables et prédictibles (modélisation) pour apprécier des scénarios ou situations projetées
- Sélectionner des indicateurs/indices compréhensibles par le plus grand nombre (communicants) et si possibles communs aux différentes problématiques de bruit des transports (terrestres ou aérien).

Parmi les exemples de propositions, inspirées par les 5 années de travaux menés sur les pics de bruit ferroviaire, on peut mentionner en particulier :

- L'utilisation généralisée du NAX sur une plage de niveau X (pour le **LAeq,1s,max**) X suffisante (inférieure ou égale à 50 dB et sans limite supérieure à priori). Ce choix, retenu jusqu'à présent, pour le ferroviaire permet de limiter l'"effet de seuil" souvent critiqué et lié à l'utilisation d'un nombre réduit de valeurs de X (62, 65, 70 généralement pour l'aérien). L'ensemble des événements sonores caractérisés est ainsi préservé et permet un suivi d'une évolution de la situation d'exposition, par exemple lorsque les émissions acoustiques de la flotte baisse du fait du renouvellement technologique, mais que le trafic augmente.
- En complément, le bilan de la phase 1 de l'arrêté du 29/09/2022 a mis en évidence un risque de difficulté de compréhension/lecture d'une représentation de grand nombre de NAX. C'est pourquoi il a été également proposé de représenter la distribution des LAeq,1s,max, selon des classes, plus ou moins larges, adaptées aux situations d'exposition (cf.
- Tableau 18).
- Des travaux de la LOM90 et de l'analyse bibliographique faite dans la présente étude, ressort que la problématique des basses fréquences pourrait constituer un enjeu sanitaire encore mal appréhendé du point de vue scientifique. L'introduction d'indicateurs moins "filtrés" (pondération C ou autre) ou spécifiques à ce domaine spectral présenterait potentiellement un intérêt dans la perspective d'études sanitaires complémentaires.

Ces premières propositions constituent une base de réflexion, enrichie dans le paragraphe suivant, des spécificités liées au bruit aérien.

5.3 Propositions d'indicateurs complémentaires

La revue des métriques acoustiques (voir Partie 3), possiblement adaptées pour décrire le bruit aéronautique, a révélé la multitude des constructions et choix possibles et issus de travaux de recherche menés depuis de nombreuses années.

La complexité des phénomènes sonores responsables de la perception humaine et des effets sanitaires ne semblent pouvoir être décrite, de manière compréhensible par une métrique unique mais plutôt par l'association de plusieurs descripteurs portant chacun une information supplémentaire utile à l'appréhension de l'exposition. Les indicateurs énergétiques réglementaires (LAeq, Lden) constituent un socle, incontournable et partagé, servant encore de base à la majorité des études sanitaires. Ce socle peut être enrichi pour mettre en cohérence l'image mentale de la perception et les indicateurs, ou pour contribuer à améliorer les études sanitaires.

Des travaux précédents avaient déjà conclu à la nécessité d'offrir un panel d'indicateurs et indices adaptés aux situations, périodes, effets considérés (voir §2.5.1). Les NA_SEL semblent par exemple pertinents pour évaluer la perturbation du sommeil (période de nuit) ; les NA_LAmax plus adaptés aux interactions avec la parole ; les LAmax et SEL sont complémentaires pour comparer les événements sonores avec à la fois une information d'intensité et de dose reçue à l'événement.

Beaucoup des indicateurs évalués présentent des corrélations mathématiques fortes entre eux (voir Partie 4). Les critères de "compréhension" et de "facilité d'évaluation", par la mesure ou la modélisation, ont permis d'affiner les propositions.

En plus de la dimension énergétique, déjà décrite par les indicateurs réglementaires, trois dimensions se dégagent des analyses : la capacité à traduire le **caractère événementiel**, la **dimension temporelle** (exposition/repos) et la **nature spectrale du bruit**, avec pour cette dernière, un intérêt particulier pour les fréquences basses, moins bien décrites par les indicateurs acoustiques évalués en dB(A).

Caractère événementiel :

La norme de référence (NF S31-190) dédiée au mesurage du bruit aéronautique, prévoit déjà la description des événements acoustiques et du trafic en utilisant des indicateurs d'événements et de durée.

- Le L_{Amax} fait partie des indicateurs quasiment incontournable du fait de sa relative simplicité d'évaluation (mesure et modélisation) et de son caractère compréhensible. On peut, lui substituer le $L_{Aeq\ 1s\ max}$, la différence liée au filtrage temporel n'ayant pas de conséquence significative sur le résultat obtenu.
- Le LAE ou SEL, également couramment utilisé pour le bruit aéronautique depuis plusieurs années, il reste moins compréhensible que le L_{Amax} auquel il est souvent corrélé, sauf, par construction, dans le cas de durées d'événement longues (plusieurs dizaines de seconde). Il est mesurable et modélisable avec les outils et méthodes actuelles.
- L'émergence événementielle (E_{evt}) revêt un intérêt particulier car tenant compte du bruit ambiant au moment de la survenue de l'événement sonore. Cet indicateur, compréhensible, est cependant difficile à modéliser. Il a été maintenu dans la liste restreinte des indicateurs à considérer, mais avec une priorité moindre.

Dans un souci de simplification de mise en œuvre et parce que ces indicateurs répondent déjà en partie aux attentes, ils ont été retenus dans les propositions finales.

D'autres indicateurs, spécifiques au bruit aérien, ont été évoqués dans la présente étude (PNLT_{max}, EPNL). Leur " valeur ajoutée " n'étant pas significative, ils n'ont pas été retenus dans la liste restreinte.

L'indicateur d'événement np (noise point), développé et proposé par Bruitparif, a été maintenu dans la liste restreinte. Il est cependant fortement corrélé au L_{Amax} et LAE/SEL. Dans l'optique d'expérimentations (test auprès des utilisateurs, études sanitaires éventuelles) de l'indicateur agrégé associé (NPC, noise points counter ou compteur à points), il présente un intérêt prospectif.

Concernant les indicateurs agrégés qu'il est proposé de retenir : les NA_X et analyse distributives des $L_{Amax} / L_{Aeq\ 1s\ max}$ ou LAE/SEL, sur des plages de niveaux X permettant de prendre en compte l'intégralité des événements aéronautiques détectés et avec un pas adapté à la distribution des indicateurs, compris entre 2 et 5 dB(A). Les analyses distributives sont également déjà proposées dans la NF S31-0190 . De même, l'indicateur non-acoustique du nombre d'événements a été considéré comme d'intérêt et retenu.

Durée d'exposition :

La durée de chaque événement et la durée cumulée des événements sont des descripteurs déjà proposés à l'évaluation dans la norme NF S31-0190. Ce sont des descripteurs explicites, faciles à comprendre et à évaluer (mesure/modélisation), dès lors que les événements sont bien identifiés.

Il est proposé d'ajouter les durées de répit (*i.e.* les durées entre événements), la durée totale de répit et l'analyse distributive des répits.

Caractérisation spectrale :

La nature spectrale des bruits considérés revêt une importance dans la perception et certains effets sanitaires. L'utilisation d'indicateurs pondérés (A), à des fins de simplification de la représentation masque ce contenu fréquentiel qui pourrait contenir des facteurs explicatifs aux nuisances. Les interrogations vis-à-vis notamment des basses fréquences ont été présentées au §2.2.3. L'objectif de l'introduction d'indicateurs dédiés vise d'une part, à porter l'attention sur l'évaluation (mesure et modélisation) du contenu spectral des bruits aéronautiques et d'autre part à proposer un indicateur spécifique pour caractériser les basses fréquences, ceci dans l'optique d'alimenter de futurs travaux de recherche.

La mesure spectrale (bandes fines, par bandes d'octave ou 1/3 d'octave), si elle est classique (facultative dans la NF S31-190), n'est pas accessible à tous les matériels de mesurage aujourd'hui déployés pour la surveillance du bruit aérien. L'évaluation de ce type d'indicateurs peut donc impliquer un investissement supplémentaire.

Concernant la modélisation, comme mentionné au §3.7.3, si les calculs prédictifs utilisent des données en bandes de 1/3 d'octave, les résultats spectraux ne sont pas accessibles de façon standard. Leur obtention nécessiterait donc des développements spécifiques.

Remarque : de façon générale, les propositions présentées ci-dessus, NPC mis à part, ne visent pas directement l'amélioration de la communication auprès du public sur les situations d'exposition. Les indicateurs/indices portent une information objective qui reste riche et conséquente, potentiellement utile dans un premier temps aux travaux scientifiques amonts (études sanitaires, enquête de gêne) où études techniques approfondies. Cependant, des propositions de représentations de certains indicateurs, pour en faciliter l'appréhension sont faites au §5.4.2.

Tableau 19: Liste restreinte des indicateurs d'événement et agrégés pour le bruit aérien à considérer dans une phase d'expérimentation.

En police " normal " : les métriques déjà proposées dans la norme NF S 31-190 ; En " italique " : les métriques avec limites d'utilisation ou à caractère expérimental, en " gras " : les propositions issues de la présente étude.

Dimension décrite	Indicateurs d'événement	Indicateurs agrégés
Dimension événementielle	<ul style="list-style-type: none"> • L_{Amax}, OU $L_{Aeq 1s max}$ • LAE/SEL • E_{evt} (mesure uniquement) • <i>np</i> (expérimental) 	<ul style="list-style-type: none"> • NA_X ou analyse distributive des L_{Amax} OU $L_{Aeq 1s max}$ • NA_X ou analyse distributive SEL <p>A l'instar des choix faits pour le ferroviaire, les valeurs de X peuvent couvrir une gamme adaptée pour inclure tous les événements, par pas de 2 à 5 dB(A)</p> <ul style="list-style-type: none"> • NE • <i>NPC</i> (expérimental)
Durée d'exposition	<ul style="list-style-type: none"> • T_{evt} : durée de l'événement 	<ul style="list-style-type: none"> • Durée totale des événements par périodes • Analyse distributive des durées des événements • Durée totale sans événements (répit) par périodes • Analyse distributive des durées de répit
Caractérisation spectrale (1/3 octave), basses fréquences	<ul style="list-style-type: none"> • L_{LF} ou LFSL (basses fréquences) • Spectre des événements 	Niveau équivalent sur la durée de l'ensemble des événements (à tester)

5.4 Recommandations pour améliorer la caractérisation du bruit aérien

5.4.1 Recommandation n°1 : Préciser le besoin

Le Cerema s'est attaché à **proposer un jeu d'indicateurs qui permettent de caractériser le bruit aérien événementiel**.

Pour aider au choix d'un ou des indicateurs/indices, il convient de se réinterroger sur les attendus de leur utilisation. Pour cela, on peut s'inspirer de la mise en place d'un système de suivi/évaluation (Centre de ressources en évaluation, 2025), en le transposant à la gestion du bruit aérien (Centre de ressources en évaluation, 2025).

La démarche de mise en place d'un système de suivi se passe en plusieurs étapes :

- Une phase de sélection d'indicateur,
- Suivie par une phase de conception, où le choix des indicateurs est réinterrogé.
- Vient ensuite le suivi de la sélection des indicateurs en phase opérationnelle
- Et enfin le suivi de la sélection des indicateurs après un premier cycle d'utilisation.

Pour chaque étape, un ensemble de caractéristiques de l'indicateur peut être testé et conduire à retenir ou exclure un indicateur en fonction du besoin exprimé par les utilisateurs.

Tableau 20 : Transposition de la mise en place d'un système de suivi/évaluation pour la recherche d'indicateurs pour le bruit aérien

La colonne de gauche cite en intégralité la démarche proposée par (Centre de ressources en évaluation, 2025), la colonne de droite en propose une transposition pour la recherche d'indicateurs pour le bruit aérien.

SYSTEME DE SUIVI ÉVALUATION	TRANSPOSITION POUR LA RECHERCHE D'INDICATEURS POUR LE BRUIT AERIEN
Sélection d'indicateurs : conseils préliminaires	
Des indicateurs devraient être :	
1. Mixtes	
<p>C'est-à-dire quantitatifs (des nombres, des quantités, des montants) mais également qualitatifs (des opinions, des perceptions, des témoignages, des récits).</p>	<p>Cette caractéristique n'est pas directement transposable à notre étude. En effet, un indicateur acoustique peut être physique, perceptif ou sanitaire. Tout dépend de ce que l'on souhaite caractériser :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le bruit aérien événementiel • La perception du bruit aérien • Les effets sanitaires du bruit aérien <p>Nécessite de caractériser les 3 aspects : physique, perceptif et sanitaire.</p>
2. Compréhensibles par les usagers/bénéficiaires	
<p>Même si les données pourront être, dans un second temps, intégrées, exploitées et agrégées via des modes de calculs sophistiqués, les données sollicitées auprès des usagers devraient rester accessibles et compréhensibles pour les répondants comme pour les enquêteurs.</p> <p>Chaque répondant devrait être en mesure de comprendre à quoi est destiné l'utilisation des données qu'il fournit (non seulement dans quel but le répondant/usager est sollicité mais également pouvoir interpréter le sens de chaque question et l'exploitation qui sera faite des données).</p>	<p>Cette caractéristique nécessite de définir qui sont les usagers / bénéficiaires. Cela interroge donc l'utilisation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • A quoi doit servir la nouvelle combinaison d'indicateurs ? <ul style="list-style-type: none"> ○ A enrichir les travaux de recherche (études sanitaires) ○ A gérer/réglementer/contrôler le trafic aérien ? ○ A gérer/réglementer/contrôler l'exposition des populations au trafic aérien ? ○ A communiquer ? <ul style="list-style-type: none"> ▪ Après des riverains ? Des autorités locales ? Des autorités de gestion des aéroports ? Des autorités de contrôle ?
3. Sélectionnés de manière participative	
<p>Les indicateurs devraient ainsi pouvoir refléter une diversité de points d'intérêt et non pas uniquement celui des concepteurs du Système de Suivi et Evaluation (SSE). Ou plus précisément la conception d'un SSE intègre la participation des usagers et parties prenantes dans la sélection</p>	<p>Cette caractéristique explique/nécessite la mise en place d'instance de consultation (GT, test grandeur nature auprès de riverains d'aéroports...). Un indicateur est rarement utilisé par un seul utilisateur : il sert à un premier utilisateur pour caractériser une situation et faire des choix, qui sont ensuite présentés et justifiés par l'indicateur auprès d'un deuxième utilisateur. A minima, ces deux utilisateurs doivent s'accorder sur ce que décrit cet indicateur et comment il est utilisé pour faire des choix.</p> <p>La sélection participative implique également que le(s) indicateur(s)</p>

des indicateurs.	soi(en)t également testé(s) par les différents types d'usagers/bénéficiaires identifiés plus haut (cf. ci-dessous 7. <i>Un indicateur doit être testé</i>).
4. Un indicateur ne peut être utilisé et interprété seul	
Une batterie d'indicateurs est nécessaire afin de pouvoir se compléter et se nuancer.	<p>C'est de cet aspect que découle tout le présent travail : actuellement, en France, seuls les indicateurs énergétiques sont réglementaires pour le bruit aérien. Et les différentes parties prenantes de la gestion du bruit à proximité des aéroports s'entendent sur le fait qu'un indicateur énergétique seul ne permet pas de dépeindre correctement une situation d'exposition.</p> <p>C'est pourquoi le Cerema a étudié les indicateurs qui permettent d'objectiver d'autres caractéristiques du bruit événementiel aérien.</p> <p>Augmenter le nombre d'indicateurs disponibles pour caractériser le bruit aérien permettrait également de mener des études sanitaires homogènes sur plusieurs aéroports français et ainsi étudier les relations entre ces indicateurs et les effets sanitaires du bruit. Cette démarche s'inscrit alors forcément dans le temps long.</p>
5. Trop d'information tue l'information	
<p>Il est courant (...) de trouver une bonne centaine d'indicateurs. Même si la complexité d'un programme pourrait justifier ce nombre élevé, il reste qu'il semble difficile, d'un simple point de vue cognitif, de garder présent à l'esprit un tel nombre de constantes et de pouvoir les apprécier.</p> <p>C'est pourquoi nous préconisons la sélection et extraction d'indicateurs essentiels, afin de conserver une vision certes partielle mais stratégique. (...) chaque indicateur s'accompagne d'un travail de collecte et d'analyse de données souvent insuffisamment pris en compte en amont et les porteurs de projet se trouvent noyés dans une abondance de données d'intérêt second.</p> <p>Mieux vaut bien sûr un nombre réduit d'indicateurs dont les données sont fiables qu'une multitude d'indicateurs incertains.</p>	<p>Il s'agit ici de trouver le juste équilibre entre trop et pas assez. La présente étude a permis de montrer que plusieurs caractéristiques acoustiques sont décorréélées entre elles et il semble donc nécessaire de les caractériser pour pouvoir dans un deuxième temps, étudier leur influence sur les effets sanitaires du bruit aérien. Un certain nombre d'indicateurs ont déjà été étudiés et se sont avérés plus ou moins pertinents.</p> <p>Cependant, il convient de noter que quand on s'intéresse à des indicateurs agrégés sur des périodes (comme l'a fait BruitParif), il est possible de calculer de nombreux indicateurs acoustiques. En effet, agréger sur une période nécessite en préalable la définition de la période d'intérêt (cf. ci-dessous DEFINI DANS LE TEMPS). De plus, certains indicateurs agrégés comme le NA (Number Above) ou le TA (Time Above) nécessitent le choix d'un seuil, ce qui démultiplie encore le nombre d'indicateurs qui peuvent être calculés.</p> <p>Par conséquent, pour restreindre les indicateurs pertinents, il faut bien s'interroger sur les besoins de l'étude et les objectifs.</p> <p>La question de la donnée nécessaire (cf. ci-dessous ACCESSIBLE) pour le calcul de l'indicateur permettra également d'affiner le choix des indicateurs. En effet, aujourd'hui, tous les aéroports français ne sont pas équipés de stations de mesure enregistrant l'information spectrale. Par conséquent, il faudra faire un choix entre calculer des indicateurs à partir du spectre mais sur un nombre limité d'aéroports ou ne calculer que des indicateurs à partir du LAeq mais sur tous les aéroports.</p> <p>La " quantité " d'information interroge également sur la représentation des indicateurs (cf. §5.4.2).</p>
6. Un indicateur doit être sensible	
Il doit pouvoir refléter les variations. Tel un radar sur le bord de la route, celui-ci doit pouvoir se déclencher en deçà et au-delà d'un certain seuil	<p>La question de la sensibilité questionne l'utilisation de l'indicateur. On attend de l'indicateur qu'il puisse discriminer des situations différentes ?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dans le temps au cours ?

afin d'engendrer une action, une ré-orientation, une prise de décision...	<ul style="list-style-type: none"> ○ Des années ○ Des scénarii d'évolution de la flotte ○ Et des scénarii d'évolution du trafic • Dans l'espace ? <ul style="list-style-type: none"> ○ Entre scénarii de modification de couloir aérien ○ Entre procédures d'approche • Entre aéroport ? Il existe une grande disparité dans l'exposition des riverains d'aéroports français compte tenu des différences entre aéroports : <ul style="list-style-type: none"> ○ En termes de nombres d'avion par an ; ○ En termes de répartition du nombre d'avion par jour/par semaine/par mois ; ○ En termes de types d'avion opérant sur l'aéroport ; ○ En termes de répartition géographique des riverains autour des couloirs de vol.
---	---

7. Un indicateur doit être testé

<p>Il est très difficile de débiter un programme avec immédiatement avec le bon set d'indicateurs. Une période test devra ainsi être envisagée. Les données sont-elles accessibles comme nous l'avions envisagé ? Les données sont-elles utilisées ?</p>	<p>Cet aspect des indicateurs est un indispensable. Un indicateur doit être testé de plusieurs façons :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technique : il faut que la sensibilité souhaitée de l'indicateur soit vérifiée et mise à l'épreuve de l'objectif de l'indicateur. • Métrologique : il faut que l'indicateur soit répétable et reproductible • Par les utilisateurs/bénéficiaires auxquels il s'adresse : il faut que toutes les personnes concernées par l'utilisation de cet indicateur se saisissent de l'indicateur, soit en le calculant, soit en l'utilisant pour prendre des décisions, soit en le communiquant aux riverains pour vérifier que : <ul style="list-style-type: none"> ○ L'indicateur soit compréhensible ○ L'indicateur soit sensible ○ L'indicateur soit mis en parallèle de données sanitaires
--	--

I. Sélection des indicateurs en phase de conception	Sélection d'indicateur sur la base de la bibliographie
SPECIFIQUE	
Préciser ce qui devra être mesuré de manière aussi spécifique que possible.	
MESURABLE	
Des données qualitatives viendront parallèlement nous informer sur le caractère subjectif de toute chose.	Cet aspect vient en parallèle de la perception du son. En effet, pour pouvoir communiquer auprès des riverains notamment, il faut pouvoir facilement expliquer ce que l'indicateur mesure, le mettre en parallèle de la sensation éprouvée par les riverains et expliquer ce que représente une différence de valeur de l'indicateur.

