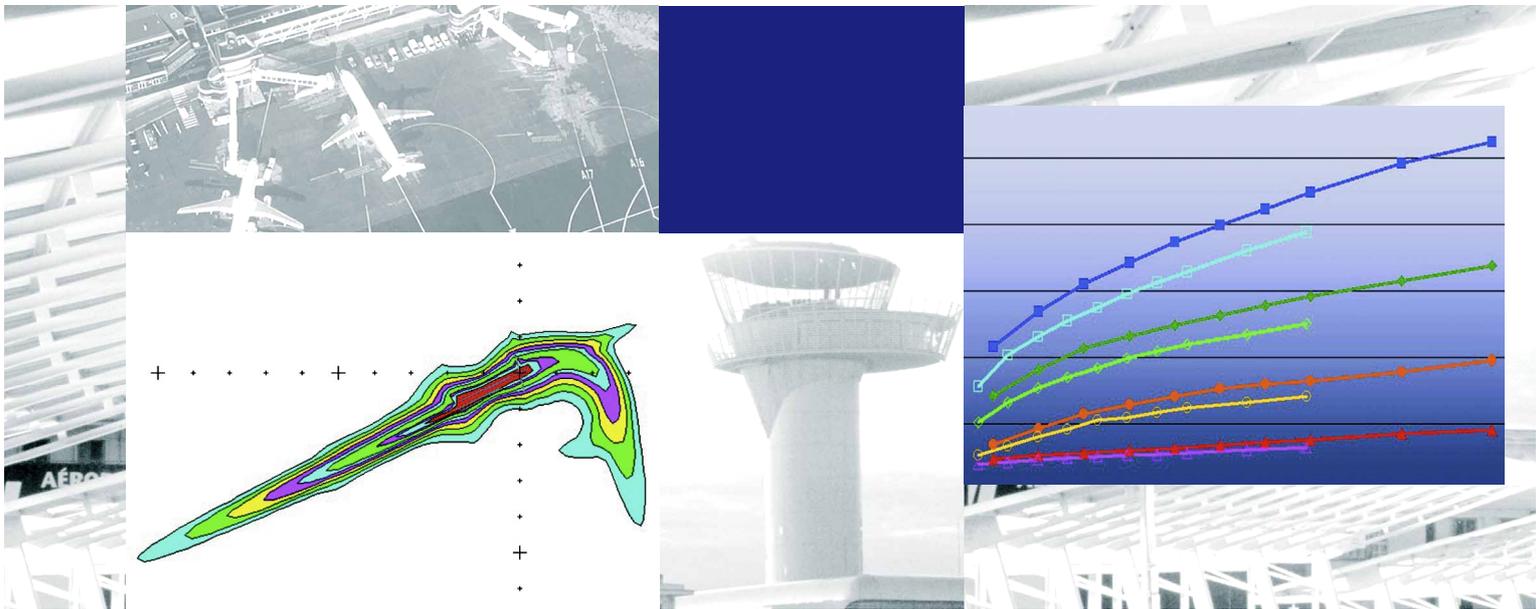




service
technique
des Bases
aériennes

IMPACT DES PARAMÈTRES DE TRAFIC SUR LA MODÉLISATION DES COURBES DE BRUIT EN LDEN



RAPPORT D'ÉTUDE

Juillet 2004

Avant-Propos

Les Plans d'Exposition au Bruit (PEB) établis dans le but de maîtriser l'urbanisation autour des aérodromes et les Plans de Gêne Sonore (PGS) qui ouvrent droit à une aide financière pour l'insonorisation des logements sont établis à partir de courbes isophoniques basées sur l'indice Lden. La construction de ces courbes repose sur plusieurs paramètres, au rang desquels les hypothèses de trafic tiennent une place particulière.

Au delà du nombre de mouvements, ces hypothèses portent sur la typologie de la flotte ainsi que sur la répartition du trafic sur la journée, selon les trajectoires et entre atterrissages et décollages. D'autres paramètres doivent aussi être pris en compte : la température, le relief, la dispersion sur une trajectoire donnée, la pente de l'ILS et la pente de montée.

Les choix effectués en la matière débouchent sur des courbes isophoniques qui ne sont pas sans conséquence pour les riverains des aéroports. L'objet de la présente étude est d'évaluer l'influence de chacun de ces paramètres sur les courbes considérées afin d'éclairer les débats entre les différents acteurs qui participent à l'élaboration des PEB et des PGS, en particulier au sein des Commissions consultatives de l'environnement. Savoir quelles sont les hypothèses les plus sensibles pour pouvoir se concentrer sur celles-ci lors de la définition d'un scénario, comprendre le comportement du modèle de bruit pour mieux anticiper les conséquences d'une modification du scénario, tels sont les objectifs de cette étude qui a été réalisée, à l'initiative de l'ACNUSA, par le Service technique des bases aériennes.

Les paramètres identifiés comme très sensibles sont globalement ceux liés aux hypothèses de trafic, les choix de modélisation et la prise en compte de l'aviation générale ont moins d'influence sur les courbes de bruit.