ACCESSIBLE	
<p>Anticiper l'effort requis ou le degré de difficulté pour obtenir les données souhaitées. Ceci en terme :</p> <ul style="list-style-type: none"> • de coût (le budget nécessaire à la collecte de la donnée est-elle compatible avec le budget disponible ?) • de disponibilité des données (s'agit-il de données sensibles ou confidentielles ?) 	<p>Cette question vient en parallèle du parc de station de mesure existant en France. Souhaite-t-on pouvoir calculer le(s) indicateur(s) choisi(s) sur tous les aéroports avec ou sans changement de matériel ? Ce choix conditionnera forcément le choix des indicateurs retenus.</p> <p>La question se pose également du côté de la modélisation : est-il possible sans développement numérique/ avec peu de développement numérique/avec une refonte complète des logiciels de calcul de calculer les indicateurs retenus ?</p>
PERTINENT	
<p>En quoi les données souhaitées présentent-elles un intérêt ? Quelle plus-value par rapport aux autres indicateurs déjà présélectionnés ?</p>	
DEFINI DANS LE TEMPS	
<p>Dans sa définition, un indicateur doit systématiquement être relié à une période temporelle.</p> <p>C'est néanmoins également un enjeu stratégique. A quel moment aura-t-on besoin de l'information ? A quel moment est attendue une prise de décision appuyée sur cette donnée précise ?</p>	<p>La question de la période temporelle d'intérêt est conditionnée par l'utilisation que l'on souhaite faire de l'indicateur et conditionne notamment le matériel de mesure.</p> <p>En effet, si l'on souhaite s'intéresser à l'événement particulier du bruit d'avion, alors il faut que la sensibilité temporelle de l'appareil de mesure soit suffisante pour mesurer sur la durée de l'événement. Par contre, si l'on souhaite avoir une mesure de période plus longue, cela posera moins de contrainte sur le choix du matériel de mesure.</p> <p>La question de la période temporelle est également à mettre en regard de ce que l'on souhaite caractériser. Si l'on souhaite caractériser le résultat du stress chronique ou le réveil nocturne à cause d'un événement, l'indicateur ne pourra pas être le même (cf. Tableau 21).</p>
SELECTIONNÉ DE FAÇON PARTICIPATIVE	
<p>L'exercice participatif de sélection des indicateurs permet à chaque partie-prenante d'exprimer ce qui fait sens de son point de vue et d'anticiper ou mettre à jour d'éventuels désaccords sur le sens même de l'action.</p>	<p>Les différents utilisateurs de l'indicateur doivent être consultés et doivent évaluer l'indicateur en fonction de leur utilisation afin de vérifier que l'indicateur soit compréhensible et réponde à leur besoin.</p>
COMPARABLE et AGREGEABLE	
<p>Quelles sont dans les actions déjà portées par notre structure les indicateurs qui pourraient être exploités ? En quoi avons-nous besoin de comparer des données et quels indicateurs communs pourraient être envisagés ?</p> <p>Quelles données sont agrégeables ?</p> <p>“ Des données agrégeables sont celles qui peuvent s'additionner, se</p>	<p>La question de la données agrégeable est au cœur du problème. Si l'on souhaite pouvoir étudier les relations entre le bruit et les effets sanitaires, comment peut-on agréger des données de bruit aérien, mesurés sur une période allant de la seconde à la journée, à des effets sanitaires de long terme ?</p>

compiler, se réunir.”

II. Suivi de la sélection des indicateurs en phase opérationnelle	Suivi de la sélection des indicateurs sur la base de premiers calculs d'indicateur
<p>Après une première phase de collecte de données, une deuxième analyse ou phase de sélection pourra être effectuée au regard des critères préalablement exposés. L'intérêt ici est d'apporter des mesures correctrices dans la collecte d'information (outils de collecte, fréquence de collecte, formation des enquêteurs...) ou dans la définition ou mode de calcul de l'indicateur. voire à ce stade de remplacer ou éliminer certains indicateurs manifestement inappropriés.</p>	
SIMPLICITÉ	
<p>Est-ce que les outils de collecte de données permettant l'exploitation des indicateurs sont suffisamment simples et explicites pour être interprétés sans biais par les enquêteurs comme par les répondants ?</p>	<p>La solution la plus simple doit toujours être privilégiée, que ce soit en termes de collecte de données, de modélisation ou de définition de l'indicateur. En effet, plus un indicateur est simple, plus il est facile d'appropriation par ses utilisateurs. Ainsi, quand deux indicateurs décrivent une dimension similaire, et sont fortement corrélés entre eux, le plus simple des deux doit être privilégié.</p> <p>Par ailleurs, il est plus simple d'expliquer deux indicateurs que d'expliquer une combinaison de ces deux indicateurs, car alors, il est difficile de distinguer deux situations qui entraînent la même variation de valeur de la combinaison.</p>
ACCESSIBILITÉ	
<p>La collecte de données se déroule-t-elle comme prévu ? Les données sont-elles aussi accessibles que prévu ? Le coût de collecte et la durée de collecte correspondent-ils à nos projections ?</p>	<p>La question de l'accessibilité ne se pose pas tellement dans le cadre des indicateurs acoustiques, puisque ceux-ci se calculent tous à partir de mesure sonométrique et il n'y a donc pas de différence entre les choix qui peuvent être faits. Par contre, on peut la mettre en parallèle de la question de la volumétrie des données. En effet, en fonction de la période élémentaire de mesure retenue (1s ou 100ms), de la précision fréquentielle (spectre agrégé, octave ou 1/3 d'octave), il peut y avoir de grand écart sur le volume de données à traiter et donc sur les besoins matériels de stockage de données et de traitement de la donnée.</p>
TEMPORALITÉ	
<p>Les données sont-elles disponibles au moment où nous l'avons envisagé ? Sinon comment réaménager le calendrier de collecte ?</p>	<p>La question de la temporalité est à mettre en parallèle du parc de station de mesure existant et des logiciels de calcul. Si le choix d'un nouvel indicateur nécessite une évolution du parc de station de mesure ou des logiciels de modélisation, quel temps sera nécessaire ?</p>

III. Suivi de la sélection des indicateurs après un premier cycle d'utilisation

Suivi de la sélection des indicateurs après une première utilisation en étude d'impact, par exemple

Le point de focus est ici l'**utilisation des données**. L'exploitation des données en vue de son utilisation mérite le suivi et l'adaptation d'un jeu d'indicateurs ad-hoc. Quel est le circuit de diffusion de l'information et qui utilise ces indicateurs ? A quelles fins ? Des seuils ont-ils été déclenchés et des mesures correctrices mises en place ? Quelles sont les données fondamentales qui pourraient toujours nous paraître absentes à ce stade ?

La fiabilité des données

En résumé, comme évoqué plus haut, le critère le plus important et à conserver en permanence en ligne de mire est celui de la **fiabilité des données**. Cette fiabilité repose notamment sur une combinaison d'autres critères abordés ci-dessus :

- **Accessibilité** : est-ce que le difficile accès à l'information risque de biaiser les données ou d'amoinrir la qualité des données recueillies ?
- **Simplicité** : est-ce que la complexité des données recueillies, du cheminement de l'information ou du mode de calcul risque d'interférer sur la qualité des données ?

Mais également des critères suivants :

- **Responsabilité/attribuabilité** : est-il possible, pour chaque indicateur formulé, d'identifier la personne en charge de la collecte de cette donnée ?
- **Traçabilité** : est-ce que la source de chaque donnée collectée peut être identifiée ?

Possibilités de recoupement : existe-t-il des moyens de vérification des données à travers des recoupement (cross-checking) et diversification des sources ?

Les critères liés à la gestion de la performance

Les critères listés ci-dessous appartiennent à un autre registre : la gestion de la performance. Ils sont ainsi utilisés pour établir des cibles ou grader des objectifs :

- *Atteignable*
- *Ambitieux*
- *Acceptable*
- *Réalisable*
- *Réaliste*
- *Récompensé*
- *Pragmatique, orienté vers l'action*
- *Habilitant*
- *Motivant*
- *Excitant*
- *Ethique*
- *Partagé*

Ces critères s'appliquent dans notre cas plus aux seuils qui pourraient être fixés pour les indicateurs retenus. **Cette partie de la démarche est exclue du présent travail**. Cependant, en cas de poursuite des présents travaux, il pourra être intéressant de se référer à cette liste de critères, afin de suivre la démarche en intégralité.

5.4.2 Recommandation n°2 : Présentation/représentation des indicateurs

Comme expliqué précédemment (cf. *Partie 402.5.1*), le Département de la Défense des États-Unis a conclu que de nombreuses représentations de l'exposition sonore peuvent s'avérer pertinentes pour étudier les différents effets sanitaires possibles sur un territoire donné en fonction de l'occupation des sols exposés. Les auteurs proposent de retenir les représentations proposées dans le Tableau 21.

Tableau 21 : Valeurs guides pour les études environnementales (niveaux extérieurs)
(Issu de (Department of Defense - Noise Working Group, 2009))

Domaine d'utilisation	Indicateur	Unité	Période de temps	Valeur extérieure Recommandée	Source
Mesure réglementaire	DNL	dB	24 h	60, 65, 70, 75, 80 dB	
Gêne	DNL	dB	24 h	60, 65, 70, 75 dB	(Schultz, 1978), (Miedema & Vos, 1998), (WHO, 2000)
Comparaison d'avions	L_{max}	dB	/	75, 80, 85 dB	
	SEL	dB	Événement	85, 90, 95 dB	
Comparaison ou Variation de niveaux moyens	L_{eq}	dB	1h, 15h le jour, 9h la nuit	65 dB	
Interférence avec la parole	NA (L_{Amax})	Nombre d'évènements	15h le jour	15, 30, 45, 60 évènements (> à 75 dB)	(EPA, 1974)
Perturbation du sommeil	NA (SEL)	Nombre d'évènements	9h la nuit	1, 3, 5, 9, 18, 27 évènements (> à 90 dB)	(FICAN, 1997), (ANSI & ASA, 2008)
Interférence avec le langage en classe	L_{eq}	dB	Heures scolaires (8h)	60 dB	(WHO, 2000), (ANSI, 2002), (American Speech-Language-Hearing Association, 1995), (FAA, 1985), (Bradley, 1985)
	NA (L_{Amax})	Nombre d'évènements	Heures scolaires (8h)	8, 16, 24, 32 évènements (> à 75 dB)	
	TA	Minutes	Heures scolaires (8h)	2, 4, 6, 8 minutes (> à 75 dB)	

En ce qui concerne les travaux menés par le Cerema, ceux-ci conduisent à sélectionner 3 indicateurs pour caractériser le bruit événementiel aérien :

- Un indicateur pour caractériser le niveau sonore ;
- Un indicateur pour caractériser la durée de l'événement ;
- Et un indicateur pour caractériser le contenu basses fréquences.

En fonction de l'utilisation qui aura été définie pour ces indicateurs, il conviendra de s'interroger sur la façon de présenter et de représenter ces indicateurs. En effet, ces indicateurs donnent des informations sur un événement aérien précis. Si l'objectif est de caractériser une situation d'exposition, il faut s'interroger sur la représentation qui permettra de représenter ces indicateurs, qui peuvent prendre de multiples valeurs à chaque passage d'avion.

S'il s'agit de comparer des situations d'exposition entre aéroports, alors une représentation unique doit être choisie. Il conviendra alors de s'interroger si une représentation en valeur absolue ou en relatif est la plus appropriée. Par contre, s'il s'agit de communiquer sur l'exposition d'un aéroport, alors la représentation doit être adaptée à la situation à caractériser.

Pour illustrer ce propos, le jeu de données n°3 a été utilisé pour proposer des exemples de représentations. Les représentations proposées pourraient en fonction de la situation locale être déclinées par allure (décollage, atterrissage, survol), par sens du vent, par couloir de vol... Ainsi, le jeu de données n°3 a permis de réaliser :

- Des représentations de la durée des passages d'avion

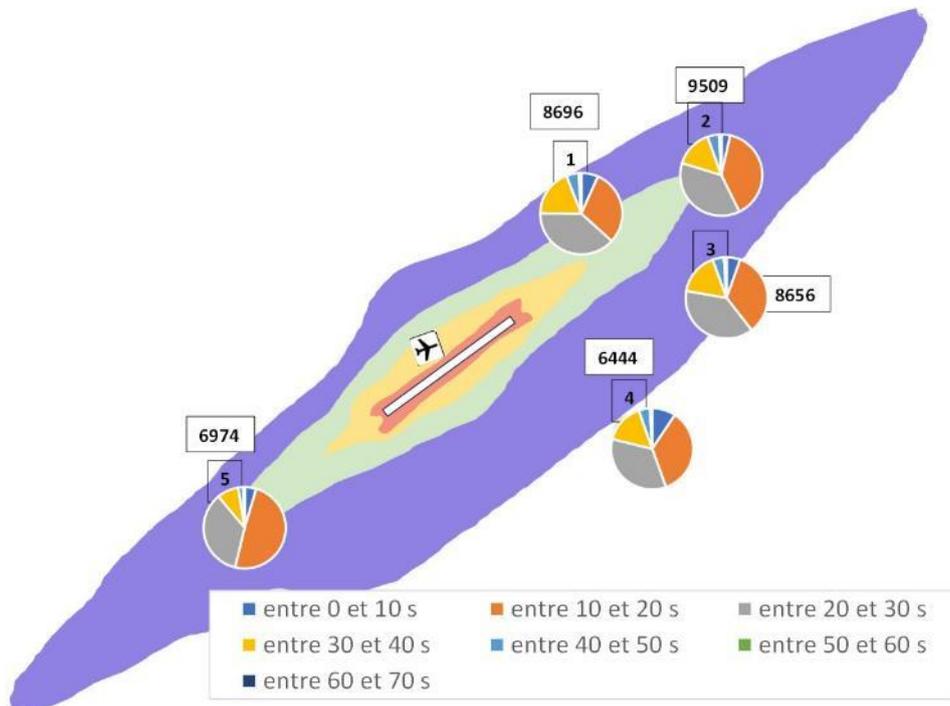


Figure 64 : Proportion annuelle du nombre d'événements en fonction de la durée et de l'allure de l'avion autour de l'aéroport du jeu de données n°3 sur l'année 2024.

Cette représentation permet de constater que la station n°5 est exposé à des événements de bruit aérien de durée inférieure aux autres stations.

- des représentations de la durée de répit (temps sans passage d'avion)

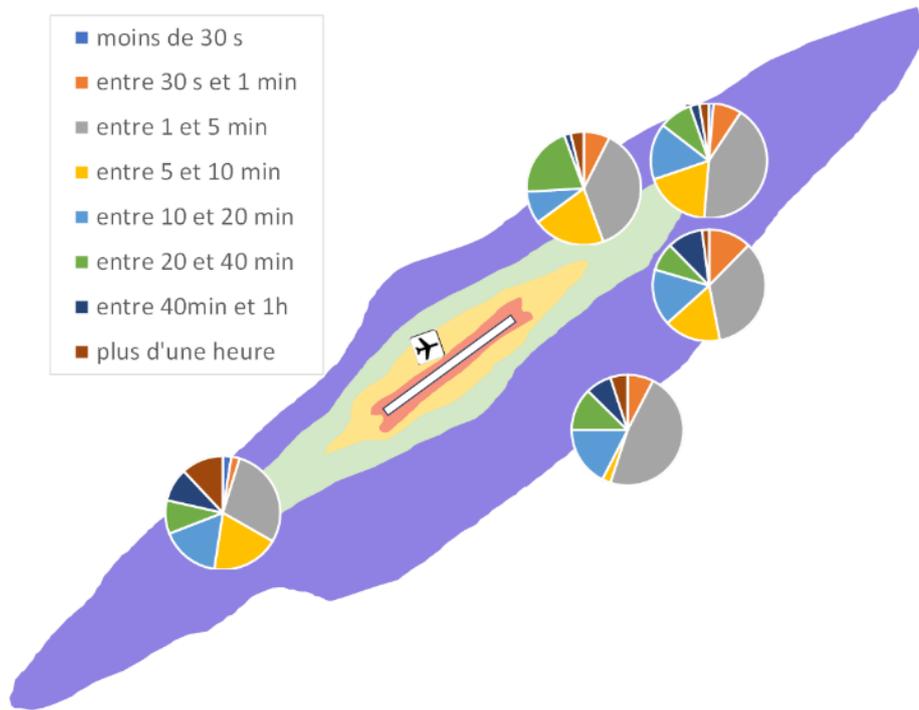


Figure 65 : Répartition des durées des moments de répit le 22/03/2024, jour où le plus d'avions ont été enregistrés sur la station n°2

- des distributions de niveau sonore et de niveau basses fréquences :

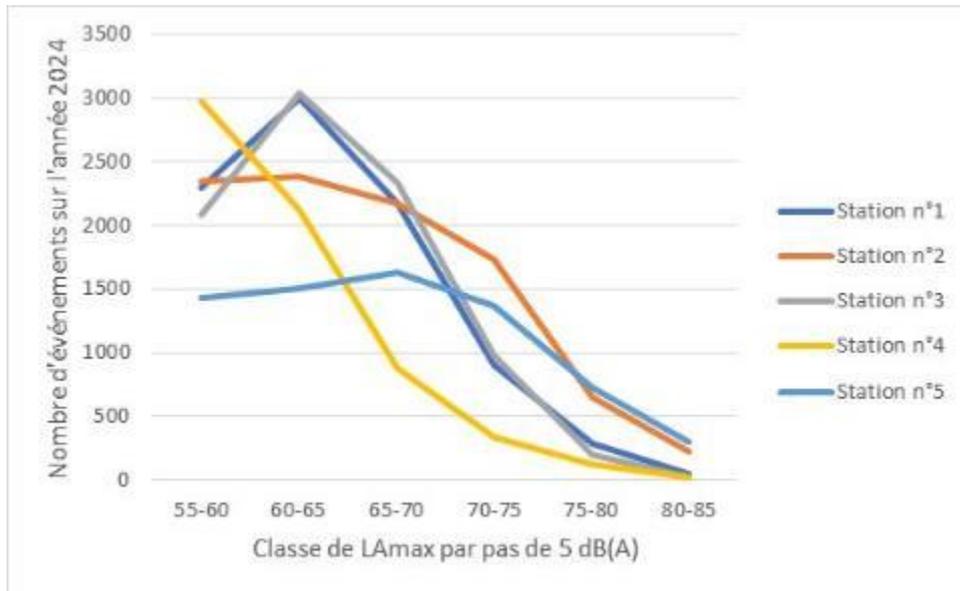


Figure 66 : Distribution annuelle des LMax mesurés pour les événements enregistrés sur chaque station de mesure. Cette représentation permet de constater que sur la station n°5, il y a moins d'événements de niveau sonore peu élevé que sur les autres stations. Quant à la station n°4, le nombre d'événements décroît rapidement avec le LMax.

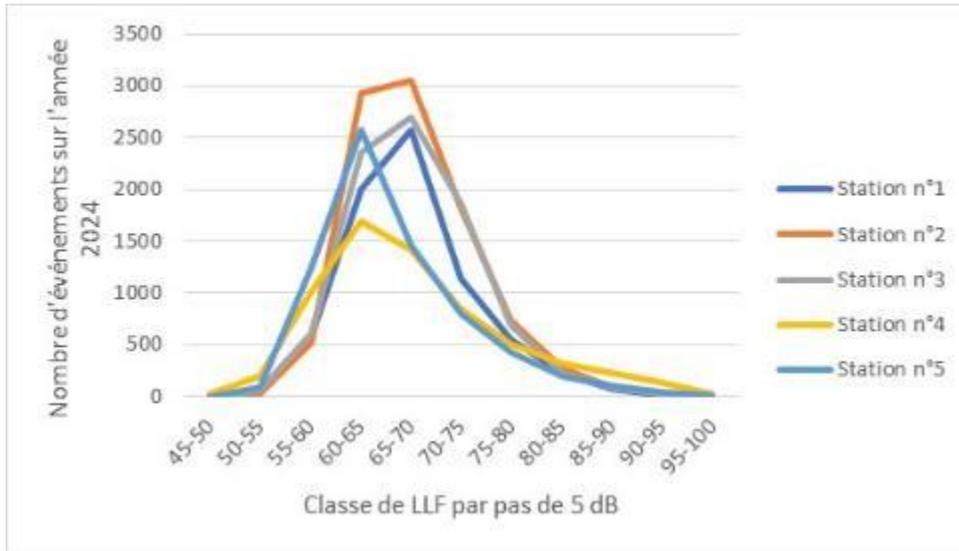


Figure 67 : Distribution annuelle des LLF mesurés pour les événements enregistrés sur chaque station de mesure

- des représentations des NAX, nombre d'événement dont le niveau moyen ou max dépasse X dB(A) ;

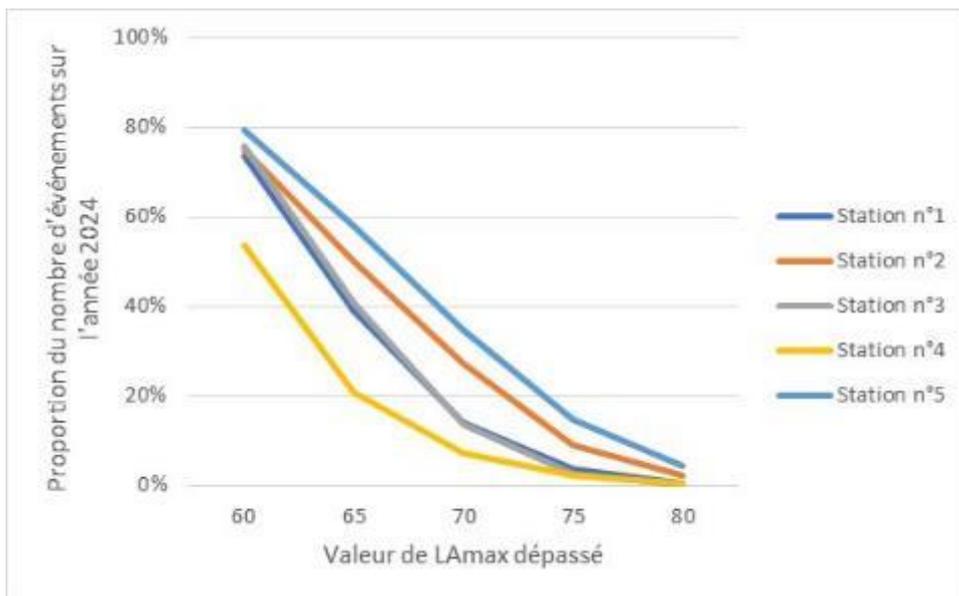


Figure 68 : Proportion sur l'année 2024 du nombre d'événements dont le L_{Amax} est supérieur au niveau donné en abscisse. Les résultats sont cohérents avec la carte de bruit : la station n°4 qui est en dehors de la zone D du PEB est celle dont les niveaux sont les plus faibles. On constate également une baisse du niveau sonore plus marquée sur les stations n°1 & 3 (sur les côtés des pistes) que sur les stations n°2 & 5 (dans l'axe des pistes).

- des représentations du nombre d'événements par jour ;

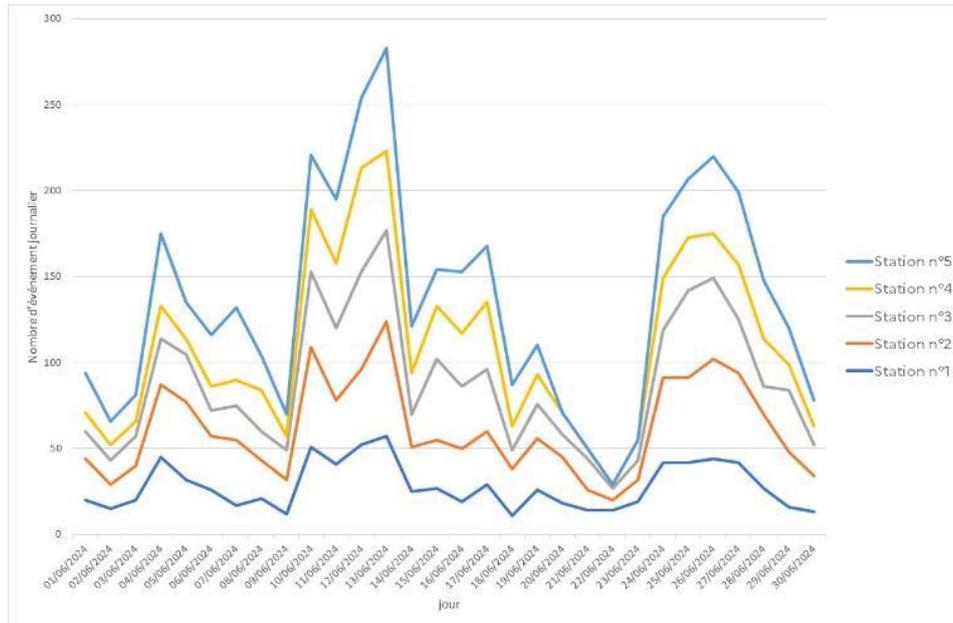


Figure 69 : Nombre d'événements par station pour chaque jour de juin 2024

Ces représentations ont été réalisées sur des nombres d'événements ou sur des proportions de nombre d'événements. Il conviendra donc de s'interroger en fonction de l'utilisation de ces représentations sur la pertinence de l'un ou l'autre. En effet, en fonction de ce que l'on souhaite observer, l'une des représentations peut s'avérer plus pertinente que l'autre. En Annexe 8, différentes représentations établies sur le jeu de données n°3 afin de pouvoir explorer la pertinence de ces différentes représentations (nombre d'événement ou proportion, taille des classes de niveaux, différentes allures de vol).

Parmi les représentations à explorer, des représentations horaires de caractéristiques peuvent également s'avérer pertinentes :

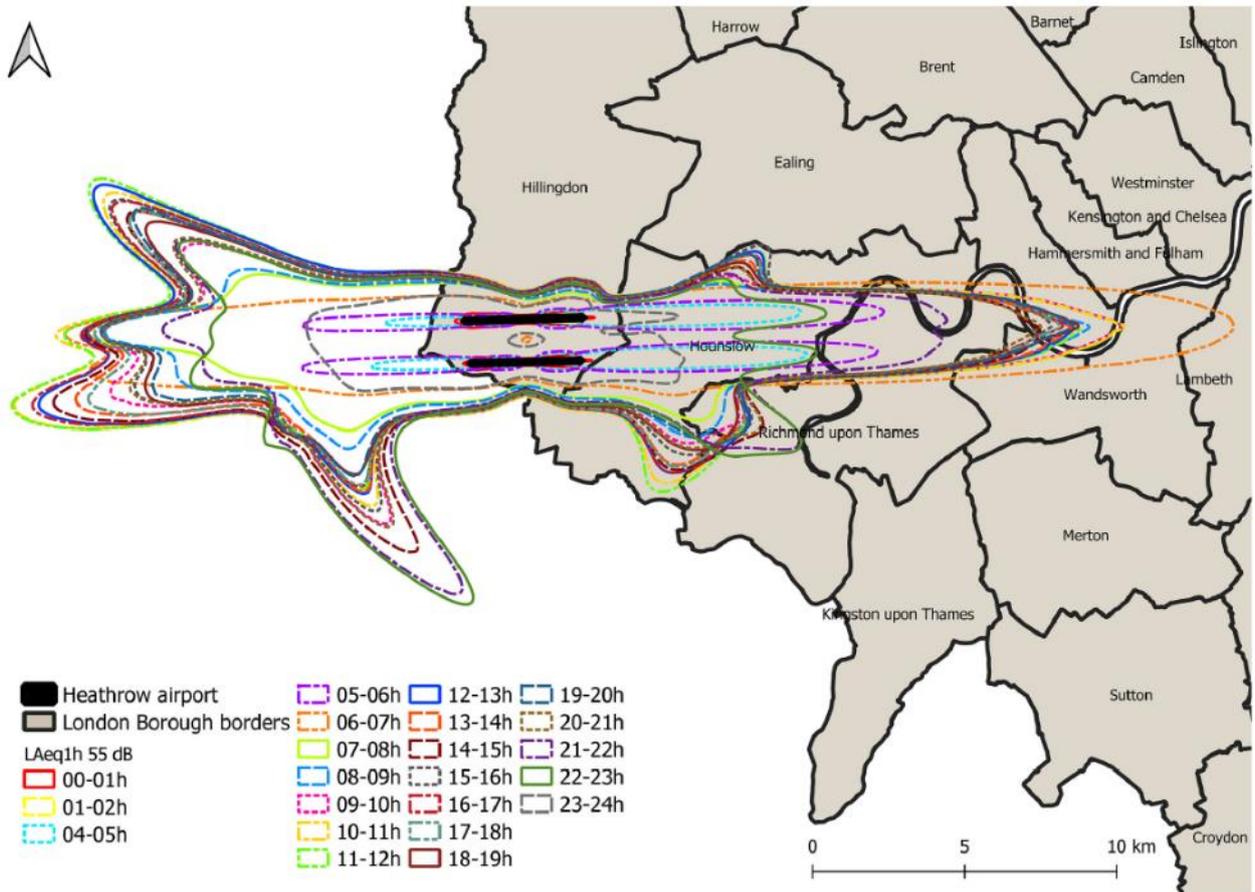


Figure 70 : Contour du LAeq,1h,55dB autour de l'aéroport d'Heathrow (UK)

Source : Figure 5 de (Ganić et al., 2023)

5.4.3 Recommandation n°3 : Indicateurs exclus des discussions du GT : à explorer avec des mesures *ad hoc*

Lors des discussions du groupe de travail, il a été convenu d'exclure des calculs d'indicateurs tous ceux nécessitant de disposer du spectre en bandes fines ou de l'audio. En effet, actuellement, les aéroports sont équipés de stations de mesure, qui dans le meilleur des cas enregistrent le tiers d'octave. Ainsi, il n'a pas été possible de calculer les indicateurs de tonalité ou les indicateurs psycho-acoustiques.

Or, les indicateurs de tonalité pourraient s'avérer pertinents dans le cadre de la caractérisation du bruit aérien, compte tenu de la présence d'harmoniques en deçà de 1000 Hz et de tonalités marquées dont la fréquence évolue en fonction du temps. De plus, le caractère tonal du bruit d'avion ressort des verbalisations recueillies par (Barbot, 2008) ou (Gille et al., 2017) ("strident", "sifflant/sifflement", "perçant").

En ce qui concerne les indicateurs psycho-acoustiques, ces indicateurs permettent de rendre compte de sensations acoustiques. Ces indicateurs peuvent donc s'avérer pertinents si on cherche à améliorer la caractérisation du ressenti des riverains.

Cependant, pour pouvoir mesurer ces indicateurs, il est nécessaire de disposer de mesures plus fines que celles actuellement disponibles. Une campagne de mesure de bruit événementiel est donc nécessaire afin de pouvoir étudier la pertinence d'utiliser ces indicateurs pour une meilleure caractérisation du bruit événementiel.

5.4.4 Recommandation n°4 : Mieux prendre en compte les facteurs non-acoustiques dans l'exposition au bruit

L'importance des facteurs non-acoustiques a été rappelée en Partie 2.6.

Les facteurs non acoustiques pouvant avoir un effet sur les effets sanitaires sont donc nombreux et afin de pouvoir réaliser des analyses croisées d'enquête, et ainsi obtenir des résultats consolidés, il est souhaitable de disposer d'une méthodologie pour les mesurer. Ainsi, (Anses, 2013) proposent un canevas de la méthode d'évaluation des impacts sanitaires (cf. Annexe 7 pour le canevas de la méthode). Cette méthode recommande ainsi la réalisation d'une étude socio-économique de la zone étudiée afin d'évaluer la vulnérabilité de la population exposée.

Les approches systémiques en santé-environnement, consistant à considérer un ensemble de déterminants (environnementaux, socio-économiques, démographiques), se développent de plus en plus sur les territoires à l'instar de la mise en place d'observatoires. Une exploitation de ces données peut apporter des éléments d'analyse objectifs des dimensions explicatives de la perception du bruit ou de ses conséquences sanitaires.

5.4.5 Recommandation n°5 : Développement d'une application de recueil des plaintes

La difficulté de pouvoir disposer de données d'enquête statistiquement robustes et à jour a été identifiée comme un des verrous dans le processus de sélection d'indicateurs acoustiques pertinents.

L'ensemble des aéroports sous contrôle spécifique de l'ACNUSA disposent d'un registre de plaintes dont l'exploitation pourrait s'avérer riche en enseignement, dans la phase de test de nouveaux indicateurs. Cependant l'hétérogénéité des informations et le manque de cadrage méthodologique constitue aujourd'hui un frein à leur utilisation.

La construction d'un questionnaire sur un format "enquête", mis à disposition via une application (smartphone) dédiée, pourrait constituer un outil utile (Un exemple d'application de recueil des plaintes mise en place par des aéroports américain est donné à la Figure 71.). Sans se substituer à des enquêtes ou études sanitaires, mais longues et coûteuses, ce type d'outil constituerait un "thermomètre" en temps réel et permettrait de vérifier la pertinence des métriques utilisées. Les données collectées présenteraient l'avantage d'être représentatives au niveau national et ainsi de s'affranchir des biais liés aux spécificités et sensibilités variables d'autres pays.

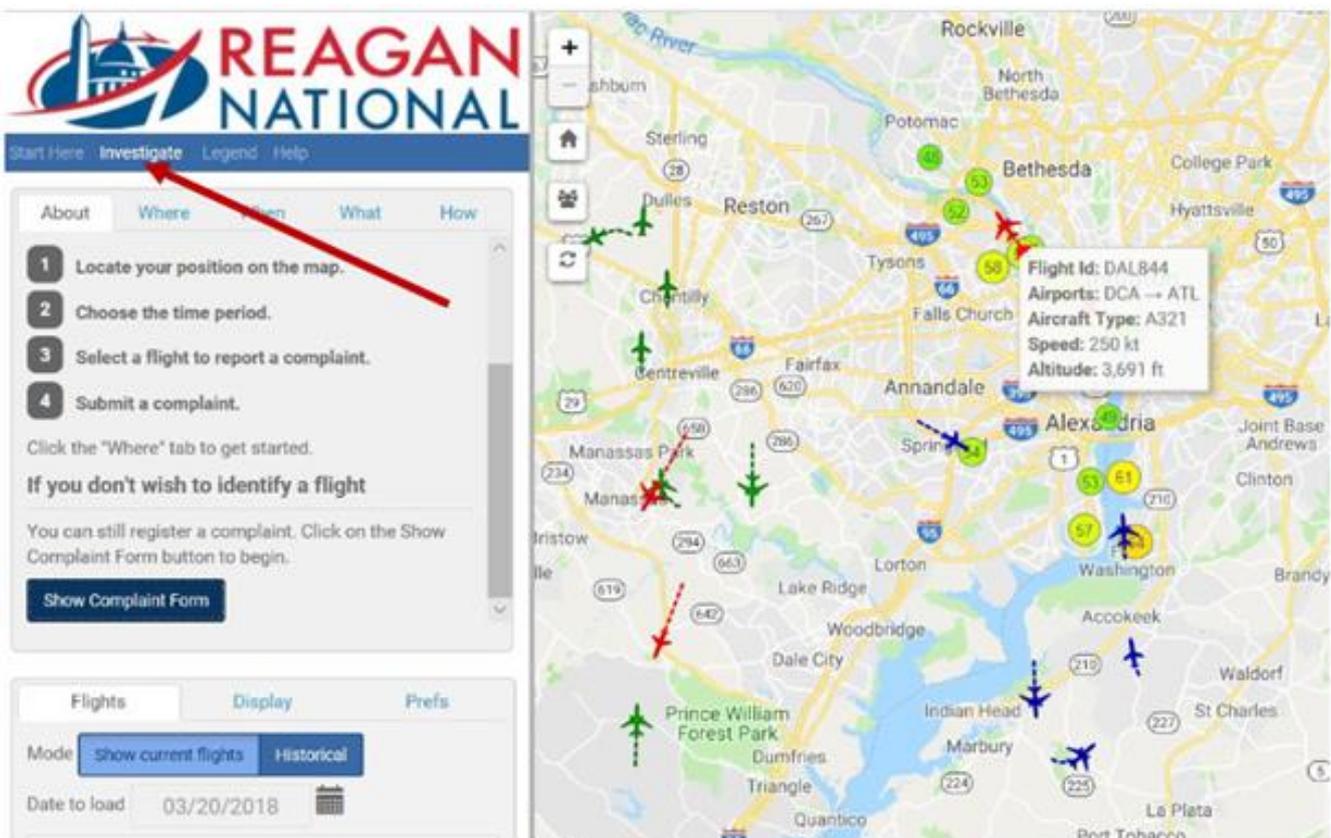


Figure 71 : Application de recueil des plaintes mise en place par les aéroports Reagan National (DCA) et Dulles International (IAD).

Si des solutions techniques relativement accessibles peuvent être trouvées pour créer ce type d'outil, reste à en définir la gouvernance. A ce stade toutes les pistes méritent d'être considérées : organisme international (ICAO), Europe, Etat français, autorité de contrôle, mutualisation des exploitants, centre(s) de recherche, organisme indépendant, ...) et les modalités de financement pour en assurer la pérennité. Ce dernier aspect nous apparaît comme essentiel pour à la fois disposer de données robustes statistiquement, représentatives des différentes situations d'exposition rencontrées, et permettre un suivi temporel de long terme.

ANNEXE 1. DECOUPAGE DU DOMAINE FREQUENTIEL

1 – Spectre physique

Rappel théorique : le domaine audible s'étend d'environ 20 Hertz (Hz) à 20 kHz. A nouveau, le domaine de variation des fréquences audibles est vaste. Par conséquent, il est possible d'exprimer le spectre d'un son en bandes fines ou en regroupant l'information par bandes de fréquence, couramment en bandes d'octave ou de tiers d'octave normalisées

Tableau 22 : Bandes d'octave et de tiers d'octave (en Hz)

Bandes d'octave		Bandes de tiers d'octave	
31,5	25	31,5	40
63	50	63	80
125	100	125	160
250	200	250	315
500	400	500	630
1000	800	1000	1250
2000	1600	2000	2500
4000	3150	4000	5000
8000	6300	8000	10000
16000	12500	16000	20000

2 – Spectre perceptif

Rappel théorique : Le découpage fréquentiel en bandes critiques permet, entre autres, de rendre compte des phénomènes de masquage qui se produisent dans l'audition humaine, en particulier, du fait du fonctionnement de la cochlée. Lorsqu'un son complexe est composé de deux sons purs de fréquences suffisamment proches, les cellules ciliées seront excitées pareillement par ce son complexe ou par un son pur. Par conséquent, bien que le son complexe soit physiquement d'un niveau sonore plus élevé, la sensation de niveau sonore (la sonie) demeurera inchangée.

La bande critique est alors définie comme l'écart nécessaire entre deux fréquences pour que l'oreille soit capable de distinguer deux sons purs. La largeur de la bande critique ERB (Equivalent Rectangular Bandwidth) dépend de la fréquence. Les bandes critiques ne sont donc pas figées, puisqu'elles dépendent des fréquences présentes dans le signal reçu par l'oreille. Dans un souci de simplification le spectre auditif est découpé en 24 bandes critiques et une échelle a été créée : l'échelle des Bark.