SOMMAIRE

Résumé pour l'ACNUSA	4
1 Introduction.....	11
1.1 Objet de l'étude	11
1.2 Guide de lecture	12
1.3 Terminologie.....	13
1.4 Glossaire	16
2 Méthodologie.....	17
2.1 Présentation des deux scénarios de référence	18
2.2 Paramètres testés	22
2.3 Méthode d'exploitation des résultats	25
3 Résultats	29
Les paramètres liés aux hypothèses de trafic	29
3.1 Nombre total de mouvements	29
3.2 Impact des atterrissages et des décollages	37
3.3 Types d'avions commerciaux	41
3.4 Répartition d'un avion (MD 83) sur les trajectoires.....	44
3.5 Répartition Jour/Soirée/Nuit	46
3.6 Aviation générale : impact faible et dilué dans le trafic commercial	50
Résultats (suite)	53
Les paramètres de la modélisation	53
3.7 Profils au décollage (Masses au décollage).....	53
3.8 Nouvelle version INM 6.1	57
3.9 Température	60
3.10 Pente de l'ILS	62
3.11 Relief	64
3.12 Dispersion	68
4 Conclusion.....	73
4.1 Synthèse des variations obtenues	73
4.2 Sensibilité des indicateurs.....	74
4.3 Sensibilité des zones.....	74
4.4 Sensibilité des paramètres	75
4.5 Limites de l'étude	80
Références	83
 ANNEXES (document séparé)	 65 pages

RESUME POUR L'ACNUSA

Objet de l'étude	Cette étude de sensibilité répond à une demande de l'ACNUSA. Elle porte sur un cas concret d'aéroport français de plus de 90.000 mouvements annuels. Ses résultats sont résumés ci-dessous. Son but est d'apporter des éléments de compréhension quant à l'influence des différents paramètres (trafic, relief, fonctionnalités du modèle) sur les courbes de bruit en Lden. Une centaine de simulations de bruit ont été effectuées à partir de deux scénarios de références : un scénario de type PGS et un scénario de type PEB. La surface, la longueur et la largeur des zones issues de chaque simulation ont été mesurées. Les variations de ces trois indicateurs ont été calculées, exploitées et interprétées.
Qu'est-ce que la sensibilité ?	La sensibilité d'un paramètre d'un modèle est la mesure de l'impact d'une variation de ce paramètre sur les résultats du modèle. Si un paramètre est très sensible, une petite variation de celui-ci aura des conséquences importantes sur les résultats.
Limites de l'étude	<ul style="list-style-type: none"> L'étude s'appuie sur un unique cas concret. Elle est théorique : elle porte sur le modèle de bruit INM et non pas sur des mesures de bruit in situ.
Les résultats de l'étude et des outils pour les appliquer	Les principaux résultats de l'étude (présentés ci-après) découlent soit d'une analyse (résultats n° ①, ②, ③ et ④), soit d'une approximation (n° ⑤ et ⑥), ou encore de formules mathématiques (n° ⑦ et ⑧). Afin de compléter les résultats ⑤, ⑥ et ⑧, des outils d'application sont fournis : A partir d'un scénario déjà simulé, un outil permet de calculer rapidement un ordre de grandeur de l'impact d'une modification sur ce scénario, sans avoir à relancer une simulation.
Scénario « simulé » ou « calculé » ?	Dans ce résumé, le terme « simulé » fait référence à l'utilisation du modèle INM et d'un ordinateur, par opposition au terme « calculé », où seule une calculatrice est nécessaire.



Résultat n° ①

Les ordres de grandeurs sur la sensibilité des paramètres

Paramètres très sensibles

Ce sont des paramètres liés aux hypothèses de trafic :

- Répartition des avions au décollage (notamment les plus bruyants) selon les différentes trajectoires
- Impact des atterrissages seuls, ou des décollages seuls
- Types d'avions commerciaux (passagers ou fret)
- Répartition Jour/Soirée/Nuit
- Nombre total de mouvements

Paramètres sensibles

Ce sont des paramètres de modélisation, sauf (*) :

- Profils (masses) des avions au décollage
- Prise en compte de l'aviation générale (*)
- Pente de l'ILS
- Température
- Version du modèle INM

Paramètres localement (très) sensibles

Ce sont des paramètres de modélisation :

- Relief (prise en compte, modification)
- Dispersion

↗	Résultat n° 2	Comportement général du modèle
		Le modèle INM est sensible, stable et cohérent : Il réagit à tout changement de paramètre de manière logique.
↗	Résultat n° 3	Une zone D très sensible (Lden 50)
		Bien que toutes les zones soient sensibles, la zone D est la plus sensible. La variation d'un paramètre aura donc plus d'impact sur les dimensions de la zone D que sur celles des zones A, B ou C.
↗	Résultat n° 4	Le bruit des décollages est prédominant sur celui des atterrissages pour la largeur (au niveau du seuil de piste) et pour la surface des zones.
		Avec une répartition équilibrée entre le nombre d'atterrissages et de décollages, on constate que le bruit dû aux décollages est responsable d'au moins 80 % de la largeur et 70 % de la surface des zones de bruit.
↗	Résultat n° 5	La surface des zones est proportionnelle au nombre total de mouvements (approximation)
↗	Résultat n° 6	La longueur et la largeur des zones sont proportionnelles à la racine carré du nombre total de mouvements (approximation)
↗	Résultat n° 7	Doubler le nombre de mouvements revient à décaler les indices Lden de + 3 dB(A)
		Lorsque l'on multiplie le trafic global par deux (toutes choses restant égales par ailleurs), les courbes sont décalées de + 3 dB(A) : La courbe Lden 62 dB(A) du scénario initial se superpose parfaitement avec la courbe 65 dB(A) du scénario avec un trafic doublé. Il en est de même pour chaque valeur d'indice. Ce résultat n'est pas une approximation mais une conséquence de la définition du Lden (décret n° 2002-626 du 26/04/2002) et des principes de calculs en acoustique.
↗	Résultat n° 8	1 avion de soirée = 3,16 avions de jour 1 avion de nuit = 10 avions de jour
		D'un point de vue acoustique, prendre en compte un trafic avec une répartition Jour/Soirée/Nuit pour le calcul du Lden revient à prendre en compte un trafic multiplié par 1 pour le jour, par 3,16 pour la soirée, et par 10 pour la nuit. Ce résultat n'est pas une approximation mais une conséquence de la définition du Lden (décret n° 2002-626 du 26/04/2002) et des principes de calculs en acoustique .