Tableau 23 : Bandes de Bark

Nombre		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fréquence centrale (Hz)		60	150	250	350	450	570	700	840	1000	1170	1370	1600
Fréquence de coupure (Hz)	20	100	200	300	400	510	630	770	920	1080	1270	1480	1720
Largeur de bande (Hz)		80	100	100	100	110	120	140	150	160	190	210	240
Nombre		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Fréquence centrale (Hz)		1850	2150	2500	2900	3400	4000	4800	5800	7000	8500	10500	13500
Fréquence de coupure (Hz)		2000	2320	2700	3150	3700	4400	5300	6400	7700	9500	12000	15500
Largeur de bande (Hz)		280	320	380	450	550	700	900	1100	1300	1800	2500	3500

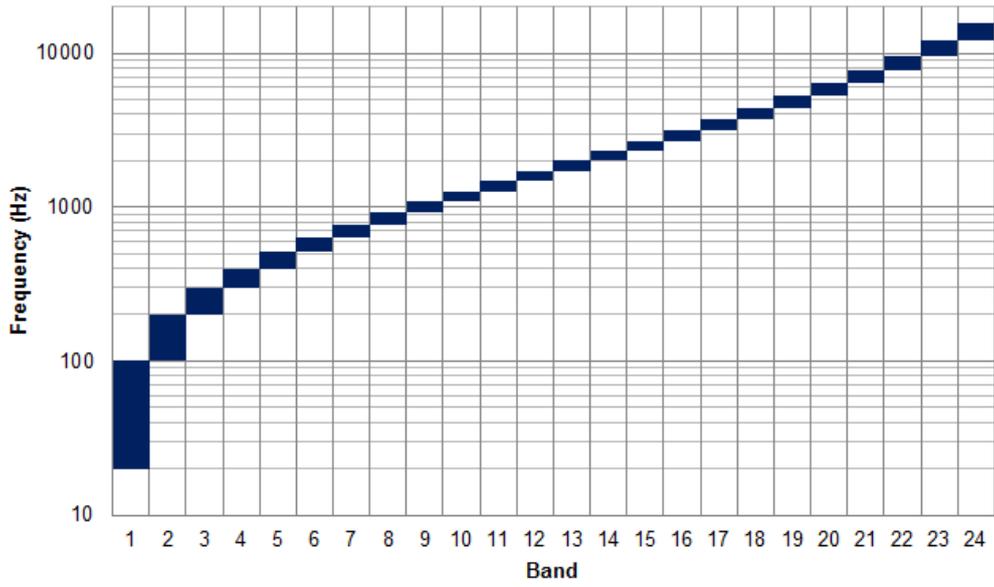
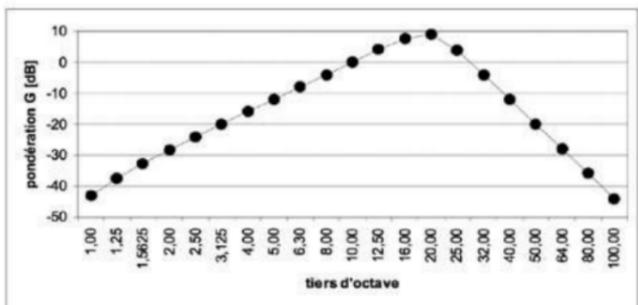


Figure 72: Représentation des bandes de Bark

ANNEXE 2. FORMULE ET DEFINITION DES INDICATEURS

Abréviation	Unité	Nom	Formule	Définition																											
Indicateur de niveau sonore																															
L _{Aeq}	dB(A)	A-weighted equivalent sound pressure level	$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L_A(t)}{10}} dt$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Octave band center frequency</th> <th>A-weighting Octave band Corrections (dB)</th> <th>C-weighting Octave band Corrections (dB)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>63</td><td>-26.2</td><td>-0.8</td></tr> <tr><td>125</td><td>-16.1</td><td>-0.2</td></tr> <tr><td>250</td><td>-8.6</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>500</td><td>-3.2</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>1000</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>2000</td><td>1.2</td><td>-0.2</td></tr> <tr><td>4000</td><td>1.0</td><td>-0.8</td></tr> <tr><td>8000</td><td>-1.1</td><td>-3.0</td></tr> </tbody> </table>	Octave band center frequency	A-weighting Octave band Corrections (dB)	C-weighting Octave band Corrections (dB)	63	-26.2	-0.8	125	-16.1	-0.2	250	-8.6	0.0	500	-3.2	0.0	1000	0.0	0.0	2000	1.2	-0.2	4000	1.0	-0.8	8000	-1.1	-3.0
Octave band center frequency	A-weighting Octave band Corrections (dB)	C-weighting Octave band Corrections (dB)																													
63	-26.2	-0.8																													
125	-16.1	-0.2																													
250	-8.6	0.0																													
500	-3.2	0.0																													
1000	0.0	0.0																													
2000	1.2	-0.2																													
4000	1.0	-0.8																													
8000	-1.1	-3.0																													
L _{Ceq}	dB(C)	C-weighted equivalent sound pressure level	$L_{Ceq} = 10 \log_{10} \frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L_C(t)}{10}} dt$																												
L _G	dB(G)	G-weighted sound pressure level	<p>Pour les infrasons (son dont la fréquence est inférieure à 20 Hz)</p> $L_{Geq} = 10 \log_{10} \frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L_G(t)}{10}} dt$	 <p>figure issue de " Perception des infrasons ", Jacques Chatillon, Acoustique & Techniques n°67</p>																											
L _{LF}	dB	Low Frequency Sound Pressure Level (16, 31.5, and 63-Hz)	$L_{LF} = 10 \log_{10} 10^{\frac{L_{16Hz} + L_{31.5Hz} + L_{63Hz}}{10}}$	L _{LF} est issu de la somme des niveaux sonores dans les bandes d'octave 16, 31.5 et 63 Hz.																											
L _{NE}	dB	Adjusted Sound Exposure Level	$L_{NE} = 2(L_{LF} - 65) + 55 + 10 \log_{10} \frac{T}{1}$ <p>Avec T la durée considérée</p>	L _{NE} est utilisé pour prédire la gêne occasionnée par le crépitement (rattle) de sons de niveau sonore supérieur à 75 dB.																											
L _{A,LF}	dB(A)	A-weighted equivalent low frequency level (10-160 Hz)	$L_{A,LF} = 10 \log_{10} 10^{\frac{L_{16Hz} + \dots + L_{160Hz}}{10}}$	L _{A,LF} correspond à la somme énergétique des niveaux sonores pondérés A des basses fréquences (en 1/3 d'octave entre 10 et 160 Hz). Des limites de L _{A,LF} ont été établies, par exemple la limite recommandée pour les logements durant la journée est de 25 dB L _{A,LF} , moyenné sur 10 minutes. (Source: Hodgdon, K. K., Atchley, A.A, Bernhard, R. J., Low frequency noise Study, April 2007)																											
Indicateur événementiel de niveau sonore																															
L _{Amax}	dB(A)	Maximum Noise Level	$L_{Amax} = \max(L_A)$	Valeur maximale du niveau sonore pondéré A																											
L _{Amin}	dB(A)	Minimum Noise Level	$L_{Amin} = \min(L_A)$	Valeur minimale du niveau sonore pondéré A																											
L _{FSL}	dB	Low Frequency Sound Level (25-80 Hz)	$L_{FSL} = 10 \log_{10} 10^{\frac{\max(L_{25Hz}(t)) + \dots + \max(L_{80Hz}(t))}{10}}$	L _{FSL} est la somme du niveau sonore maximal dans chaque bande de tiers d'octave entre 25 et 80 Hz. C'est un indicateur événementiel qui a été défini comme un descripteur du crépitement (rattle).																											
SEL	dB(A)	Single event noise Exposure Level	$SEL = 10 \log_{10} \frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_A(t)}{10}} dt$ <p>Avec t₀ = 1s et t₂ - t₁ la durée pendant laquelle le niveau sonore est compris entre [L_{Amax} - 10; L_{Amax}]</p>	SEL est défini comme le niveau sonore continu qui, maintenu constant pendant une seconde, contient la même énergie qu'un événement acoustique isolé pour lequel le niveau sonore varie au cours du temps.																											
E _{evt}	dB(A)	Émergence événementielle	$E_{evt} = L_{Aeq,1s,max} - L_{A50}$ <p>L_{Aeq,1s,max} est le LAeq élémentaire (1s) maximum de l'événement aéronautique ;</p>	Différence entre le niveau sonore maximal mesuré pendant un événement aéronautique, et le niveau acoustique fractile LA50 mesuré sur une fenêtre de 5 mn incluant l'instant du niveau maximal de cet événement aéronautique et si possible centrée sur celui-ci.																											

			L_{A50} est le niveau fractile d'indice 50, calculé en prenant en compte le bruit observé avant, pendant et après l'apparition du maximum de l'événement aéronautique concerné. La fenêtre temporelle prise en compte dans le calcul du niveau fractile est égale à 5 min.	(extrait de la norme NF S31-190 en cours de révision)												
Indicateur de niveau sonore moyenné																
DNL ou L_{dn}	dB(A)	Day-night noise level	$L_{dn} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{24} \left(15 \times \int_7^{22} 10^{\frac{L_A(t)}{10}} dt + 9 \times \int_{22}^7 10^{\frac{L_A(t)+10}{10}} dt \right) \right]$													
DENL ou L_{den}	dB(A)	Day-evening-night noise level	$L_{den} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{24} \left(12 \times 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_{night}+10}{10}} \right) \right]$	Les horaires jour/soir/nuit sont propres à chaque pays européen.												
Indicateur composite																
LNP	dB(A)	noise pollution level	$L_{NP} = L_{Aeq} + K\sigma$ Avec σ l'écart type du niveau sonore sur la même période d'intégration que le L_{Aeq} et K un coefficient valant environ 2.56													
TNI	dB(A)	Traffic noise index	$TNI = 4(L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30$													
Lxx		Indicateur fractile														
PEI		Person-Event Index	$PEI(x) = \sum P_N N$ Avec x le niveau sonore limite considéré, P_N le nombre de personnes exposés à N événements d'un niveau sonore supérieur à x dB(A)	L'indicateur Personne-Evénement (PEI) est la somme du nombre de personnes exposées à chaque événement de niveau sonore supérieur à 70 dB(A) multiplié par le nombre de ces événements.												
AIE		Average Individual Exposure	$AIE = \frac{PEI}{total\ exposed\ population}$													
NAT		Number of events above a certain threshold	Nombre d'événements au-dessus d'un niveau fixé													
IR	%	Intermittent Ratio	$IR = \frac{10^{0.1 \times L_{eq,T,Events}}}{10^{0.1 \times L_{eq,T,tot}}} \times 100$	IR est défini comme le ratio entre l'énergie sonore d'un événement et l'énergie sonore totale.												
TA	s	Time Above	TA mesure la durée durant laquelle un événement (par exemple, un bruit d'avion) dépasse un niveau sonore donné.													
Harmonica			Indice horaire harmonica = BGN (composante associée au bruit de fond) + EVT (composante événementielle) $BGN = 0.2 \times (L_{A95eq} - 30)$ $EVT = 0.25 \times (L_{Aeq} - L_{A95eq})$	 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Couleur</th> <th>Période diurne de 6 à 22h</th> <th>Période nocturne de 22 à 6h</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: red;">Dépassement des seuils reconnus comme critiques</td> <td>8 ≤ indice</td> <td>7 ≤ indice</td> </tr> <tr> <td style="background-color: orange;">Dépassement des objectifs de qualité mais respect des seuils reconnus comme critiques</td> <td>4 ≤ indice < 8</td> <td>3 ≤ indice < 7</td> </tr> <tr> <td style="background-color: green;">Respect des objectifs de qualité</td> <td>indice < 4</td> <td>indice < 3</td> </tr> </tbody> </table>	Couleur	Période diurne de 6 à 22h	Période nocturne de 22 à 6h	Dépassement des seuils reconnus comme critiques	8 ≤ indice	7 ≤ indice	Dépassement des objectifs de qualité mais respect des seuils reconnus comme critiques	4 ≤ indice < 8	3 ≤ indice < 7	Respect des objectifs de qualité	indice < 4	indice < 3
Couleur	Période diurne de 6 à 22h	Période nocturne de 22 à 6h														
Dépassement des seuils reconnus comme critiques	8 ≤ indice	7 ≤ indice														
Dépassement des objectifs de qualité mais respect des seuils reconnus comme critiques	4 ≤ indice < 8	3 ≤ indice < 7														
Respect des objectifs de qualité	indice < 4	indice < 3														
Indicateurs spécifiques pour le bruit aérien																
PNL	PNdB	Perceived Noise Level (Niveau de bruyance globale)	Le niveau de bruyance globale (PNL) est calculé à partir des niveaux sonores en tiers d'octave (sound pressure levels). Les courbes d'iso-bruyance sont utilisées pour convertir le niveau de pression acoustique en niveau de bruit (FAA, 2002). A partir de ces courbes, le niveau de pression en tiers d'octave entre 50 Hz et 10 kHz sont converties en moy. $N_t = n_{max} + 0.15 \sum_{i=1}^k (n_i - n_{max}) (n_{oy})$ Avec n_i correspondant à la bruyance en moy dans chaque bande de tiers d'octave de 50 Hz à 10 kHz $PNL = 40 + \frac{10 \log_{10} N_t}{\log_{10} 2} (PNdB)$													

PNLT	TPndB	Tone-corrected Perceived Noise Level	Pour les sons avec des composantes spectrales isolées (ou tonalités), le niveau de bruyance globale PNL est corrigé en ajoutant un terme correctif C. Ce terme correctif dépend de la fréquence de la tonalité (comprise entre 80 Hz et 10 kHz) et de son émergence par rapport aux bandes d'octave adjacentes. PNL est obtenu en sommant le terme correctif C au niveau de bruyance globale PNL.				
EPNL	PNdB	Effective Perceived Noise Level	$EPNL = PNLTM + D$ $D = 10 \log_{10} \sum_{k=0}^{2d} 10^{\frac{PNLT(k)}{10}} - PNLTM - 13$ <p>Avec <i>PNLTM</i> Maximum Tone-corrected Perceived Noise Level is the maximum value of the PNL time history, <i>d</i> is the time interval during which the level is 10 TPndB down from PNLTM, and <i>k</i> is the index of the time step.</p>		Le niveau effectif de bruyance globale (EPNL) est une mesure du bruit d'un passage d'avion. Il est dérivé du PNL et comprend un facteur de correction pour la durée du passage d'avion.		
IGMP		indicateur global mesuré pondéré	$IGMP = \frac{1}{2} \times \left(\frac{W_{a,n}}{W_{a,0}} + \frac{W_{d,n}}{W_{d,0}} \right) \times 100$		<p>Avec $W_{d,n}$ le cumul des valeurs <i>W</i> des énergies sonores pondérées des décollages de l'année <i>n</i>, $W_{d,0}$ le tiers du cumul des valeurs <i>W</i> des énergies sonores pondérées des décollages des années 1999, 2000 et 2001,</p> <p>$W_{a,n}$ le cumul des valeurs <i>W</i> des énergies sonores pondérées des atterrissages de l'année <i>n</i>, $W_{a,0}$ le tiers du cumul des valeurs <i>W</i> des énergies sonores pondérées des atterrissages des années 1999, 2000 et 2001,</p> <p>Avec <i>W</i> énergie associée à un mouvement d'aéronef telle que $W=10^{L/10}$, <i>L</i> étant le niveau sonore associé à l'aéronef, établi à partir du niveau mesuré, ramené au niveau d'une mesure équivalente à la distance de référence de 5 000 m du toucher des roues pour les atterrissages et 9 200 m du lâcher des freins pour les décollages et pondéré en fonction de la période de la journée.</p>		
WECPNL	PNdB	weighted noise exposure forecast	WECPNL peut être considéré comme un indicateur hybride du EPNL (corrigé pour tenir compte de la présence de tonalité et de la durée) car il se calcule à partir du EPNL, mais comprend également une moyenne énergétique en fonction du moment de la journée et une correction saisonnière, basée sur la température.				
NNI	PNdB	noise number index	$NNI = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{PNmaxi}}{10}} \right] + 15 \log_{10} n - 80$				
CNR		Composite Noise Rating	Décollage et atterrissage	Survol	Zone	Description des réponses attendues	
			Moins de 100	Moins de 80	1	Aucune plainte attendue. Le bruit peut néanmoins interférer occasionnellement avec certaines activités des résidents	
			100 - 115	80 - 95	2	Les résidents peuvent se plaindre, parfois vigoureusement. Des groupes d'action concertée sont possibles.	
			Plus de 115	Plus de 95	3	Les réactions individuelles vont probablement inclure des plaintes rigoureuses répétées. Des groupes d'action concertée peuvent être attendus.	
Utilisé pour prédire le nombre de plaintes attendues compte tenu de l'exposition sonore							
NEF	PNdB	Noise Exposure Forecast	$NEF = \sum_i \sum_j NEF_{ij}$ $NEF_{ij} = EPNL_{ij} + 10 \log_{10} \left\{ \frac{n_{Dij}}{K_D} + \frac{n_{Nij}}{K_N} \right\} - C$ $EPNL_{ij} = PNL_{ij} + D + F$ <p>Avec $D = 10 \log_{10} \frac{t}{15}$ et <i>t</i> la durée pendant laquelle le niveau sonore est compris entre $[L_{Amax} - 10; L_{Amax}]$</p> <p><i>F</i> est un terme correctif pour la présence de composantes tonales</p> <p><i>i</i> et <i>j</i> correspondent respectivement à une classe d'avion et une trajectoire</p> <p>n_{Dij} Et n_{Nij} correspondent respectivement au nombre d'opérations pendant la journée et la nuit.</p> <p>$K_D = 20, K_N = 1.2 \text{ et } C = 75$</p>			<p>Les valeurs de NEF sont divisées en 3 catégories :</p> <ul style="list-style-type: none"> - NEF < 30 - 30 < NEF < 40 - 40 < NEF 	
ANEF	ANEF	Australian Noise Exposure Forecast	$ANEF = 10 \log_{10} \sum_i \sum_j 10^{\frac{ANEF_{ij}}{10}} \text{ où } ANEF_{ij} = EPNdB_{ij} + 10 \log_{10} (N_d + 4 N_n) - 88$ <p>Avec : $EPNdB_{ij}$: le niveau sonore de l'avion de type <i>i</i> sur la trajectoire <i>j</i></p> <p>N_d et N_n : le nombre de vol durant le jour (<i>d</i>) et la nuit (<i>n</i>), d'avions de type <i>i</i> et sur la trajectoire <i>j</i></p>			Il s'agit de l'indicateur réglementaire en Australie. Des cartes de contour à certaines valeurs d'ANEF sont produites par des logiciels de modélisation acoustique.	
N70 Contour			Les contours N70 sont développés en combinant l'information du nombre de mouvements d'avion et le niveau sonore de chaque événement (ERCD Newsletter Issue 4, 2003; ERCD Report 0205, 2003). A partir de ces informations, le nombre d'évènement de niveau supérieur à 70 dB(A) peut être déduit.				
Indicateur de tonalité							
Lta	dB	Tonal Audibility	Calculé à partir d'un spectre en bande fine, cet indicateur mesure l'émergence d'un ton dans un son.				
TdBA - JNM	dB	Joint Nordic Method based Tone-corrected Average A-weighted Sound Pressure Level	$\text{for } L_{ta} < 4 \text{ dB } \quad k = 0 \text{ dB}$ $\text{for } 4 < L_{ta} < 10 \text{ dB } \quad k = (L_{ta} - 4) \text{ dB}$ $\text{for } L_{ta} > 10 \text{ dB } \quad k = 6 \text{ dB}$ $TdBA - JNM = k + 10 \log_{10} \left(\sum_i \frac{p_{Ai}^2}{p_{ref}^2} \right)$			Le TdBA-JNM est calculé en ajoutant une pénalité <i>k</i> au niveau sonore équivalent <i>L_a</i> .	