Outil n° 1		Estimer l'impact d'une modification du nombre total de mouvements sur la surface d'une zone en Lden		
Cet outil utilise le résultat n° 5	METHODE		Scénario 1 (Simulé)	Scénario 2 (Calculé)
		Nombre total de mouvements	N1	N2
		Surface	S1	S2 ? = S1 x (N2 / N1)
	LIMITES	- Approximation - Nécessité de simuler au moins un scénario		
	EXEMPLE	Un aéroport commercial a un trafic de 90.000 mouvements par an. La surface de la zone C est de 20 km ² . Toutes choses restant égales par ailleurs (notamment la répartition des mouvements entre les types d'avions), si le trafic est porté à 99.000 mouvements par an, la surface de la zone C sera approximativement de : $20 \times (99.000 / 90.000) = 22 \text{ km}^2$.		
Outil n° 2		Mettre en relation l'impact d'un paramètre quelconque à celui du nombre total de mouvements		
Cet outil utilise le résultat n° 5	OBJECTIF	Cet outil permet seulement de mettre en relation l'impact (sur la surface) d'une modification d'un paramètre quelconque avec l'impact d'une modification du nombre total de mouvements. Il n'a pas pour but d'éviter de relancer une simulation.		
	METHODE	En corollaire du résultat n° 5, toute variation de xx % de la surface d'une zone peut être obtenue en faisant varier le nombre total de mouvements de xx %.		
			Scénario 1 (Simulé)	Scénario 2 (Simulé)
		Etat du paramètre m	m1	m2
		Surface	S1	S2
		Nombre de mouvements	N	N
				Scénario 3 (Calculé)
				m1
				S2 (même impact)
				N3 ? = N x (S2 / S1)
	LIMITES	- Approximation - Même avec une surface identique, les zones n'ont pas nécessairement la même forme.		
	EXEMPLE	Un aéroport commercial a un trafic de 90.000 mouvements par an. La surface de la zone C est de 20 km ² . Un paramètre « m » est modifié. La surface de la zone C est alors de 22 km ² , ce qui représente <u>une augmentation de 10 % de la surface de la zone C.</u> En terme de surface des zones, l'impact de la modification de la valeur du paramètre « m » est donc comparable à celui <u>d'une augmentation de 10 % du nombre total de mouvements.</u>		



Outil n° 3

Estimer l'impact de la modification du nombre total de mouvements sur la longueur et la largeur d'une zone en Lden

Cet outil utilise le résultat n° 6

METHODE

	Scénario 1 (Simulé)	Scénario 2 (Calculé)
Nombre total de mouvements	N1	N2
Longueur	L1	L2 ? = L1 x (√ N2 / √ N1)
Largeur	ℓ1	ℓ2 ? = ℓ1 x (√ N2 / √ N1)

LIMITES

- Approximation
- Nécessité de simuler au moins un scénario

EXEMPLE

Un aéroport commercial a un trafic de 90.000 mouvements par an. La longueur de la zone C est de 16 km. Toutes choses restant égales par ailleurs, si le trafic est porté à 99.000 mouvements par an, la longueur de la zone C sera approximativement de :
 $16 \times (\sqrt{99.000} / \sqrt{90.000}) = 16,8 \text{ km}$



Outil n° 4

Scénarios équivalents avec des répartitions Jour/Soirée/Nuit différentes

Cet outil utilise le résultat n° 8

Définition

Deux scénarios sont équivalents si leurs zones de bruit en Lden sont identiques.

METHODE

En application du décret n° 2002-626 du 26/04/2002, on définit :

Mouvements pondérés équivalents :

$$N_{eq} = N_{\text{Jour}} + 3,16 \times N_{\text{Soirée}} + 10 \times N_{\text{Nuit}}$$

où N_T = Nombre de mouvements pour la période T considérée.

Deux scénarios ne diffèrent que par le nombre de mouvements par type d'avions et leurs répartitions Jour/Soirée/Nuit. Si ces scénarios ont le même nombre de mouvements pondérés équivalents pour chaque type d'avion, alors leurs zones de bruit en Lden sont identiques. Ils sont donc équivalents.

LIMITES

Cet outil n'est pas une approximation mais une application mathématique de la définition du Lden et des principes de calculs en acoustique.

EXEMPLE

		Scénario 1	Scénario 2
Nombre de mouvements	A320	2000	1692,4
	B737	1000	846,2
Répartition Jour/Soirée/Nuit		Jour : 75 % Soirée : 20 % Nuit : 5%	Jour : 75 % Soirée : 15 % Nuit : 10 %
N _{eq}	A320	3764	3764
	B737	1882	1882
Zones de bruit		Identiques (scénario équivalents)	

Les scénarios 1 et 2 sont équivalents car ils ont le même nombre de mouvements pondérés équivalents pour l'A320 et le B 737-500.

Scénario 1 :

$$N_{eq} (A320) = 2000 \times 0,75 + 3,16 \times 2000 \times 0,20 + 10 \times 2000 \times 0,05 = 3764$$

$$N_{eq} (B737) = 1000 \times 0,75 + 3,16 \times 1000 \times 0,20 + 10 \times 1000 \times 0,05 = 1882$$

Scénario 2 :

$$N_{eq} (A320) = 1692,4 \times 0,75 + 3,16 \times 1692,4 \times 0,15 + 10 \times 1692,4 \times 0,10 = 3764$$

$$N_{eq} (B737) = 846,2 \times 0,75 + 3,16 \times 846,2 \times 0,15 + 10 \times 846,2 \times 0,10 = 1882$$



Outil n° 5

Estimer l'impact d'une modification de la répartition Jour/Soirée/Nuit en utilisant les scénarios équivalents

Cet outil utilise l'outil n° 4 et 1.