ARI		Air-conditioning and Refrigeration Institute	Cet indicateur a été développé spécifiquement pour les systèmes d'air conditionné et de réfrigération. Le niveau sonore pondéré A corrigé pour la tonalité est obtenu en ajoutant une pénalité comprise entre -1 et 6 dB, en fonction de la force des composantes tonales gênantes, au niveau sonore pondéré A du bruit du système de réfrigération.
K		Aures Tonality	Cet indicateur dépend de 4 composantes : l'étendue spectrale de la tonalité, sa fréquence, l'émergence de la tonalité et le niveau du contenu spectral par rapport au niveau sonore global.
TNR	dB	Tone-to-Noise Ratio	Tone-to-Noise Ratio est le ratio de la puissance contenu dans la tonalité par rapport à la puissance contenue dans la bande critique centrée sur cette tonalité, en excluant la tonalité.
PR	dB	Prominence Ratio	$PR = 10 \log_{10} \left(\frac{W_M}{\frac{W_L + W_H}{2}} \right)$ <p>ratio de la puissance de la bande critique centrée autour de la tonalité par rapport à la puissance moyenne contenue dans les deux bandes adjacentes. Un son est considéré proéminent si $PR > 7$ dB. Si le son contient plusieurs tonalités, alors le PR de chaque tonalité doit être calculé.</p>
Indicateur psychoacoustique			
N	sonne	Loudness (Sonie)	$N = \int_0^{24 \text{Bark}} N'(z) dz$ <p>Avec z la bande de Bark</p> <p>La sonie est la perception subjective de l'amplitude d'un son, qui peut être ordonné sur une échelle sémantique allant de calme (quiet) à fort (lourd). La sonie est fonction de l'intensité, de la fréquence et de la durée.</p>
S	acum	Sharpness (Acuité)	$S = 0.11 \times \frac{\int_0^{24} N'(z) g(z) dz}{\int_0^{24} N'(z) dz}$ <p>Avec z la fréquence exprimée en bark et g(z) un facteur de pondération :</p> $g(z) = \begin{cases} 1 & \text{for } z \leq 16 \\ 0.066e^{0.171z} & \text{for } z > 16 \end{cases}$ <p>L'acuité S est une mesure de la densité spectrale d'un son. Elle représente l'équilibre entre les basses et les hautes fréquences. L'acuité de 1 acum correspond à l'acuité d'un bruit à bande étroite de 60 dB, de fréquence centrale 1 kHz et de largeur de bande inférieure à 150 Hz.</p>
R	asper	Roughness (Rugosité)	La rugosité R et la force de fluctuation F permettent de décrire la sensation engendrée par un bruit modulé en amplitude. Si la fréquence de modulation est inférieure à 20 Hz, la force de fluctuation est ressentie. Au-delà, la rugosité est ressentie. Le maximum de rugosité est ressentie pour une fréquence de modulation de 70 Hz.
F	vacil	Fluctuation Strength	
PA		Psychoacoustic Annoyance	$PA = N_5 (1 + \sqrt{w_s^2 + w_{FR}^2})$ $w_s = \begin{cases} 0.25(S - 1.75) \log_{10} N_5 + 10 & \text{for } S > 1.75 \\ 0 & \text{for } S < 1.75 \end{cases}$ $w_{FR} = \frac{2.18}{(N_5)^{0.4}} (0.4F + 0.6R)$ <p>Cet indicateur a été développé par Fastl et Zwicker pour rendre compte de la gêne sonore due à des bruits de véhicules routiers. Cet indicateur permet de tenir compte de l'intensité sonore perçue, du contenu spectral et des modulations d'amplitude.</p>
LLSEL	phon	Loudness Level Weighted Sound Exposure Level	$LLSEL = 10 \log_{10} \sum_j \sum_i 10^{\frac{L_{Lij}}{10}} (\text{phon})$ <p>Le niveau de sonie (LLSEL) est issu des contours d'iso-sonie définies dans la norme ISO 226 (1987). LLSEL prend en compte les caractéristiques du son comme l'impulsivité et le contenu basse fréquence.</p>

ANNEXE 3. SYNTHÈSE DES EFFETS SANITAIRES DUS AU BRUIT D'AVION

Effet sanitaire	Indicateur sanitaire	référence bibliographique	Indicateur acoustique	Résultats, statistique	Qualification du niveau de preuve de la relation statistique retenue par l'OMS
Maladies cardiovasculaires	Cardiopathie ischémique ²⁴	(OMS, 2018)	Lden	incidence RR = 1.09 [1.04; 1.15] pour une augmentation de 10 dB	très faible
		(Babisch et al. 2005) (Babisch et al. 2008) (Babisch et al. 2012) (Babisch et al. 2013) (Floud et al. 2013) (Floud et al. 2011) (Jarup et al. 2008) (Jarup et al. 2005) (Van Poll et al. 2014)	Lden	prévalence RR = 1.07 [0.94; 1.23] pour une augmentation de 10 dB	faible
		(Huss et al. 2010) (Hansell et al. 2013) (Van Poll et al. 2014)	Lden	mortalité RR : 1.04 [0.98; 1.11] mortalité RR : 1.04 [0.97; 1.12] pour une augmentation de 10 dB	très faible
		programme DEBATS	Lden	- mortalité par maladie cardiovasculaire : MRR = 1,18 [1,11;1,25] - mortalité par maladie cardiaque ischémique : MRR = 1,24 [1.12;1,36] - mortalité par infarctus du myocarde : MRR = 1.28 [1.11;1.46] pour une augmentation de 10 dB(A)	
		(Pyko et al. 2019)	Lden	pour les femmes, incidence HR = 1.25 [1.09;1.44] pour une augmentation de 10 dB(A) (Halonen 2019) rappelle qu'une étude suggérait auparavant que les réponses au stress induit par le bruit aérien seraient plus importantes chez les femmes plutôt que chez les hommes (mesures de cortisol) (Selander et al. 2009) tandis que le risque de maladie cardiovasculaire est généralement plus élevé chez les hommes (Deo et Albert 2012) (Mozaffarian 2016)	
		(Vienneau et al. 2015)	Lden	RR = 1.06 [1.03;1.09] pour 10 dB(A) supplémentaires (exposition bruit des transports (aérien et routier))	
	Hypertension artérielle	(OMS, 2018)	Lden	pas d'effet, RR=1.00 [0.77;1.30] pour une augmentation de 10 dB	faible
		(Ancona et al. 2010) (Babisch et al. 2005) (Babisch et al. 2008) (Babisch et al. 2012) (Breugelmans 2004) (Houthuijs et van Wiechen 2006) (Jarup et al. 2008) (Jarup et al. 2005) (Matsui 2013) (Matsui et al. 2004) (Matsui et al. 2001) (Rosenlund et al. 2001) (van Kamp et al. 2006) (Van Poll et al. 2014) (Evrard et al. 2013) : résultats contradictoires et non significatifs			faible
		programme DEBATS	Ln	prévalence : OR = 1.34 [1.00;1.97] chez les hommes pour une augmentation de 10 dB	
		(Pyko et al. 2018)	Lden	incidence HR = 1.16 [1.08;1.24] pour une augmentation de 10 dB en situation de multi-exposition bruit routier + bruit aérien : HR = 1.39 [1.14;1.70] pour des niveaux supérieurs à 45 dB(A)	
		(Huang et al. 2015)		prévalence : OR = 1.63 [1.14;2.33]	
		(Babisch et al. 2013) (Babisch et al. 2012)		association entre exposition au bruit aérien et hypertension plus forte chez les riverains gênés que chez ceux qui ne le sont pas : la gêne agit en tant que " modérateur " de la relation.	
		étude HYENA	Ln	incidence OR = 2.63 [1.21;5.71] pour une augmentation de 10 dB(A) la prévalence de l'hypertension est plus élevée chez les individus se déclarant gênés par le bruit aérien mais le niveau d'exposition constitue une meilleure prédiction de l'hypertension ==> la gêne agit en tant que modificateur de la relation entre niveau de bruit et hypertension	
		(Carugno et al. 2018) (Rocha et al. 2019)		pas d'association entre niveaux au domicile et prévalence d'hypertension	
(Rojek et al. 2019)		pas d'association entre exposition et prévalence d'hypertension MAIS l'exposition à long terme au bruit aérien est associée à une pression artérielle plus élevée, une rigidité artérielle plus avancée et des modifications délétères du fonctionnement du ventricule gauche			
(Seidler et al. 2017)		exposition au bruit et insuffisance cardiaque ou cardiopathie hypertensive, avec une augmentation linéaire du risque de 1,6 % [0.3 ;3.0] pour une augmentation de 10 dB(A) de l'exposition augmentation de risque particulièrement significative pour les riverains exposés à des niveaux moyens faibles (< 40 dB(A) mesuré pendant 24h en continu) et à plus de 5 pics de bruit (niveaux supérieurs à 50 dB(A)).			

²⁴ la cardiopathie ischémique résulte d'une insuffisance d'oxygénation du cœur (ischémie) due à un rétrécissement des artères coronaires. Elle se traduit par une angine de poitrine ou un infarctus du myocarde.

	(Zeeb et al. 2017)	Lden	augmentation particulièrement significative du risque d'hypertension pour le sous-groupe de riverains précédemment diagnostiqués pour cardiopathie hypertensive (13,9 % de risque pour une augmentation de 10 dB(A) Lden du bruit aérien) ==> aggravation d'un état de santé cardiovasculaire mais pas apparition d'hypertension		
Accident Vasculaire Cérébral	(Correia et al. 2013) (Hansell et al. 2013) (Babisch et al. 2005) (Babisch et al. 2008) (Babisch et al. 2013) (Babisch et al. 2012) (Floud, Blangiardo, Clark, de Hoog, et al. 2013) (Floud, Blangiardo, Clark, de Hoogh, et al. 2013) (Floud et al. 2011) (Jarup et al. 2008) (Jarup et al. 2005) (Van Poll et al. 2014) (Huss et al. 2010) (Hansell et al. 2013) (Van Poll et al. 2014) : RR non significatifs (incidence, prévalence, mortalité)			très faible	
	programme DEBATS	Lden	mortalité par AVC : MRR = 1.08 [0.97;1.21]		
	(Dzhambov et Dimitrova 2016)		RR = 1.05 [1.05; 1.10] pour le risque d'AVC associé à une exposition supérieure de 10 dB(A)		
	(Weihofen et al. 2019)	Lden	Malgré une association non significative (RR = 1.013 [0,998-1.028] pour une augmentation de 10 dB) et une qualité mauvaise à moyenne des études incluses, les auteurs considèrent qu'au regard des incertitudes conduisant à sous-estimer le risque, que l'exposition au bruit aérien augmente le risque de survenue d'AVC.		
	(Seidler et al. 2018)		augmentation du risque d'AVC de 7% [2;13] pour les riverains de plus de 40 ans exposés à du bruit aérien de faible intensité en moyenne journalière mais également à plus de 5 évènements de bruit aérien nocturnes		
infarctus du myocarde	(Héritier et al. 2019)	Lden	incidence de la mortalité : HR = 1.025 [1.006;1.045] pour une augmentation de 10 dB(A), relations inchangées après ajustement des facteurs de confusion pour la pollution atmosphériques : conséquences indépendantes du bruit et de la pollution de l'air pour les infarctus du myocarde (Sorensen 2017) regrettent l'absence de prise en compte de facteurs de confusion classiques		
hospitalisation pour maladie cardiovasculaire	(Correia et al. 2013)		taux d'hospitalisation augmenté de 3,5% [0.2;7.0] pour les personnes dont l'exposition est 10 dB(A) supérieure 2,3 % des hospitalisations de riverains d'aéroports de plus de 65 ans pour maladies cardiovasculaires serait attribuables aux expositions au bruit aérien.		
	(Hansell et al. 2013, 2014)	L _{Aeq} 16h	- pour AVC : RR = 1.24 [1.08;1.43] - pour maladies coronariennes : RR = 1.21 [1.12;1.31] - pour cardiopathies : RR = 1.14 [1.08;1.20] pour les zones géographiques les plus exposées au bruit aérien (L _{Aeq} 16h > 63 dB(A)) par rapport à celles moins exposées (L _{Aeq} 16h < 51 dB(A)) Les résultats pour les admissions pour les maladies coronariennes et pour les cardiopathies étaient particulièrement touchés par l'ajustement relatif à l'ethnie sud asiatique. (Moore 2013) critique les facteurs de confusion considérés		
arythmie cardiaque	(Hadad et al. 2018)	gêne	association entre gêne liée au bruit aérien et prévalence d'arythmie cardiaque : - OR = 1.09 [1.05;1.13] pour la gêne exprimée la nuit - OR = 1.04 [1.00;1.08] pour la gêne exprimée le jour		
Perturbation du sommeil	(OMS, 2018)	Ln	OR = 1.94[1.61;2.33] pour une augmentation de 10 dB	modéré	
	(Elmenhorst et al. 2014)		une perception négative du trafic aérien est significativement associée à des altérations de la qualité du sommeil (augmentation du temps d'endormissement, modification de l'architecture du sommeil)		
	(Van den Berg et al. 2014)		plus forte corrélation de la perturbation du sommeil avec la gêne liée au bruit qu'avec l'exposition sonore calculée au domicile		
	(Perron et al. 2016)		proportion de la population dont le sommeil aurait été affecté par le bruit aérien au cours des 4 semaines antérieures à l'entretien : 1.5%		
	(Kim et al. 2014)		prévalence significativement supérieure des perturbations du sommeil autodéclarées auprès des riverains les plus exposés d'un aéroport militaire en Corée du sud		
	(Kwak et al. 2016)		prévalence significativement supérieure d'insomnie et d'hypersomnie parmi ceux les plus exposés à leurs domiciles		
	(Rocha et al. 2019)	Ln	faible qualité de sommeil : OR = 1.04 difficulté à l'endormissement : OR = 1.06 perturbations liées à des réveils nocturnes : OR = 1.04 sommeil très perturbé par les aéronefs : OR = 1.15 gêne forte liée aux aéronefs : OR = 1.17 par dB supplémentaire pas d'association entre ces expositions et des déclarations d'états dégradés de santé générale autodéclarés (trouble du sommeil, cardiopathies, hypertension ou diabète)		
	polysomnographie	(Basner, Samel, et Isermann 2006)	L _{AS,max}	OR = 1.35 [1.22;1.50] pour une augmentation de 10 dB	modéré
		(Elmenhorst et al. 2014)		probabilité d'éveil plus importante pour le bruit ferroviaire par rapport au bruit aérien	
		(Elmenhorst et al. 2019)	SPL	à 70 dB SPL, un réveil serait 7% moins probable avec un bruit aérien par rapport à un bruit ferroviaire	
paramètres cardiaques ou de pression sanguine					
	(Passchier-Vermeer et al. 2002)			faible	

	Modification de la motilité chez l'adulte	(Janssen et al. 2014)		à partir d'un niveau de bruit moyen, la prise en compte du nombre d'évènements de bruit n'améliore pas la prédiction de la qualité de sommeil déclarée. Néanmoins, le nombre d'évènements de plus de 60 dB (LAmax) est associé à une augmentation de la motilité chez le dormeur.	
	Perturbation du sommeil chez l'enfant				
	Relations exposition-réponse	étude DEBATS	Ln	faible temps de sommeil total (moins de 6h) : OR = 1.63 [1.15;3.32] sentiment de fatigue au réveil : OR = 1.23 [1.00;1.54] pour un accroissement de 10 dB le niveau de pression maximale lié au passage d'aéronefs la nuit affecte le rythme cardiaque du dormeur durant son sommeil l'augmentation des expositions au bruit aérien augmente le temps d'endormissement, le temps total d'interruption de sommeil et réduit ainsi l'efficacité du sommeil	
Gêne	% de personnes fortement gênées	(Guski et al. 2018)	Lden	relation dose-réponse	modéré
		(OMS, 2018)	Lden	prévalence : risque absolu de 10% pour un niveau d'exposition de 45 dB OR = 4.78 [2.27;10.05] pour un accroissement de 10 dB	modéré
	gêne à court terme	(Bartels, Marki et Müller, 2015)		les facteurs acoustiques seuls n'expliquent qu'une faible proportion de la variance de la gêne exprimée (13.7%). Le nombre de survols a même constitué un indicateur plus prédictif que les niveaux de pression acoustique.	
		(Bartels, Rooney, et Müller 2018)	Ldn	Les niveaux sonores en Ldn n'expliquaient que 16,5 % de la variance des déclarations de gêne. Cette part de variance s'élevait par contre à 54,8 % lorsque les variables non acoustiques sont considérées dans le modèle.	
		(Brink et al. 2019)	Lden	les différences en matière de composition événementielle du signal sonore pourrait entraîner des écarts jusqu'à 6dB Lden sur les courbes de prédiction de la gêne.	
		(Elmenhorst et al. 2014)		le bruit ferroviaire entraîne plus d'effet de perturbation du sommeil, le bruit aérien génère malgré tout le plus de gêne déclarée au réveil. Les auteurs associent leurs observations au temps de montée et de descente du signal plus rapide pour le bruit ferroviaire et des évènements de bruit de durée plus longue pour le bruit aérien.	
(White, Bronkhorst et Meeter, 2017)		le bruit aérien serait le plus gênant en raison de l'association de la source et de la présence de composantes tonales.			
Effets sur la cognition	Compréhension écrite et orale	(Clark 2013) (Haines et al. 2001b) (Hygge et al. 2002) (Seabi et al. 2015) (Clark et al. 2012) (Clark et al. 2006) (Evans et Maxwell 1997) (Haines et al. 2001) (Haines et al. 2001a) (Klatte et al. 2014) (Matsui et al. 2004) (Seabi et al. 2012) (Stansfeld et al. 2010) (Stansfeld et al. 2005)		la majorité montre une association entre niveau d'exposition au bruit aérien et une plus faible compréhension écrite	modéré
		(OMS, 2018)	Lden	1 à 2 mois de retard pour un accroissement de 5 dB	modéré
		(Clark et al. 2013)		tendance significative d'augmentation de la gêne tendance non-significative de diminution de la compréhension écrite aucune association pour des effets de santé de nature psychologique dans le cadre du suivi à 6 ans d'enfants des établissements d'enseignement riverains de l'aéroport d'Heathrow	
		(Hollander et de Andrade 2014)		un effet délétère chez l'enfant des expositions au bruit aéroportuaire à l'école sur les capacités de traitement auditif du langage (comparaison entre une école exposée et une école non exposée)	
		(Klatte et al. 2017)		pour des expositions sonores inférieures à 60 dB, une association linéaire des niveaux d'exposition au bruit aérien avec de plus faibles scores de l'évaluation de la qualité de vie, une gêne autodéclarée plus importante ainsi qu'une diminution des performances au score de lecture (+20 dB==> 2 mois de retard)	
		(Seabi et al. 2015)		persistance du retard à l'apprentissage après arrêt des expositions	
		(Trimmel et al. 2012)		L'étude des capacités cognitives d'apprentissage chez des volontaires exposés soit à des bruits de voisinage (45 dB(A), 20 individus) soit à des bruits de passage d'avion (48 dB(A), 19 individus) montre des altérations des capacités dans les 2 cas. Selon les auteurs, le processus cognitif d'apprentissage serait structurellement modifié pour le groupe exposé au bruit aérien, s'accompagnant d'une augmentation de la fluctuation de la conductivité de la peau en plus d'un accroissement de la fréquence cardiaque en fin de test. Les auteurs avancent diverses pistes explicatives parmi lesquelles la sollicitation de mécanismes cognitifs de vigilance liée au passage des avions, des exigences accrues d'attention (perception sélective) et des difficultés à changer de stratégie cognitive durant l'exposition au bruit.	

	Trouble cognitif évalué via des tests cognitifs	(Eagan et al. 2004) (Green, Pasternack, et Shore 1982) (Sharp et al. 2014) (Zusman 2007)		associations entre exposition au bruit aérien et de plus faibles scores aux tests d'évaluation standardisés chez l'enfant	modéré
	Déficit de la mémoire à court ou à long terme	(Haines, Stansfeld, et al. 2001a)		associations entre exposition au bruit aérien et plus faibles capacités de mémorisation sur le long-terme aucune étude sur les capacités de mémorisation à court-terme.	modéré
	Déficit de l'attention	(Haines, Stansfeld, Brentnall, et al. 2001, Hygge, Evans, et Bullinger 2002, Matsui et al. 2004, Stansfeld et al. 2010, Stansfeld et al. 2005)		aucun effet délétère du bruit aérien sur l'attention des enfants	
	Déficit de la fonction exécutive (capacité de mémoire de travail)	(Clark et al. 2012, Haines, Stansfeld, Brentnall, et al. 2001, Haines, Stansfeld, et al. 2001a, Klatte et al. 2014, Matheson et al. 2010, Stansfeld et al. 2010, Stansfeld et al. 2005, Van Kempen et al. 2012, Van Kempen et al. 2010).		aucun effet délétère du bruit aérien sur les fonctions exécutives	
		(Aşçigil Dincer et Yilmaz 2016)		effets spécifiques du bruit au domicile sur les performances de devoirs Les résultats montrent des performances significativement affectées par le bruit aérien ==> l'importance de considérer les effets du bruit sur les performances scolaires au regard non pas uniquement des expositions à l'école mais également de celles au domicile.	
		(Elmenhorst et al. 2014)		exposition au bruit des transports durant la nuit et performances cognitives le lendemain le bruit aérien était la source correspondant à la plus grande gêne exprimée une diminution faible mais significative du temps de réaction a été trouvée suivant les expositions nocturnes au bruit des transports (indépendamment du type de transport) par rapport aux nuits sans exposition.	
Effets auditifs	Atteinte auditive permanente				
	Acouphène permanent				
Effets périnataux	Naissance prématurée	(Ristovska, Laszlo, et Hansell 2014)		le niveau de preuve est suffisant pour conclure en l'existence d'associations claires entre expositions sonores professionnelles (niveaux sonores élevés) et divers effets tels que le faible poids à la naissance, la prématurité et faibles tailles durant la période gestationnelle.	
	Faible poids à la naissance			en raison du faible nombre d'études épidémiologiques disponibles à ce sujet pour le bruit dans l'environnement, les preuves d'effets du bruit des transports sur la reproduction chez l'être humain demeurent pour l'instant limitées mais sont particulièrement suggestives notamment concernant le poids à la naissance.	
	Anomalie congénitale				
Qualité de vie, bien-être et santé mentale	Etat de santé et qualité de vie autodéclarée	(Welch et al. 2016)		les personnes se déclarant sensibles au bruit avaient une qualité de vie liée à la santé significativement plus faible lorsqu'ils vivaient dans le premier secteur à proximité de l'aéroport que lorsqu'ils résidaient dans la zone témoin	
		(Lawton et Fujiwara 2016)		pas d'association entre le fait de résider à proximité d'un aéroport (moins de 5km) et le bien-être déclaré, mais montre cependant que le fait d'être exposé au-delà de 55 dB en journée à domicile affecte négativement et de manière significative les scores des 5 indicateurs subjectifs de bien être	
		(Wright et al. 2018)	LAeq 16h	prévalence plus élevée de mauvaise santé mentale autodéclarée pour les résidents exposés aux plus forts niveaux sonores (> 57 dB) comparativement aux niveaux d'exposition les plus faibles (< 54 dB) ; cependant, aucune association avec les niveaux de bruit n'est trouvée après ajustement avec les statuts socioéconomiques.	
	Consommation médicamenteuse (anxiété et dépression)				
	Dépression, anxiété et détresse psychologique autodéclarées	(Beutel et al. 2020)		le score de gêne (exprimée pour le jour et la nuit) constitue un bon prédicteur de nouvelles apparitions de symptômes d'anxiété, de dépression et de perturbations du sommeil. La gêne liée spécifiquement au bruit aérien serait mieux associée à la prédiction de dépression et d'états anxieux (Beutel et al. 2016) : une association avait été faite entre les individus fortement gênés et une prévalence 2 fois plus grande de dépression et d'anxiété par rapport à la population générale	

	Troubles de l'anxiété et état dépressif évalué par un entretien	(Baudin et al. 2018)		association significative entre la gêne et les sentiments dépressifs/ la détresse psychologique : suivant les catégories de gêne, - pour les sentiments dépressifs : OR entre 0.89 [0.50;1.59] et 2.61 [1.09;6.23] - pour l'effet de détresse psychologique OR entre 1.49 [0.94;2.39] et 3.64 [1.70;7.78]	
		(Matsui 2013)	Ldn	forte corrélation des troubles psychosomatiques avec les perturbations du sommeil et dans une moindre mesure avec la gêne exprimée ==> ces effets de santé pourraient être une conséquence des perturbations du sommeil liées au bruit aérien	
	Troubles émotionnels et du comportement chez l'enfant	(Dreger et al. 2015)		L'étude de la première cohorte relative aux impacts des expositions au bruit dans l'environnement à domicile sur la santé mentale des enfants (593 garçons et 602 filles en Allemagne suivis entre les niveaux équivalents CP et CM1, entre 2005-2006 et 2009-2010) par Dreger et al. montre des associations significatives avec le bruit du transport routier mais pas avec le bruit aérien.	
	Hyperactivité chez l'enfant				
	Autres effets sur la santé mentale	(Seidler et al. 2017)	LAeq 24h	relation entre dépression (donnée d'assurance de santé) et exposition au bruit aérien : cette association bien que significative n'est pas linéaire, atteignant un maximum pour des expositions comprises entre 50 et 55 dB LAeq 24h (OR = 1,23 ; IC à 95 % =1,19-1,28), pour décroître ensuite. Afin d'expliquer ceci, les auteurs avancent l'hypothèse d'un biais de comportement : aux niveaux de bruit les plus élevés, les personnes les plus vulnérables adopteraient des comportements visant à réduire ces expositions (ex : isolation phonique ou déménagement hors de ces zones).	
Effets sur le métabolisme	Diabète	(Dzhambov 2015)	Lden	association significative entre exposition au bruit (non spécifique au bruit aérien) et augmentation du risque de diabète de type 2 risque plus élevé de 19% pour les individus exposés à + de 60 dB méta-analyse pour les expositions professionnelles (+ ou - 85dB) ne montre pas d'effet	
		(Sakhvidi et al. 2018)		augmentation du risque de diabète sucré (type 1, 2 et gestationnel) de 6% [3%;9%] pour une augmentation de l'exposition sonore de 5 dB (indépendamment du type de source sonore) La force de l'association pour le bruit aérien s'avère la plus élevée	
		(Eze et al. 2017)	Lden	l'incidence des diabète (1 et 2), expositions sonores au domicile (pour le bruit routier, ferroviaire et aérien, calculé en Lden, prise en compte du nombre d'évènements sonores de nuit et d'un indicateur d'intermittence du bruit reflétant le caractère événementiel de l'exposition sonore) association pour le bruit aérien proche de la significativité : RR = 1.86 [0.96;3.59] effets particulièrement importants chez les participants exposés au bruit aérien, rapportant un sommeil de faible qualité ou dormant fenêtre ouverte.	
	Obésité	(Eriksson et al. 2014).	Lden	pas d'association claire entre exposition au bruit aérien (avec considération de l'historique résidentiel) et augmentation de l'indicateur de masse corporelle (IMC) ou de survenue de diabète de type 2 augmentation de l'exposition de 5 dB associée à une augmentation de 1,51 cm [1.13;1.89] après ajustement des facteurs de confusion Ces associations ne semblent pas modifiées par les perturbations du sommeil.	
		(Pyko et al. 2017).	Lden	gain de tour de taille de 0,16 cm/ an [0.14;0.17] pour un accroissement de 10 dB du bruit aérien au domicile Un gain de poids est également observé, exclusivement pour les expositions au bruit aérien. l'incidence de l'obésité abdominale particulièrement marquée chez ceux exposés aux 3 types de bruit de transport, suggère un effet particulièrement délétère de la multi-exposition.	
cancer du sein	(Hegewald et al. 2017)	LAeq 24h	plausibilité du rôle de l'altération du sommeil dans la survenue de cancers du sein augmentation significative des tumeurs au récepteur des œstrogènes négatif (ER-) uniquement pour les expositions au bruit aérien: OR pour le niveau d'exposition [55-59] dB LAeq 24h = 1.41 [1.04;1,90] Aucune association n'est trouvée pour les cancers du sein au récepteur des œstrogènes positif (ER+).		

ANNEXE 4. LES DIFFERENTS TYPES D'ETUDES SANITAIRES ET QUELQUES STATISTIQUES

1. Introduction

D'après l'OMS, 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 ". Ainsi, des études sanitaires ont été menées pour étudier les nombreux effets du bruit sur la santé humaine. (gêne, perturbation du sommeil, maladie cardiaques, troubles cognitifs...).

Les études sanitaires menées sont de différents types (de cohorte, cas-témoins, longitudinales, transversales) et par conséquent, les statistiques descriptives également.

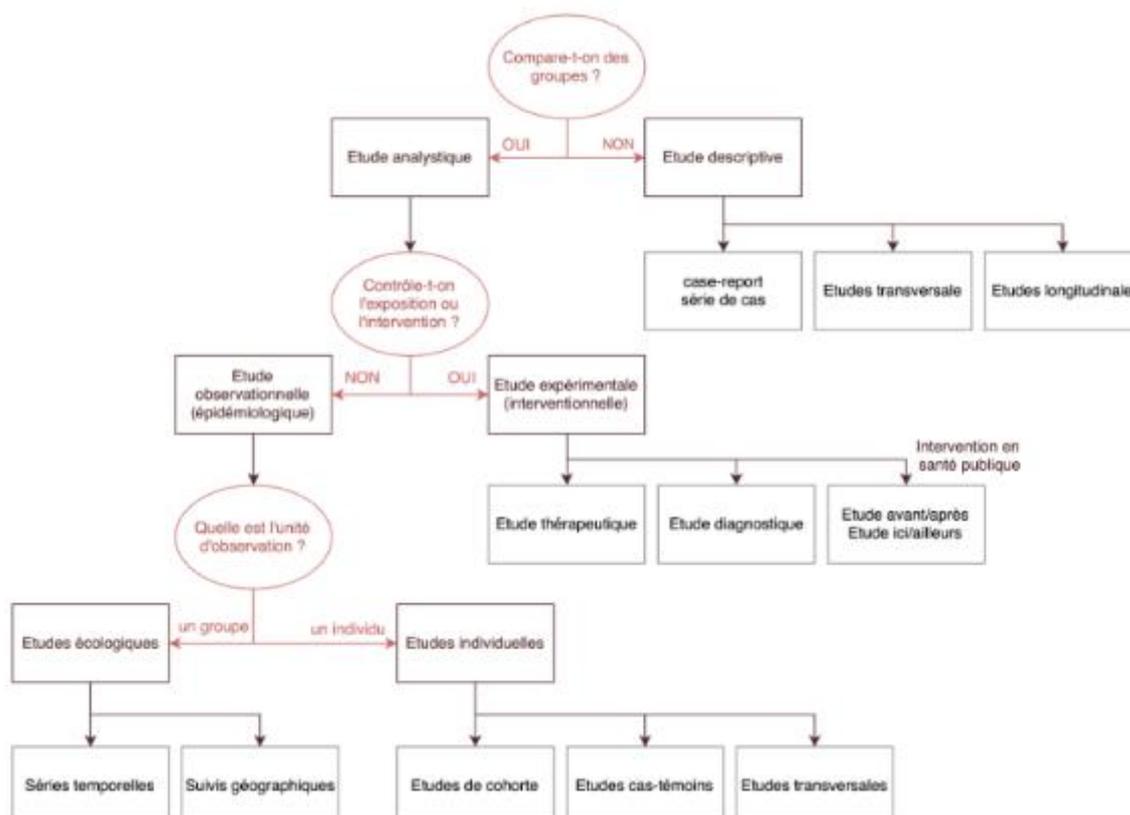
La présente fiche présente succinctement les différentes études sanitaires sur les effets du bruit trouvées dans la bibliographie ainsi que les résultats associés.

2. Lexique

Prévalence : proportion de personnes concernées par l'événement de santé dans une population donnée à un moment donné. Elle s'exprime en nombre de cas rapporté à une population.

Incidence : pourcentage de nouveaux cas présentant l'événement de santé étudié au cours d'une période donnée dans une population donnée. L'incidence est exprimée en nombre de cas, ou par un rapport, ou un pourcentage de la population générale, par unité de temps

3. Les différents types d'études sanitaires menées en lien avec le bruit



Issu de : <https://lepcam.fr/index.php/les-etapes/type-etude/>

- L'étude écologique compare la fréquence de survenue de la pathologie au même moment au sein de plusieurs populations qui diffèrent quant à leurs facteurs de risque

- L'étude de cohorte consiste à suivre dans le temps un ensemble de personnes recrutées à un moment où elles étaient indemnes de l'événement de santé d'intérêt. L'objectif est de mesurer la survenue de nouveaux cas de l'événement de santé au sein de cet ensemble de personnes, tout en enregistrant individuellement les facteurs de risques, et de comparer l'évolution de la survenue des nouveaux cas entre sujets exposés et non exposés. Une grande partie des études de cohorte sont prospectives.
- L'étude cas-témoins consiste à recruter des personnes présentant l'événement de santé d'intérêt, d'une part, et des personnes ne présentant pas l'événement de santé (ou témoins), d'autre part. On relève par questionnaires ou dosages, sur ces deux groupes, le niveau de l'exposition à un ou plusieurs facteurs de risque. Une étude cas-témoins est par définition rétrospective : le recrutement s'effectue après la survenue de la maladie.
- Les études transversales permettent d'observer l'état de santé d'une population à un " instant " donné. Elles permettent d'observer la fréquence de survenue d'un phénomène de santé, dans une population, à un moment précis. Les informations sont recueillies sur une période brève et fournissent un indicateur statique de morbidité : la prévalence.
- Les études longitudinales permettent de suivre la fréquence de ce phénomène de santé au cours du temps et fournissent un indicateur dynamique de morbidité : l'incidence

4. Les statistiques utilisées dans les études épidémiologiques

Soit **M** une maladie et **E** une exposition à un facteur de risque

- **Risque Relatif (RR)** = rapport de deux risques :
 - risque de maladie (M^+) chez les exposés (E^+) : $p_1 = P(M^+/E^+)$
 - risque de maladie chez les non exposés (E^-) : $p_0 = P(M^+/E^-)$

Le risque relatif porte sur un nombre d'individus malades par rapport au nombre total d'individus.

$$RR = \frac{P(M^+/E^+)}{P(M^+/E^-)} = \frac{p_1}{p_0}$$

- **Odds Ratio (OR)** (rapport de cotes)
 - Cote de la maladie chez les exposés : $\frac{P(M^+/E^+)}{P(M^-/E^+)} = \frac{p_1}{1-p_1}$
 - Cote de la maladie chez les non exposés : $\frac{P(M^+/E^-)}{P(M^-/E^-)} = \frac{p_0}{1-p_0}$

L'*odds ratio* porte sur un nombre d'individus malades par rapport au nombre d'individus non malades.

$$OR = \frac{\frac{p_1}{1-p_1}}{\frac{p_0}{1-p_0}}$$

- RR et OR varient entre 0 et $+\infty$
- **RR et OR donnent des valeurs différentes**, mais l'OR est une bonne approximation du RR quand la maladie est rare
- $RR=1$ (ou $OR=1$) : pas de lien entre exposition et maladie
- $RR<1$ (ou $OR <1$) : l'exposition est un facteur protecteur
- $RR>1$ (ou $OR >1$) : l'exposition est un facteur de risque

On utilise le risque relatif lorsque l'on connaît l'incidence de la maladie (enquêtes de cohortes). Les *odds ratio* sont utilisés dans les études cas-témoins pour évaluer les effets indésirables d'une exposition à un produit nocif. Dans ces études, la prévalence de l'évènement indésirable (le taux d'évènement indésirable dans le groupe témoin) n'est pas connue (le groupe de référence est un groupe de personnes atteintes de la maladie et le groupe témoin est constitué d'une population identique non atteinte). On ne peut donc pas connaître le risque relatif puisqu'on ne connaît pas son dénominateur.

Le **Hazard Ratio (HR)** est proche du RR avec une dimension temporelle supplémentaire. Le HR se définit à un temps t comme le rapport entre la fonction de risque instantané au temps t chez les exposés et la fonction de risque

instantané au temps t chez les non exposés. La fonction de risque instantané est la probabilité que l'événement se produise dans un petit intervalle Δt juste après t sachant que l'événement n'a pas eu lieu jusqu'à t .

5. La méthode GRADE

Il existe différents types d'études épidémiologiques et différentes statistiques. Les recommandations de l'OMS de 2018 (Noise guidelines) ont été établies avec un niveau de qualité de la preuve pour la relation entre le bruit et chaque effet sanitaire considéré.

Le niveau de qualité de la preuve a été déterminé en utilisant l'approche GRADE. Le niveau de qualité initial est déterminé par le design de l'étude : les essais contrôlés randomisés sont considérés comme de haute qualité, alors que les études observatoires (non-randomisés) sont considérées de faible qualité. Divers facteurs sont ensuite considérés pour diminuer/augmenter le niveau de qualité de preuve. Les cinq facteurs à considérer pour abaisser le niveau de qualité de preuve d'un ou deux niveaux sont les suivants :

- Les limites de l'étude ou le risque de biais dans les études qui constitue le faisceau de preuves ;
- L'inconsistance des résultats entre les études ;
- Les preuves indirectes dans les études ;
- Les imprécisions dans l'estimation des résultats ;
- Les biais de publication relevés dans un faisceau de preuves.

Les trois facteurs à considérer pour augmenter le niveau de qualité de preuves sont les suivants :

- La grande taille de l'effet mesuré ;
- Les biais et les facteurs de confusion opposent un effet (i.e. Quand tous les facteurs de confusion possibles devraient réduire la taille de l'effet et qu'il demeure un effet significatif) ;
- Un gradient de l'exposition et de la réponse.

L'approche GRADE a été développée pour les études de médecine clinique, pour lesquelles la plupart des études sont randomisées. Cela n'est pas possible pour les études environnementales. Par conséquent, pour l'association entre l'exposition sonore et les effets sanitaires, le niveau de haute qualité de preuve est initialement attribué aux études de cohorte et aux études cas-témoins. Les études transversales et les études écologiques sont respectivement jugées comme de faible et de très faible qualité. En ce qui concerne la gêne et la perturbation du sommeil, les études transversales ont été considérées comme disposant d'un niveau de haute qualité de la preuve car ces effets sont considérés comme des effets immédiats de l'exposition au bruit environnemental.

6. Bibliographie de l'Annexe 2

<https://planet-vie.ens.fr/thematiques/sante/epidemiologie/differents-types-d-etudes-epidemiologiques>

https://presse.inserm.fr/wp-content/uploads/2022/12/repere_epidemiologie.pdf

<https://www.idbc.fr/odds-ratio-hazard-ratio-et-risque-relatif-quelles-differences/>

https://fad.univ-lorraine.fr/pluginfile.php/23861/mod_resource/content/1/co/Proba_RR_OR.html

Jeu de données n°1 – Pour les avions d'affaire

Corrélations	Durée	L _{Amax}	SEL	L _{NP}	L _C	PNLT _{max}	EPNL	L _{LF}	L _{NE}	L _{A,LF}	LFSL
Durée	1,00										
L _{Amax}	-0,55	1,00									
SEL	-0,58	0,99	1,00								
L _{NP}	-0,56	0,96	0,98	1,00							
L _C	-0,36	0,72	0,73	0,69	1,00						
PNLT _{max}	-0,23	0,83	0,81	0,76	0,89	1,00					
EPNL	-0,19	0,73	0,73	0,68	0,87	0,95	1,00				
L _{LF}	0,00	0,08	0,04	-0,03	0,51	0,34	0,32	1,00			
L _{NE}	0,21	-0,01	-0,07	-0,12	0,43	0,30	0,28	0,98	1,00		
L _{A,LF}	-0,24	0,47	0,51	0,48	0,90	0,72	0,76	0,39	0,32	1,00	
LFSL	0,25	0,02	0,00	-0,04	0,47	0,35	0,31	0,87	0,90	0,38	1,00

Jeu de données n°1 – Pour les hélicoptères

Corrélations	Durée	L _{Amax}	SEL	L _{NP}	L _C	PNLT _{max}	EPNL	L _{LF}	L _{NE}	L _{A,LF}	LFSL
Durée	1,00										
L _{Amax}	-0,65	1,00									
SEL	-0,66	0,99	1,00								
L _{NP}	-0,69	0,98	0,99	1,00							
L _C	-0,53	0,92	0,94	0,94	1,00						
PNLT _{max}	-0,48	0,94	0,95	0,95	0,98	1,00					
EPNL	-0,50	0,95	0,96	0,95	0,98	0,99	1,00				
L _{LF}	-0,36	0,78	0,79	0,79	0,93	0,90	0,89	1,00			
L _{NE}	-0,17	0,68	0,69	0,69	0,87	0,84	0,83	0,98	1,00		
L _{A,LF}	-0,45	0,83	0,83	0,82	0,79	0,80	0,82	0,58	0,51	1,00	
LFSL	-0,41	0,69	0,71	0,71	0,85	0,78	0,80	0,86	0,85	0,54	1,00

Jeu de données n°1 – Pour les piaggios

Corrélations	Durée	L _{Amax}	SEL	L _{NP}	L _C	PNLT _{max}	EPNL	L _{LF}	L _{NE}	L _{A,LF}	LFSL
Durée	1,00										
L _{Amax}	-0,74	1,00									
SEL	-0,75	0,98	1,00								
L _{NP}	-0,75	0,97	0,99	1,00							
L _C	-0,57	0,69	0,72	0,75	1,00						
PNLT _{max}	-0,75	0,95	0,91	0,92	0,78	1,00					
EPNL	-0,77	0,93	0,91	0,93	0,84	0,98	1,00				
L _{LF}	-0,25	0,25	0,19	0,18	0,22	0,39	0,31	1,00			
L _{NE}	-0,04	0,08	0,02	0,01	0,08	0,21	0,13	0,98	1,00		
L _{A,LF}	-0,43	0,57	0,66	0,68	0,92	0,60	0,68	0,08	-0,02	1,00	
LFSL	-0,18	0,18	0,13	0,12	0,10	0,30	0,21	0,94	0,94	-0,01	1,00