OBJECTIF Ramener une modification de la répartition Jour/Soirée/Nuit à une modification du nombre total de mouvements.

Hypothèse Répartition Jour/Soirée/Nuit identique pour tous les types d'avions.

Notations Jour, Soirée, Nuit (Jour + Soirée + Nuit = 100%).
N : Trafic du type d'avion considéré.

Définition Coefficient multiplicateur de trafic (α)
 $\alpha = (\text{Jour}) \times 1 + (\text{Soirée} \times 3,16) + (\text{Nuit} \times 10)$

METHODE Pour le type d'avion considéré, on a : $N_{eq} = \alpha \times N$
[démontrée à la section 3.5.3] Pour estimer l'impact de la modification de répartition Jour/Soirée/Nuit, on peut définir un scénario 3, équivalent au scénario 2, et dont la seule différence avec le scénario 1 est que le trafic de chaque type d'avion (donc le trafic total) est multiplié par : $\alpha 2 / \alpha 1$. L'utilisation de l'outil 1 permet alors d'estimer l'impact de la modification.

	Scénario 1 (Simulé)	Scénario 2 (Ni simulé – Ni calculé)	Scénario 3 (Calculé : équivalent au scénario 2)
Trafic de l'avion	N	N	N3 = $(\alpha 2 / \alpha 1) \times N$
Répartition Jour/Soirée/Nuit de l'avion i	Jour (1) Soirée (1) Nuit (1)	Jour (2) Soirée (2) Nuit(2)	Jour (1) Soirée (1) Nuit (1)
α	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 1$
N_{eq} Avion i	$\alpha 1 \times N$	$\alpha 2 \times N$	$\alpha 1 \times N3$ = $\alpha 1 \times (\alpha 2 / \alpha 1) \times N$ = $\alpha 2 \times N$
Zones	-	Identiques	

LIMITES Cet outil n'est pas une approximation. Pour se ramener à une modification du nombre **total** de mouvements, il est nécessaire que la répartition Jour/Soirée/Nuit soit identique pour tous les types d'avions.

EXEMPLE Comparaison des scénarios suivants :

Scénario	1	2	3	4	5
Nombre de mouvements d'avions	50.000	50.000	64.825	75.000	30.000
Répartition Jour/Soirée/Nuit des avions	75 % 20 % 5%	65 % 25 % 10 %	75 % 20 % 5 %	75 % 20 % 5 %	60 % 20 % 20 %
Coefficient multiplicateur : α	1,882	2,44	1,882	1,882	3,232
Mouvements pondérés équivalents : Neq	94.100	122.000	122.000	141.150	96.960
Zones		Identiques			

Les scénarios 2 et 3 sont équivalents car ils ont le même nombre de mouvements pondérés équivalents. Leurs zones de bruit sont donc identiques.

Le scénario 3 est plus bruyant que le scénario 1 : augmentation du nombre total de mouvements de 30

par rapport à celles du scénario 1.

Le scénario 4 est plus bruyant que les scénarios 1, 2 et 3, car le trafic est augmenté de 50 % par rapport au scénario 1.

Le scénario 5, même avec un nombre total de mouvements inférieur de 20 % à celui du scénario 1, est légèrement plus bruyant : 3 % de mouvements pondérés équivalents en plus.



1 INTRODUCTION

1.1 OBJET DE L'ETUDE

Cette étude a été demandée par l'Autorité de contrôle des nuisances sonores aéroportuaires (ACNUSA), dans son courrier n°030090 du 12 février 2003. Son but est d'apporter des éléments de compréhension quant à l'influence des différents paramètres de trafic sur les courbes de bruit en Lden. L'ACNUSA indique notamment les paramètres suivants : « *méthodologie, fonctionnalités du logiciel utilisé, hypothèses à court, moyen et long terme, données avion/moteur, répartition des vols en jour/soirée/nuit, prise en compte du relief* ». L'étude doit montrer les variations des courbes de bruit eu égard aux différents paramètres de trafic. L'ACNUSA a demandé que cette étude porte sur un aéroport réel avec un trafic supérieur à 90.000 mouvements commerciaux par an, pour le plan d'exposition au bruit (PEB) et le plan de gêne sonore (PGS).

Afin de réviser l'ensemble des PEB et PGS, les services de l'aviation civile doivent définir et/ou valider les hypothèses servant de base à la modélisation des courbes de bruit. Pour chaque PEB/PGS, les hypothèses de trafic font l'objet de discussions aussi bien entre les services responsables de l'établissement de ces hypothèses qu'au sein des Commissions consultatives de l'environnement (CCE).

Connaître l'influence des données de trafic sur les courbes de bruit en Lden devrait permettre de mieux apprécier la précision avec laquelle il faut estimer ces données lors l'établissement d'un PEB ou d'un PGS. Cela doit aussi permettre de focaliser le débat sur les hypothèses les plus sensibles, c'est-à-dire celles pour lesquelles une légère variation peut avoir des conséquences importantes.

Cette étude se propose donc de tester la sensibilité de plusieurs paramètres de trafic (nombre de mouvements, types d'avions, répartition Jour/Soirée/Nuit, température, relief, ...) sur les zones de bruit en Lden (longueur, largeur et surface). L'étude s'appuie sur le modèle de bruit actuellement utilisé pour réaliser les PEB/PGS : INM (Integrated Noise Model).

1.2 GUIDE DE LECTURE

Ce rapport présente la méthodologie adoptée pour la réalisation de cette étude (notamment les cas de référence, les indicateurs et descripteurs choisis, et les paramètres testés). Il fait ensuite la synthèse des résultats obtenus. Les résultats des tests effectués sont présentés sous forme de graphiques en annexes.

1.3 Terminologie : Explique la notion de « *mouvements pondérés équivalents* », qui est utilisée dans les parties 3.2 (Atterrissages/Décollages) et 3.5 (Répartition Jour/Soirée/Nuit).

1.4 Glossaire : Explicite les sigles utilisés dans ce rapport.

2 Méthodologie : Décrit les deux scénarios de référence : PGS et PEB. Introduit les indicateurs « *longueur* », « *largeur* » et « *surface* », qui constitueront les résultats des simulations. Introduit aussi les descripteurs « *variation moyenne* » et « *variation maximale* », qui permettront d'exploiter et d'interpréter ces résultats.

3 Résultats : Présente les résultats obtenus, paramètre par paramètre.

4 Conclusion : Elle fait la synthèse des principaux résultats sur l'impact des paramètres testés.

Références : Les références, notées [xx], sont listées à la fin du rapport.

Annexes : C'est un document séparé. Il contient : la répartition détaillé du trafic du PGS et du PEB, la démonstration liée à la notion de mouvements pondérés équivalents, et les graphes représentant les résultats obtenus et auxquels se réfère le rapport, et enfin les tableaux avec les indicateurs (longueur, largeur surface) obtenus après le traitement des zones de bruit issues de chaque simulation.

1.3 TERMINOLOGIE

Abus de langages : Les abus de langages (tableau suivant) seront effectués par la suite :

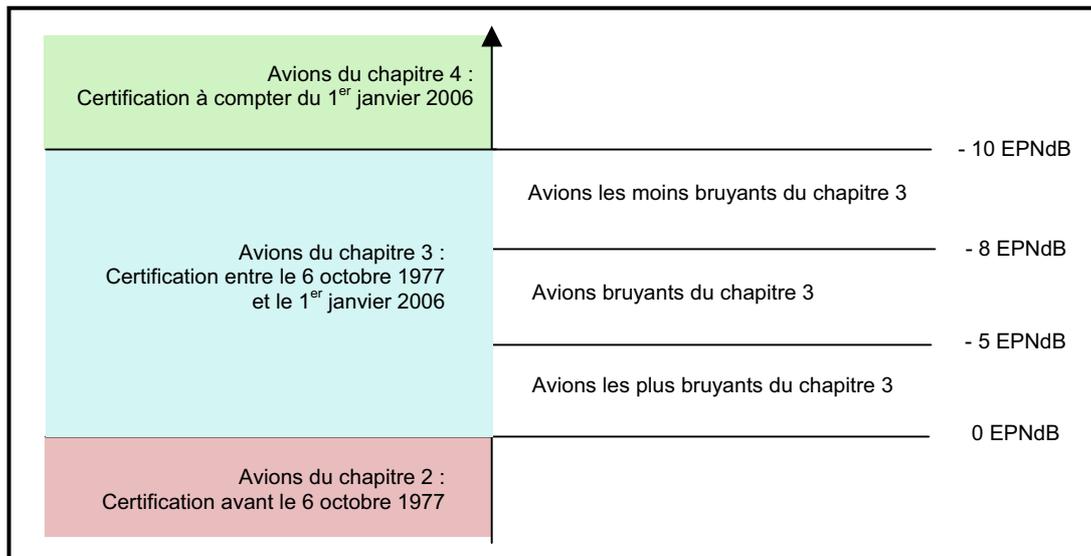
Abréviation par abus de langage	Signification dans l'étude	En quoi est-ce un abus de langage ?
Zone A	Zone définie par la courbe d'indice Lden 70	Pour les PGS, c'est en fait la zone I.
Zone B	Zone définie par la courbe d'indice Lden 62	Pour les PGS, c'est en fait la zone II. Pour les PEB, le choix de l'indice relève du préfet (entre 62 et 65).
Zone C	Zone définie par la courbe d'indice Lden 55	Pour les PGS, c'est en fait la zone III. Pour les PEB, le choix de l'indice relève du préfet (entre 57 et 55).
Zone D	Zone définie par la courbe d'indice Lden 50	Pour les PGS, il n'existe pas de 4 ^{ème} zone.
PGS	Scénario à court terme	Le PGS prend en compte les hypothèses de l'année suivant la publication de l'arrêté d'approbation du PGS par le préfet. Le PGS peut coïncider avec le scénario à court terme du PEB : c'est le cas dans cette étude. [1]
PEB	Scénario à long terme	Le PEB doit prendre en compte 3 horizons : court, moyen et long terme. Chaque zone du PEB est l'enveloppe des 3 zones de même indice Lden des scénarios court , moyen et long terme. [1]&[2]

Avions du Chapitre 3 : Ce sont les avions certifiés selon la norme acoustique du chapitre 3 du volume I de l'annexe 16 à la convention relative à l'aviation civile internationale (OACI) [3]. Cette norme est définie en fonction de trois mesures acoustiques certifiées (décollage, latéral, approche), mais aussi en fonction de la masse de l'avion, du nombre de moteurs, et du type de moteur (turbopropulseur, turboréacteur).

Avions les plus bruyants du chapitre 3 : Ce sont des avions dont la marge avec la norme du chapitre 3 est comprise en 0 et 5 EPNdB [4].

Avions bruyants du chapitre 3 : Ce sont des avions dont la marge avec la norme du chapitre 3 est comprise en 5 et 8 EPNdB [4].

Avions les moins bruyants du chapitre 3 : Ce sont des avions dont la marge avec la norme du chapitre 3 est supérieure à 8 EPNdB.



Classification acoustique

Mouvement : Un mouvement est égal à un atterrissage ou un décollage.

Mouvements pondérés équivalents : C'est la somme pondérée des mouvements de jour, soirée et nuit. Les coefficients de pondération sont respectivement de 1 pour le jour, 3,16 pour la soirée et 10 pour la nuit. Ces coefficients découlent de l'application du décret n° 2002-626 du 26 avril 2002 [1] fixant le Lden comme indice d'exposition au bruit pour les PEB et PGS. Le Lden prend en compte une pénalisation de 5 dB(A) en soirée et de 10 dB(A) la nuit.

Prenons l'exemple d'un A-320 empruntant une trajectoire identifiée par « APP-ILS-34L ». Cet avion est modélisé avec un trafic de : 30 mouvements pour le jour, 7 pour la soirée, et 2 pour la nuit. On dira que le trafic de cet A-320 est de 72,12 *mouvements pondérés équivalents* sur la trajectoire « APP-ILS-34L » ($1 \times 30 + 3,16 \times 7 + 10 \times 2 = 72,12$).

Du point de vue acoustique, la prise en compte de la pénalisation de 5 dB(A) en soirée et de 10 dB(A) la nuit pour le calcul de l'indice d'exposition au bruit en Lden revient à calculer le Leq de l'ensemble de la journée (Leq, 24h), en multipliant les mouvements de soirée par 3,16 et les mouvements de nuit par 10. ⁽¹⁾

En terme d'exposition au bruit en Lden, il faut donc retenir que :

1 avion de soirée = 3,16 avions de jour

1 avion de nuit = 10 avions de jour

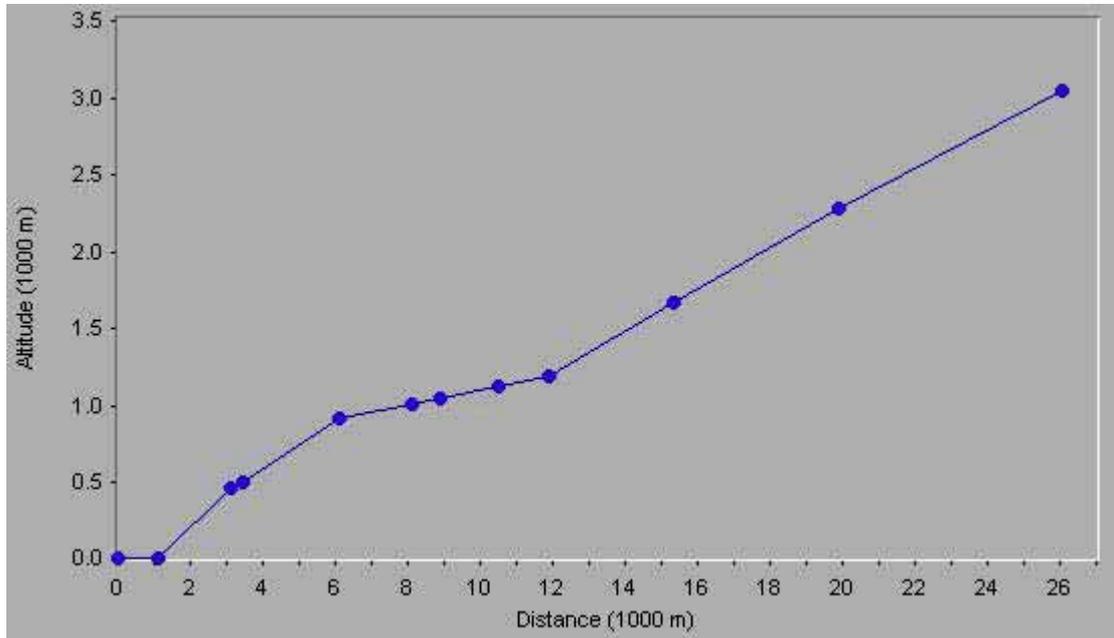
En corollaire, pour un avion, une trajectoire donnée, et un trafic « T » réparti sur les périodes jour/soirée/nuit, il existe une infinité de trafics répartis sur les périodes de jour/soirée/nuit, qui impliquent la même exposition au bruit en Lden que le trafic « T ». Ce sont l'ensemble des trafics qui ont le même nombre de *mouvements pondérés équivalents* que « T ».

Par exemple, pour un avion et une trajectoire donnée, un trafic de 20 mouvements de jour, 2 mouvements de soirée et 2 mouvements de nuit implique la même exposition au bruit en Lden qu'un trafic de 30 (i.e. $20 + 1 \times 10$) mouvements de jour, 2 mouvements de soirée et 1 mouvement de nuit : on a reporté 1 mouvement de nuit en 10 mouvements de jour.

¹ La démonstration figure en Annexes p. 7 à 10.

Profil : Dans cette étude, le mot profil désignera le profil de hauteur-sol d'un avion. Ce type de profil définit la trajectoire de l'avion dans le plan vertical en donnant la hauteur de l'avion en fonction de la distance-sol parcourue.

Exemple de profil d'un Airbus A-320 :



1.4 GLOSSAIRE

ACNUSA : Autorité de contrôle des nuisances sonores aéroportuaires.

ARP : Airport reference point. Point de référence de l'aéroport, dont les coordonnées et l'altitude sont connues.

CCE : Commission consultative de l'environnement.

CEAC : Conférence européenne de l'aviation civile.

dB(A) : Décibel pondéré A.