Jeu de données n°1 – Pour les avions de tourisme

Corrélations	Durée	L _{Amax}	SEL	L _{NP}	L _C	PNLT _{max}	EPNL	L _{LF}	L _{NE}	L _{A,LF}	LFSL
Durée	1,00										
L _{Amax}	-0,57	1,00									
SEL	-0,60	0,99	1,00								
L _{NP}	-0,62	0,96	0,98	1,00							
L _C	-0,48	0,84	0,86	0,85	1,00						
PNLT _{max}	-0,39	0,64	0,63	0,61	0,61	1,00					
EPNL	-0,51	0,90	0,91	0,90	0,95	0,98	1,00				
L _{LF}	-0,20	0,39	0,41	0,41	0,66	0,33	0,60	1,00			
L _{NE}	0,01	0,27	0,28	0,27	0,56	0,25	0,49	0,97	1,00		
L _{A,LF}	-0,42	0,78	0,80	0,79	0,90	0,54	0,84	0,42	0,34	1,00	
LFSL	-0,04	0,28	0,29	0,28	0,56	0,26	0,49	0,93	0,95	0,36	1,00

Jeu de données n°3 – Pour les avions au décollage

Corrélations	Dist.	Alti.	Durée	L _{Amax}	SEL	L _{NP}	L _C	PNLT _{max}	EPNL	L _{LF}	L _{NE}	L _{A,LF}	LFSL
Distance	1,00												
Altitude	-0,30	1,00											
Durée	0,01	0,06	1,00										
L _{Amax}	-0,47	0,21	-0,38	1,00									
SEL	-0,47	0,21	-0,40	0,99	1,00								
L _{NP}	-0,48	0,19	-0,41	0,98	0,99	1,00							
L _C	-0,25	0,11	-0,12	0,29	0,29	0,29	1,00						
PNLT _{max}	-0,23	0,12	-0,08	0,26	0,26	0,26	0,99	1,00					
EPNL	-0,23	0,12	-0,09	0,27	0,27	0,27	0,99	1,00	1,00				
L _{LF}	-0,17	0,07	-0,02	0,10	0,10	0,09	0,92	0,92	0,92	1,00			
L _{NE}	-0,20	0,08	0,05	0,10	0,10	0,09	0,80	0,79	0,79	0,96	1,00		
L _{A,LF}	-0,34	0,11	-0,14	0,36	0,36	0,36	0,95	0,93	0,93	0,80	0,67	1,00	
LFSL	-0,20	0,06	0,04	0,08	0,08	0,07	0,92	0,91	0,92	0,99	0,94	0,81	1,00

Jeu de données n°3 – Pour les avions à l'atterrissage

Corrélations	Dist.	Alti.	Durée	L _{Amax}	SEL	L _{NP}	L _C	PNLT _{max}	EPNL	L _{LF}	L _{NE}	L _{A,LF}	LFSL
Distance	1,00												
Altitude	-0,10	1,00											
Durée	0,03	0,11	1,00										
L _{Amax}	-0,34	-0,08	-0,38	1,00									
SEL	-0,34	-0,08	-0,40	0,99	1,00								
L _{NP}	-0,35	-0,08	-0,42	0,98	0,99	1,00							
L _C	-0,16	0,03	-0,12	0,32	0,32	0,32	1,00						
PNLT _{max}	-0,15	0,02	-0,09	0,29	0,29	0,28	0,99	1,00					
EPNL	-0,15	0,02	-0,10	0,29	0,29	0,29	0,99	1,00	1,00				
L _{LF}	-0,07	0,05	-0,05	0,12	0,13	0,12	0,93	0,92	0,92	1,00			
L _{NE}	-0,07	0,07	0,02	0,14	0,14	0,12	0,81	0,79	0,80	0,95	1,00		
L _{A,LF}	-0,25	0,07	-0,10	0,39	0,39	0,39	0,94	0,93	0,93	0,82	0,72	1,00	
LFSL	-0,09	0,06	0,01	0,10	0,10	0,10	0,92	0,92	0,92	0,99	0,93	0,83	1,00

Jeu de données n°3 – Pour les avions au sol

Corrélations	Dist.	Alti.	Durée	L _{Amax}	SEL	L _{NP}	L _C	PNLT _{max}	EPNL	L _{LF}	L _{NE}	L _{A,LF}	L _{FSL}
Distance	1,00												
Altitude	-0,23	1,00											
Durée	-0,09	0,16	1,00										
L _{Amax}	-0,18	0,05	-0,32	1,00									
SEL	-0,18	0,04	-0,35	0,99	1,00								
L _{NP}	-0,18	0,03	-0,36	0,97	0,98	1,00							
L _C	-0,17	0,07	-0,07	0,21	0,21	0,21	1,00						
PNLT _{max}	-0,16	0,06	-0,04	0,17	0,17	0,17	0,99	1,00					
EPNL	-0,16	0,06	-0,05	0,17	0,17	0,17	0,99	1,00	1,00				
L _{LF}	-0,15	0,07	-0,03	0,10	0,10	0,10	0,97	0,96	0,96	1,00			
L _{NE}	-0,18	0,11	0,06	0,13	0,13	0,12	0,88	0,86	0,87	0,96	1,00		
L _{A,LF}	-0,26	0,13	-0,01	0,24	0,23	0,24	0,94	0,93	0,93	0,88	0,82	1,00	
L _{FSL}	-0,19	0,08	0,04	0,08	0,07	0,07	0,97	0,96	0,96	0,98	0,94	0,90	1,00

ANNEXE 6. " EXPLOITATION DES DONNEES DU RESEAU PERMANENT DE MESURE DU BRUIT AERIEN EN ÎLE-DE-FRANCE "

ANNEXE 7. CANEVAS DE LA METHODE D'ÉVALUATION DES IMPACTS SANITAIRES PROPOSEE PAR (ANSES, 2013)

1) Préalable au processus d'évaluation des impacts sanitaires

a) Détermination et description de la zone géographique étudiée

- i) Localisation géographique de la source sonore
- ii) Délimitation de la zone géographique de l'étude
- iii) Identification (localisation dans la zone géographique considérée et nombre d'individus concernés) :
 - (1) Des établissements de santé et médico-sociaux ;
 - (2) Des établissements d'enseignement ;
 - (3) Des lieux de travail (quantification des travailleurs en horaires décalés).
- iv) Localisation des " zones calmes " (espaces verts et autres)
- v) Caractérisation de la zone étudiée :
 - (1) Espace rural / urbain ;
 - (2) Type d'habitats : collectifs / individuels ;
 - (3) Qualité des habitats : vétusté/insalubrité/isolation ;
 - (4) Densité de population
 - (5) Valeur immobilière de l'habitat ;
 - (6) Présence de façades silencieuses (résidences).
- vi) Caractérisation des populations présentes (étude socio-économique) :
 - (1) Détermination des populations dépendantes de la nouvelle infrastructure source de bruit (projet) ;
 - (2) Quantification des individus travaillant en horaires décalés ;
 - (3) Objectivation des statuts socio-économiques (Indice Townsend pour les injustices environnementales) ;
 - (4) Evaluation de la qualité de vie locale (indices de bien-être, tels que les dérivés territoriaux de l'Indicateur de Développement Humain, l'Indice de Précarité Sociale ; Indice de satisfaction environnementale ; Indices de confiance politique, etc...

b) Description de l'état initial

- i) Identification et description des sources sonores existantes avant le projet :
 - o Type(s) de bruit : continu / évènementiel non impulsionnel / évènementiel de type impulsionnel ;
 - (1) Tonalité : pas de tonalité marquée/hauts fréquences/basses fréquences ;
 - (2) Spectre de fréquences : pas de prépondérance / prépondérance hauts fréquences / prépondérance moyennes fréquences / prépondérances basses fréquences ;
 - (3) Rythme d'émissions sonores durant l'année : continue / saisonnier / saisonnier mais période critique ;
 - (4) Rythme d'émissions sonores hebdomadaire : continu / jours ouvrés uniquement / fins de semaine uniquement ;
 - (5) Prévisibilité des évènements de bruits ;
 - (6) Distribution de la fréquence d'apparition des évènements de bruit : régulière / irrégulière.

c) Description du projet d'infrastructure

- i) Description des caractéristiques de la nouvelle source sonore (infrastructure nouvelle en fonctionnement) :
 - (1) Type(s) de bruit : continu / évènementiel non impulsionnel / évènementiel de type impulsionnel ;
 - (2) Tonalité : pas de tonalité marquée/hauts fréquences/basses fréquences ;
 - (3) Spectre de fréquences : pas de prépondérance / prépondérance hauts fréquences / prépondérance moyennes fréquences / prépondérances basses fréquences ;
 - (4) Rythme d'émissions sonores durant l'année : continue / saisonnier / saisonnier mais période critique ;

(5) Rythme d'émissions sonores hebdomadaire : continu / jours ouvrés uniquement / fins de semaine uniquement ;

(6) Prévisibilité des événements de bruits.

- ii) Description des modifications de la qualité de l'environnement attribuables au projet :
 - (1) Multi exposition : oui / non ;
 - (2) Co-expositions : aucune co-exposition remarquable / pollution atmosphérique / autres pollutions ;
 - (3) Qualité de vie locale.
- iii) Description des modifications de facteurs géographiques attribuables au projet :
 - (1) Valeur de l'habitat ;
 - (2) Présence de façades silencieuses.
- iv) Description des modifications de facteurs géographiques attribuables au projet :
 - (1) Valeur de l'habitat ;
 - (2) Présence de façades silencieuses.
- v) Caractérisation de la perception de la source de bruit
 - (1) Significativité du signal et relations socio-économique avec la source de bruit) : aucune influence / appréciation positive / appréciation négative.

2) Détermination des expositions

- a) **Sélection des valeurs seuils utilisées pour chacun des effets retenus**
(Infarctus du myocarde / apprentissage scolaire / perturbations du sommeil / gêne)
- b) **Rassemblement des données nécessaires à la cartographie des expositions sonores**
 - i) **Identification des cartographies d'exposition sonores existantes et données permettant de modéliser les expositions sonores dans l'état initial (avant projet) ;**
 - ii) **Recueil des données permettant de modéliser les expositions sonores attribuables au projet d'infrastructure étudié ;**
 - iii) **Recueil des données IGN de répartition des populations (échelle Iris4 recommandée).**
- c) **Etablissement d'une cartographie des expositions sonores**
 - i) **Avant projet ;**
 - ii) **Après projet.**
- d) **Caractérisation des expositions (pour chaque effet sanitaire)**
 - i) **Quantification des personnes exposées au-dessus des seuils considérés.**

3) Caractérisation des impacts sanitaires pour chaque effet sanitaire

- a) **Evaluation quantitative des impacts sanitaires à l'aide des relations doses-réponses**
- b) **Prise en compte des déterminants complémentaires pour la caractérisation des impacts sanitaires**

4) Identification et caractérisation des incertitudes

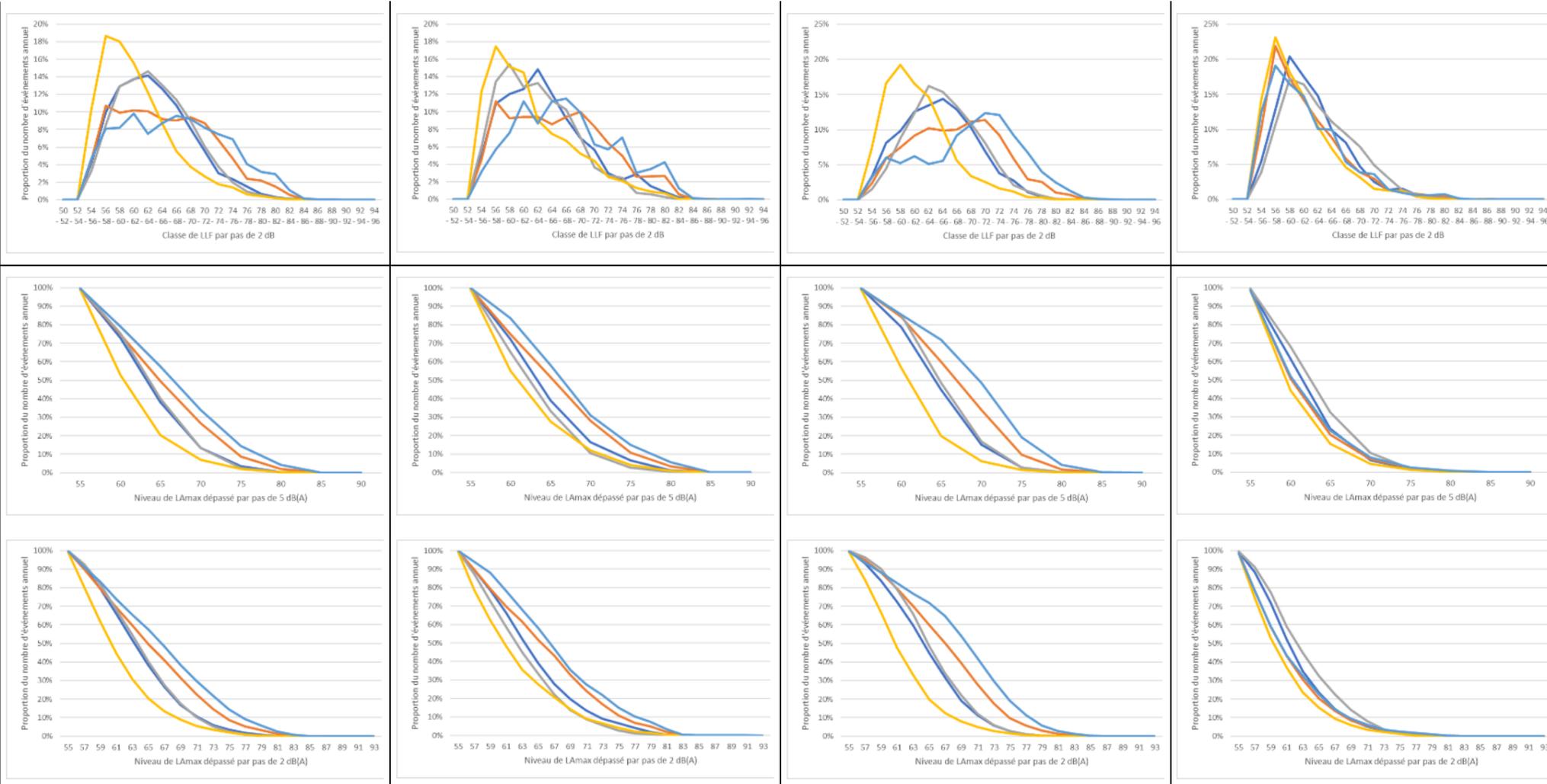
- a) Incertitudes liées à l'évaluation des expositions o Incertitudes induisant une surestimation des expositions ;
 - i) Incertitudes induisant une sous - estimation des expositions ;
 - ii) Incertitudes dont les effets sur les expositions ne sont pas connus.
- b) Incertitudes liées à l'évaluation des impacts sanitaires o Incertitudes induisant une surestimation des impacts sanitaires ;
 - i) Incertitudes induisant une sous-estimation des impacts sanitaires ;
 - ii) Incertitudes dont les effets sur les impacts sanitaires ne sont pas connus.

Les étapes, sous-processus et données indispensables à l'utilisation de la méthode exposée ci-dessus apparaissent en gras. Les autres actions, bien que non imposées, sont fortement recommandées.

ANNEXE 8. PROPOSITIONS DE REPRESENTATIONS SUR LE JEU DE DONNEES N°3

- Station n°1
- Station n°2
- Station n°3
- Station n°4
- Station n°5

Toute allure	Décollage	Atterrissage	Au sol	Commentaire
				<p>Proportion du nombre d'événements annuel en fonction de la durée des événements</p> <p>La représentation par type d'allure permet d'observer des distributions différentes en fonction de la station et de l'allure considérées.</p> <p>Il a été proposé une représentation en camembert dans le corps du rapport. La représentation en courbe est une autre possibilité, plus conventionnelle, dans laquelle les comparaisons entre stations sont facilitées mais la lecture pour chaque station est plus complexe.</p>
				<p>Proportion du nombre d'événements annuel en fonction des classes de Lmax, par pas de 5 dB(A) en haut, par pas de 2 dB(A) en bas</p> <p>Deux représentations ont été proposées : une avec un pas de 5 dB(A), l'autre avec un pas de 2 dB(A). La représentation par pas de 2 dB(A) permet d'observer les variations plus finement. Cependant, les deux représentations donnent les mêmes tendances.</p> <p>Compte tenu que les seuils réglementaires pour les cartes de bruit stratégiques, les plans de bruit dans l'environnement et les plans de gêne sonore sont par pas de 5 dB(A), il semble plus facile de conserver ce pas afin de comparer ces graphiques aux représentations réglementaires.</p>
				<p>Proportion du nombre d'événements annuel en fonction des classes de LLF, par pas de 5 dB(A) en haut, par pas de 2 dB(A) en bas</p> <p>Les mêmes conclusions que précédemment peuvent être établies. Il est intéressant de constater qu'en fonction de l'allure de l'avion, les courbes de répartition du LLF évoluent. Ainsi, les courbes obtenues pour les décollages sont très similaires à celles pour toute allure. Par contre, pour les atterrissages, on constate que pour la station n°5, 30% des événements ont un LLF compris entre 70 et 75 dB(A), c'est-à-dire une présence forte de basses fréquences. Il</p>



serait intéressant de comparer cette information avec les informations météorologiques, qui peuvent influencer à la fois sur la trajectoire empruntée par l'avion mais également sur les conditions de propagation.

Cette information pourrait également être utile pour éventuellement proposer des solutions d'isolement différentes : en effet, ces représentations montrent bien des situations d'exposition différentes en fonction des stations, qui peuvent donc appeler à des solutions d'isolement différentes.

Proportion du nombre d'événements annuel en fonction du niveau de L_{Amax} dépassé, par pas de 5 dB(A) en haut, par pas de 2 dB(A) en bas

De nouveau, distinguer les représentations par type d'allure permet d'observer des comportements différents et peut donc permettre de mieux décrire les différentes situations d'exposition.

De plus, de façon encore plus marquée que précédemment, on constate que les tendances observées sur les représentations par 2 et 5 dB(A) sont les mêmes et que le pas de 2 dB(A) ne permet que de légèrement lisser les courbes. De même que précédemment, compte tenu du peu de gain en utilisant le pas de 2 dB(A) et de l'utilisation sur les représentations réglementaires de pas de 5 dB(A), il semble plus pertinent de ne conserver que les représentations par pas de 5 dB(A).