DGAC : Direction générale de l'aviation civile

EPNdB : Effective Perceived Noise decibel – Unité de certification acoustique des aéronefs.

FAA : Federal aviation administration

IGN : Institut géographique national

ILS : Instrument landing system.

INM : Integrated noise model.

ISA : International standard atmosphere

MTOW : Maximum take off weight. Masse maximale au décollage.

NM : Nautical mile (1 NM = 1,852 km)

OACI : Organisation de l'aviation civile internationale.

PEB : Plan d'exposition au bruit.

PGS : Plan de gêne sonore.

QFU : Code aéronautique donnant l'orientation magnétique de la piste en service en dizaine de degrés.

SBA : Service des bases aériennes

STBA : Service technique des bases aériennes.

STNA : Service technique de la navigation aérienne.

2 METHODOLOGIE

L'étude s'appuie sur un exemple concret : celui de l'aéroport de Bâle-Mulhouse. L'infrastructure, les données de trafic et les trajectoires sont inspirées de celles de l'Avant-Projet de PEB à l'étude en 2003. Cependant, il existe d'importantes différences avec les projets locaux à l'étude : les types d'avions ont été choisis différemment, les données de trafic ont été simplifiées, notamment en ce qui concerne les pourcentages Jour/Soirée/Nuit. Il ne s'agit donc pas ici d'une étude sur l' (AP)PEB de Bâle-Mulhouse, mais bien d'une étude théorique sur la sensibilité des paramètres du modèle sur la base des caractéristiques physiques (infrastructures, trajectoires) de cet aéroport.

Logiciel de bruit utilisé : INM 6.0c développé par la FAA, [5] & [6].

Température : 15°C

Humidité relative : 70%

Indice : Lden [1]

Une nouvelle version du logiciel de bruit (INM 6.1) a été diffusée par la FAA à partir du 4 Mars 2003. L'étude a été réalisée en utilisant INM 6.0c. Le passage d'INM 6.0c à INM 6.1 a été testé.

L'indice Lden est calculé à partir du trafic d'une journée caractéristique [2]. Elle est choisie dans cette étude comme étant la journée moyenne annuelle (trafic annuel divisé par 365 jours).

Deux horizons sont envisagés : un scénario à court terme et un scénario à long terme. Les tests ont été effectués pour chacun de ces horizons. L'infrastructure, le trafic, la flotte sont différents entre ces deux scénarios. Les différences entre ces deux scénarios correspondent à une évolution possible de l'exploitation de l'aéroport.

Ces deux scénarios seront considérés comme des scénarios de référence. L'influence des paramètres sera testé sur chacun d'entre eux.

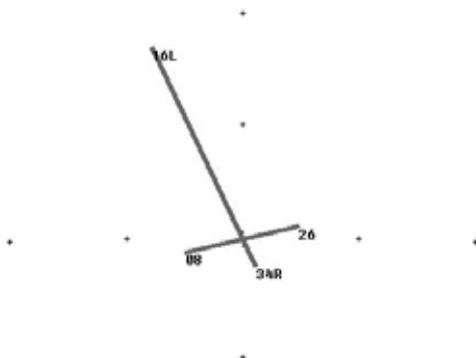
Par mesure de simplification, on assimilera le scénario court terme à un PGS et le scénario long terme à un PEB. Cependant, un PEB doit être représenté par l'enveloppe de trois horizons : court, moyen et long terme (1.3).

Le scénario PGS (respectivement PEB) sera appelé « scénario de référence PGS » (respectivement PEB). Les scénarios dont un paramètre aura été modifié seront appelés « scénarios dérivés du PGS » (respectivement PEB). L'étude consistera à faire varier un paramètre du scénario de référence, puis à comparer le scénario dérivé avec le scénario de référence, pour en déduire l'impact de ce paramètre.

2.1 PRESENTATION DES DEUX SCENARIOS DE REFERENCE

2.1.1 SCENARIO A COURT TERME (PGS)

Infrastructure : Deux pistes croisées orientées 16-34 (3900m) et 08-26 (1900m).



Trafic : 112000 mouvements annuels.

Flotte : 14 avions, tous de chapitre 3, dont deux avec une marge de moins de 5 dB. Il s'agit du Boeing B727-200, motorisé JT8D-15 huskité et du McDonnell Douglas MD-83, motorisé JT8D-219. Les avions choisis correspondent aux avions les plus fréquemment rencontrés sur la plate-forme en 2001.

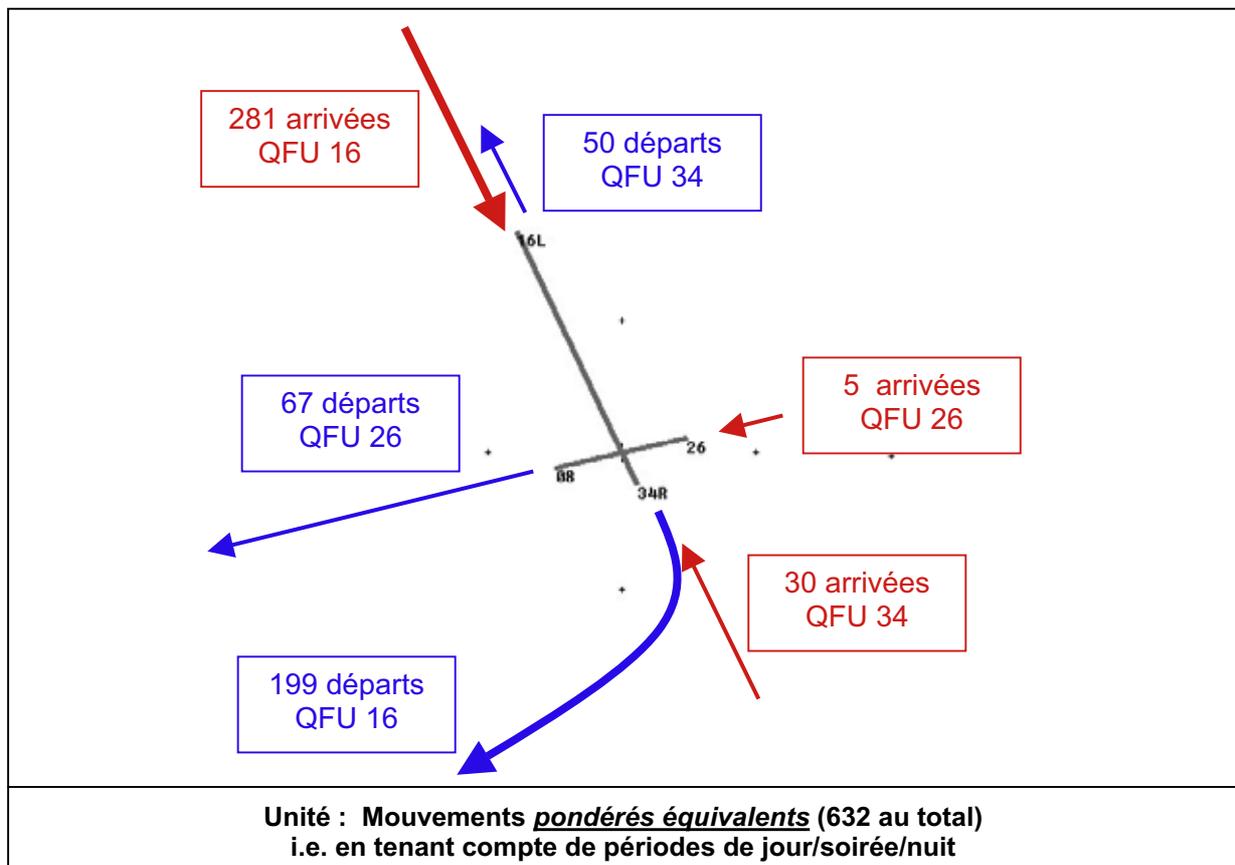
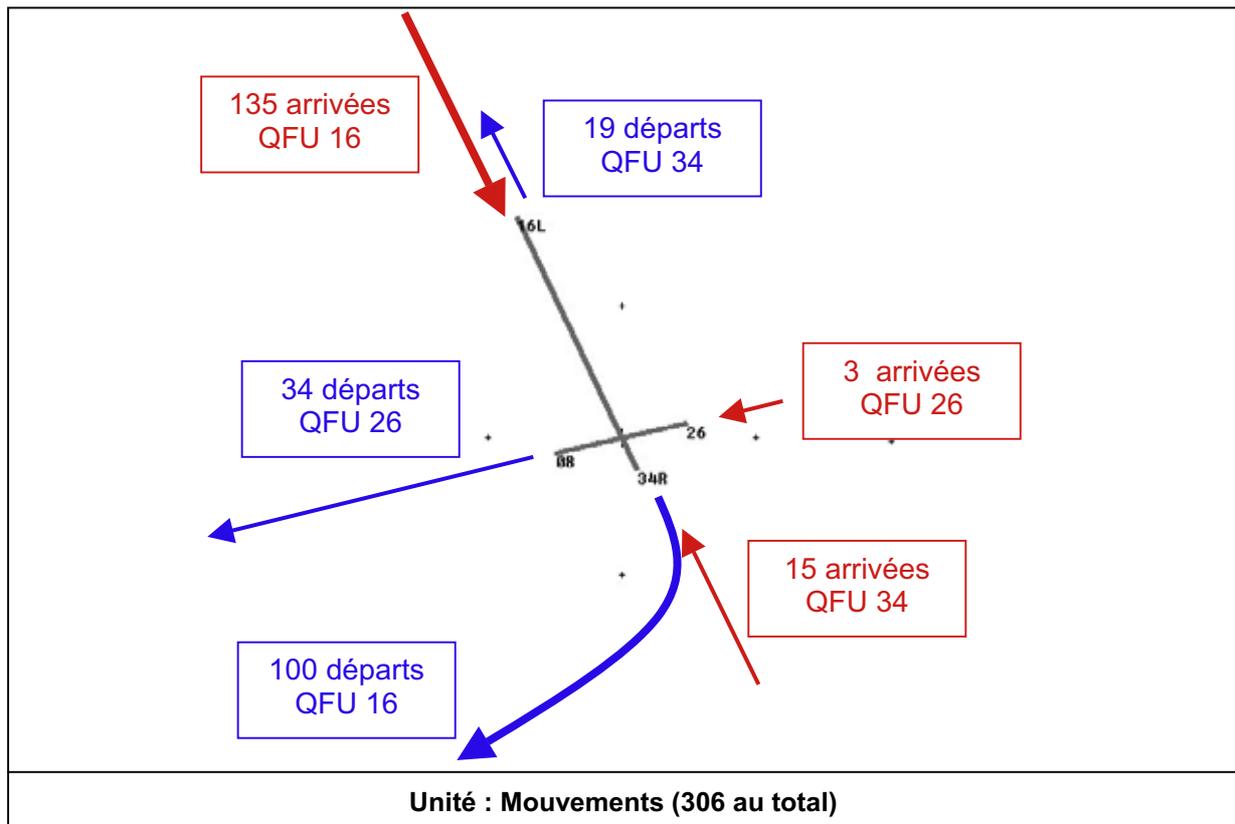
Trajectoires : 30