- Acoucité, avec l'appui du C., de Santé Publique France et d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, 2024. Note simplifiée du calcul de l'indicateur de risque sanitaire Bruit [WWW Document]. URL https://www.acoucite.org/IMG/pdf/ORHANE_2024_methodologie_DALY.pdf (accessed 3.3.25).
- ADEME, 2021. Le coût social du bruit en France – Estimation du coût social du bruit en France et analyse de mesures d'évitement simultané du coût social du bruit et de la pollution de l'air.
- Anses, 2020. Synthèse des connaissances scientifiques concernant les effets sur la santé liés à l'exposition au bruit issu du trafic aérien. ANSES.
- Anses, 2013. Évaluation des impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire.
- Arntzen, M., Simons, D.G., 2014. Modeling and synthesis of aircraft flyover noise. *Appl. Acoust.* 84, 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.09.002>
- Atmo AuRA/Acoucité/Cerema, 2024. ORHANE | L'Observatoire Régional des Nuisances Environnementales [WWW Document]. URL <https://www.orhane.fr/docs.php> (accessed 4.10.25).
- Atmo Aura/Acoucité/Cerema, 2022. Note technique méthode calcul multi-bruit.
- Barbot, B., 2008. Caractérisation perceptive des bruits d'avions : Influence de leur qualité sonore confrontée à la répétition des événements sur l'expression de la gêne fonctionnelle (PhD Thesis).
- Basner, M., McGuire, S., Elmenhorst, E.-M., Muller, U., 2015. Effects of Aircraft Noise on Sleep: Habituation in the Laboratory and in the Field., in: INTER-NOISE and NOISE-CON. San Francisco, pp. 5240–5247.
- Baudin, C., Lefèvre, M., Champelovier, P., Lambert, J., Laumon, B., Evrard, A.-S., 2018. Aircraft Noise and Psychological Ill-Health: The Results of a Cross-Sectional Study in France. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 1642. <https://doi.org/10.3390/ijerph15081642>
- Baudin, C., Lefèvre, M., Selander, J., Babisch, W., Cadum, E., Carlier, M.-C., Champelovier, P., Dimakopoulou, K., Huithuijs, D., Lambert, J., Laumon, B., Pershagen, G., Theorell, T., Velonaki, V., Hansell, A., Evrard, A.-S., 2019. Saliva cortisol in relation to aircraft noise exposure: pooled-analysis results from seven European countries. *Environ. Health* 18, 102. <https://doi.org/10.1186/s12940-019-0540-0>
- Boeker, E.R., Dinges, E., He, B., Fleming, G., 2008. Integrated Noise Model (INM) Version 7.0 Technical Manual. Office of Environment and Energy, Federal Aviation Administration, Washington DC, USA.
- Bopst, J., 2019. Predicting aircraft noise with AZB 2.0 - a best practice model being revised, in: Proceedings of the 26th International Congress on Sound and Vibration.
- Cameron, D.J., Dotov, D., Flaten, E., Bosnyak, D., Hove, M.J., Trainor, L.J., 2022. Undetectable very-low frequency sound increases dancing at a live concert. *Curr. Biol.* 32, R1222–R1223. <https://doi.org/10.1016/j.CUB.2022.09.035>
- Campos, L.M.B. da C., Silva, M.J. dos S., Oliveira, J.M.G. de S., 2022. On the effects of rough ground and atmospheric absorption on aircraft noise. *Noise Mapp.* 9, 23–47. <https://doi.org/10.1515/noise-2022-0003>
- Camussi, R., Bennett, G.J., 2020. Aeroacoustics research in Europe: The EAS-ASC report on 2019 high-lights. *J. Sound Vib.* 484, 33.
- Casalino, D., Diozzi, F., Sannino, R., Paonessa, A., 2008. Aircraft noise reduction technologies: A bibliographic review. *Aerosp. Sci. Technol.* 12, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2007.10.004>
- Centre de ressources en évaluation, 2025. La sélection des indicateurs [WWW Document]. URL <https://www.eval.fr/la-selection-des-indicateurs/> (accessed 3.31.25).
- Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales, 2012a. Définition du mot "bruit" [WWW Document]. URL <https://www.cnrtl.fr/definition/bruit> (accessed 2.24.25).

- Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales, 2012b. Définition du mot "son" [WWW Document]. URL <https://www.cnrtl.fr/definition/son> (accessed 2.24.25).
- Cerema, 2017. Baobat : faisabilité d'une base de données géoréférencées qualifiant les bâtiments [WWW Document]. URL <https://www.cerema.fr/fr/projets/baobat-faisabilite-base-donnees-georeferenees-qualifiant> (accessed 5.15.25).
- CG Concept, 2016. Le parc Land Art de Buitenschot [WWW Document]. URL <https://www.cgconcept.fr/le-parc-land-art-buitenschot/> (accessed 1.30.25).
- Charalampous, P., Maas, C.C.H.M., Haagsma, J.A., 2024. Disability weights for environmental noise-related health states: results of a disability weights measurement study in Europe. *BMJ Public Health* 2, e000470. <https://doi.org/10.1136/bmjph-2023-000470>
- Commonwealth Coat of Arms, 2024. Western Sydney International (Nancy-Bird Walton) Airport – Air-space and flight path design | Environmental Impact Statement | Chapter 11 - Aircraft noise.
- CSTB, 2025. La Base de Données Nationale des Bâtiments - Un nouvel outil pour le bâtiment [WWW Document]. URL <https://www.cstb.fr/bases-donnees/base-donnees-nationale-batiments> (accessed 5.15.25).
- DataScientest, 2021. Dendrogramme : tout sur le diagramme de clustering hiérarchique [WWW Document]. URL <https://datascientest.com/dendrogramme> (accessed 7.15.25).
- Deo, R., Albert, C.M., 2012. Epidemiology and Genetics of Sudden Cardiac Death. *Circulation* 125, 620–637. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.111.023838>
- Department of Defense - Noise Working Group, 2009. Improving Aviation Noise Planning, Analysis and Public Communication with Supplemental Metrics Guide to Using Supplemental Metrics. Department of Defense - Noise Working Group, Washington.
- DGAC, 2021. Élaboration des cartes de bruit autour des aérodromes - Guide technique. Direction Générale de l'Aviation Civile.
- DGAC, 2014. Élaboration des cartes de bruit autour des aérodromes -3ième édition. Direction Générale de l'Aviation Civile.
- DGAC, 2004. Origine du bruit des avions. DGAC.
- DGAC, S., 2023. Rapport de présentation de l'indicateur global mesuré pondéré de l'énergie sonore émise pour l'année 2023 pour l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle (IGMP). Charles Gaulle 71.
- EASA, 2025. EASA [WWW Document]. Aircr. Categ. Cover. Chapters 3 4 14. URL <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/eaer/technology-and-design/figures-and-tables> (accessed 4.9.25).
- EASA, 2020. ANP database version 2.3. EASA.
- ECAC, 2016. Doc 29. Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports - 4th Edition, in: European Civil Aviation Conference.
- Einicke, K., Kennedy, J., 2025. Predicting airport noise impact to 2040: traffic growth and technology uptake. *Appl. Acoust.*
- Élie-Grosboillot, L., 2014. Le trouble de l'adaptation : revue de la littérature et cas cliniques. UFR de Médecine et de Pharmacie de Rouen.
- Elmenhorst, E.-M., Müller, U., Mendolia, F., Quehl, J., Aeschbach, D., 2016. Residents' attitude towards air traffic and objective sleep quality are related.
- Eurocontrol, 2025. Integrated Aircraft Noise and Emissions Modelling Platform [WWW Document]. URL <https://www.eurocontrol.int/platform/integrated-aircraft-noise-and-emissions-modelling-platform> (accessed 3.6.25).

- EUROCONTROL, 2024. EUROCONTROL Aviation - Long Term Outlook: Flights and CO2 emissions forecast 2024-20250.
- European Environment Agency, 2025. European aviation environmental report 2025. European Environment Agency.
- Evrard, A.-S., Lefèvre, M., Baudin, C., Nassur, A.-M., Bouaoun, L., Carlier, M.-C., Champelovier, P., Giorgis-Allemand, L., Kourieh, A., Lambert, J., Léger, D., Laumon, B., 2020. Bruit des avions et santé des riverains d'aéroport - L'étude nationale Debats - Résultats à l'inclusion. Université Gustave Eiffel. <https://doi.org/10.25578/M3JK-R022>
- FAA, 2024. Aviation Environmental Design Tool (AEDT) - Version 3g. Federal Aviation Administration.
- Ganić, E., Rajé, F., van Oosten, N., 2023. New perspectives on spatial and temporal aspects of aircraft noise: Dynamic noise maps for Heathrow airport. *J. Transp. Geogr.* 106. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103527>
- Geyer, T.F., Enghardt, L., 2023. Conceptual estimation of the noise reduction potential of electrified aircraft engines. *Acta Acust.* 7, 22. <https://doi.org/10.1051/aacus/2023009>
- Gille, L.-A., 2016. Caractérisation physique et perceptive de différentes compositions de trafic routier urbain pour la détermination d'indicateurs de gêne en situation de mono-exposition et de multi-exposition. Université de Lyon, Lyon.
- Gille, L.A., Marquis-Favre, C., Morel, J., 2016. Testing of the European Union exposure-response relationships and annoyance equivalents model for annoyance due to transportation noises: The need of revised exposure-response relationships and annoyance equivalents model. *Environ. Int.* 94, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.04.027>
- Gille, L.-A., Marquis-Favre, C., Weber, R., 2017. Aircraft noise annoyance modeling : consideration of noise sensitivity and of different annoying acoustical characteristics. *Appl. Acoust.* 115, 139–149.
- Gimenez, F.R., Mady, C.E.K., Henriques, I.B., 2023. Assessment of different more-electric and hybrid-electric configurations for long-range multi-engine aircraft. *J. Clean. Prod.* 392, 136171. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136171>
- Gjestland, T., 2019. Reply to Guski, Schreckenberg, Schuemer, Brink and Stansfeld: Comment on Gjestland, T. A Systematic Review of the Basis for WHO's New Recommendation for Limiting Aircraft Noise Annoyance. *Int. J. Env. Res. Pub. Health* 2018, 15, 2717. *Int. J. Environ. Res. Public. Health* 16, 1105. <https://doi.org/10.3390/ijerph16071105>
- Gouvernement du Canada, 2018. Gestion du bruit des aéronefs [WWW Document]. URL <https://tc.canada.ca/fr/aviation/exploitation-aeroports-aerodromes/gestion-bruit-aeronefs> (accessed 3.24.25).
- Granøien, I., Gjestland, T., 2012. Community noise impact assessment.
- GuidEnR HQE., 2025. GuidEnR HQE. Indicateurs de performances acoustiques des éléments et des constructions [WWW Document]. URL <https://www.hqe.guidenr.fr/cible-9-hqe/indicateurs-performance-acoustique-elements-construction.php> (accessed 4.14.25).
- Guski, R., Schreckenberg, D., Schuemer, R., Brink, M., Stansfeld, S.A., 2019. Comment on Gjestland, T. A Systematic Review of the Basis for WHO's New Recommendation for Limiting Aircraft Noise Annoyance. *Int. J. Env. Res. Pub. Health* 2018, 15, 2717. *Int. J. Environ. Res. Public. Health* 16, 1088. <https://doi.org/10.3390/ijerph16071088>
- Halonen, J.I., 2019. Transportation noise and cardiovascular health: role of multiple noise sources. *Occup. Environ. Med.* 76, 199–200. <https://doi.org/10.1136/oemed-2018-105657>
- Hodgdon, K., Atchley, A., Bernhard, R.J., 2007. Low frequency noise Study.

Hong, Z., Su, M., Zhang, H., Xu, Z., Du, L., Chen, L., 2024. Unsteady aerodynamic noise prediction of contra-rotating open rotor using meshless method. *Chin. J. Aeronaut.* 37, 144–165. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.05.018>

iac acoustics, 2013. Ground Run-Up Enclosures, Blast Deflectors, Acoustic Barriers and Cabins [WWW Document]. URL <https://www.airport-suppliers.com/supplier-press-release/ground-run-up-enclosures-blast-deflectors-acoustic-barriers-and-cabins-12/> (accessed 1.30.25).

ICAO, 2024. Strategic plan 2026-2050. ICAO.

ICAO, 2018. DOC 9911, Recommended Method for Computing Noise Contours Around Airports - Second Edition. International Civil Aviation Organization.

ICAO, 2008. DOC 9911, Recommended Method for Computing Noise Contours Around Airports - First Edition. International Civil Aviation Organization.

ICAO, Col., 2021. Noise technology research for fixed wing aircraft. ICAO.

Job, R.F.S., 1988. Community response to noise: A review of factors influencing the relationship between noise exposure and reaction. *J. Acoust. Soc. Am.* 83, 991–1001. <https://doi.org/10.1121/1.396524>

Kansai Airports Technical Department, 2019. Kansai International Airport / Osaka International Airport / Kobe Airport - Environmental Report 2018.

Kapoor, R., Kloet, N., Gardi, A., Mohamed, A., Sabatini, R., 2021. Sound Propagation Modelling for Manned and Unmanned Aircraft Noise Assessment and Mitigation: A Review. *Atmosphere* 12, 1424. <https://doi.org/10.3390/atmos12111424>

Kephalopoulos, S., Paviotti, M., Anfosso-Lédée, F., 2012. Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU). JRC Reference Reports.

Lefèvre, M., Chaumont, A., Champelovier, P., Giorgis Allemand, L., Lambert, J., Laumon, B., Evrard, A.-S., 2020. Understanding the relationship between air traffic noise exposure and annoyance in populations living near airports in France. *Environ. Int.* 144, 106058. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106058>

Leishman, G., 2022. Introduction to Aerospace Flight Vehicles. Embry-Riddle Aeronautical University. <https://doi.org/10.15394/eaglepub.2022.1066>

Leylekian, L., Lebrun, M., Lempereur, P., 2014. An Overview of Aircraft Noise Reduction Technologies. *AerospaceLab J.* Issue 7, 15-pages. <https://doi.org/10.12762/2014.AL07-01>

Lorenzi, C., 2012. Chapitre 4. La perception auditive : notions fondamentales et applications audiologiques, in: *La Psychologie Cognitive*. Éditions de la Maison des sciences de l'homme, pp. 143–164. <https://doi.org/10.4000/books.editionsmsmh.14790>

Marquis-Favre, C., Premat, E., Aubrée, D., Vallet, M., 2005. Noise and its effects - A review on qualitative aspects of sound. Part I: notions and acoustic ratings. *Acta Acust. United Acust.* 91, 613–625.

Miedema, H.M.E., Oudshoorn, C.G.M., 2001. Annoyance from Transportation Noise: Relationships with Exposure Metrics DNL and DENL and Their Confidence Intervals. *Environ. Health Perspect.* 109.

Miedema, H.M.E., Vos, H., 2003. Noise sensitivity and reactions to noise and other environmental conditions. *J. Acoust. Soc. Am.* 113, 1492–1504. <https://doi.org/10.1121/1.1547437>

Miedema, H.M.E., Vos, H., 1999. Demographic and attitudinal factors that modify annoyance from transportation noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 105, 3336–3344. <https://doi.org/10.1121/1.424662>

Miljković, D., 2021. Cymatics for Visual Representation of Aircraft Engine Noise, in: *MIPRO 2021/CTS*. p. 6.

Min. Ecologie, 2025. L'environnement sonore sur la plateforme de Paris-CDG | Ministères Aménagement du territoire Transition écologique [WWW Document]. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/lenvironnement-sonore-plateforme-paris-cdg> (accessed 4.10.25).

- Ministry of the Environment - Government of Japan, 2024. Air & Transportation [WWW Document]. URL <https://www.env.go.jp/en/air/noise/aircraft.html> (accessed 1.30.25).
- More, S.R., 2011. Aircraft Noise Characteristics and Metrics Aircraft Noise Characteristics and Metrics.
- Mouketou, M., 2020. Etude des déterminants environnementaux du stress professionnel : Le cas de salariés français et gabonais exerçant en bureaux ouverts. Université de Nantes.
- Mozaffarian, D., 2016. Dietary and Policy Priorities for Cardiovascular Disease, Diabetes, and Obesity. *Circulation* 133, 187–225. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.115.018585>
- Munich airport, 2024. Night flight [WWW Document]. <https://www.munich-airport.com/night-flight-264466>. URL <https://www.munich-airport.com/night-flight-264466> (accessed 1.30.25).
- Nakamura, S., Tokita, Y., 1981. Frequency characteristics of subjective responses to low frequency sound, in: INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. pp. 735–738.
- Naylor, J., 2021. Sounds Abroad, in: Naylor, J. (Ed.), *Now Hear This: A Book About Sound*. Springer International Publishing, Cham, pp. 163–212. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89877-9_4
- Olny, X., Mietlicki, F., Regairaz, J.-P., Bierra, B., Janillon, V., Munoz, P., Carsac, C., Sineau, M., Hellot, M., Fillol, C., Coquel, G., 2025. Bilan des expérimentations relatives à la mise en œuvre de l'arrêté du 29 septembre 2022 " Pics de bruit ferroviaires " - Synthèse d'étape des résultats de la phase 1. Cerema, CNB.
- ORHANE, 2023. Observatoire Régional Harmonisé Auvergne-Rhône-Alpes des Nuisances Environnementales [WWW Document]. URL <https://orhane.fr/> (accessed 3.3.25).
- Padova, A., 2013. La gestion du bruit des aéronefs au Canada - Publication n° 2013-08-F.
- Parlement et conseil européen, 2002. Directive 2002/49/CE du parlement européen et du conseil du 25 juin 2002 relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement.
- Paunović, K., Jakovljevic, B., Belojevic, G., 2008. The importance of non-acoustical factors on noise annoyance of urban residents, in: ICBEN.
- placo, 2022. La réglementation acoustique dans le neuf (NRA) [WWW Document]. URL <https://www.placo.fr/la-reglementation-acoustique-dans-le-neuf-nra#1> (accessed 4.14.25).
- Potel, C., Bruneau, M., 2006. *Acoustique Générale - équations différentielles et intégrales, solutions en milieux fluide et solide, applications*. collection Technosup.
- Prof SVT 71, 2021. Stress : L'organisme s'adapte [WWW Document]. URL <https://www.profsvt71.fr/pages/terminale-spe-svt/comportement-et-stress/stress-l-organisme-s-adapte.html> (accessed 4.15.25).
- Pueh Lee, H., Kumar, S., Garg, S., Meng Lim, K., 2022. Characteristics of aircraft flypast noise around Singapore Changi international airport. *Appl. Acoust.* 185, 108418. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108418>
- Pyko, A., Andersson, N., Eriksson, C., de Faire, U., Lind, T., Mitkovskaya, N., Ögren, M., Östenson, C.-G., Pedersen, N.L., Rizzuto, D., Wallas, A.K., Pershagen, G., 2019. Long-term transportation noise exposure and incidence of ischaemic heart disease and stroke: a cohort study. *Occup. Environ. Med.* 76, 201–207. <https://doi.org/10.1136/oemed-2018-105333>
- Ramseier, T., Schalcher, S., Wunderli, J.M., Schäffer, B., 2024. Impact of buildings, forests and cliffs on aircraft noise mapping: Case study. *Transp. Res. Part D* 133, 14.
- Rosin, C., Barbot, B., Défreville, B., 2010. Monitoring du bruit des avions : une détection à partir du signal audio. Presented at the 0ème Congrès Français d'Acoustique, Lyon (France).
- Rosin, C., Iachino, 2014. Monitoring du bruit des avions : comparaison des indicateurs de bruit des avions calculés avec deux méthodes de détection différentes. Presented at the Congrès Français d'Acoustique, Poitiers (France).

- Salmon, T.J.G., 2018. Représentations sociales et stress au travail : Une approche Psychosociale. Université d'Aix-Marseille.
- Schreckenber, D., Schuemer, R., 2010. The impact of acoustical, operational and non-auditory factors on short-term annoyance due to aircraft noise 3.
- Seidler, A., Hegewald, J., Seidler, A.L., Schubert, M., Wagner, M., Dröge, P., Haufe, E., Schmitt, J., Swart, E., Zeeb, H., 2017. Association between aircraft, road and railway traffic noise and depression in a large case-control study based on secondary data. *Environ. Res.* 152, 263–271. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.10.017>
- Selander, J., Nilsson, M.E., Bluhm, G., Rosenlund, M., Lindqvist, M., Nise, G., Pershagen, G., 2009. Long-Term Exposure to Road Traffic Noise and Myocardial Infarction. *Epidemiology* 20, 272–279. <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e31819463bd>
- van der Grift, R., Snellen, M., Simons, D., 2023. Validation of the Aircraft Noise and Performance Database Source Spectra. *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut. Inc* 12. <https://doi.org/10.2514/6.2023-3930>
- Van Gerven, P.W.M., Vos, H., Van Boxtel, M.P.J., Janssen, S.A., Miedema, H.M.E., 2009. Annoyance from environmental noise across the lifespan. *J. Acoust. Soc. Am.* 126, 187–194. <https://doi.org/10.1121/1.3147510>
- WHO, 2024. Disability weights for noise-related health states in the WHO European Region.
- WHO, 2018. Lignes directrices relatives au bruit dans l'environnement dans la Région européenne - Résumé d'orientation. World Health Organization.
- WHO, 2011. Burden of disease from environmental noise, World Health Organization. World Health Institution.
- WHO, 2000. Guidelines for Community Noise. World Health Organization.
- wikiwand, 2025. Turboréacteur, système de propulsion [WWW Document].
- Wu, J., Wu, T., 2012. SUSTAINABILITY INDICATORS AND INDICES: AN OVERVIEW, in: Handbook of Sustainability Management. WORLD SCIENTIFIC, pp. 65–86. https://doi.org/10.1142/9789814354820_0004
- Zaporozhets, O., Levchenko, L., 2021. Accuracy of Noise-Power-Distance Definition on Results of Single Aircraft Noise Event Calculation. *Aerospace* 8, 24.
- Zhao, S., 2010. Investigation of Non-contact Bearing Systems Based on Ultrasonic Levitation. Paderborn.
- Zurich airport, 2025. Noise reduction –construction of noise protection hangar [WWW Document]. URL <https://www.flughafen-zuerich.ch/en/company/flughafen-zuerich/airport-development/old-construction-projects/noise-reduction> (accessed 1.30.25).



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema
CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN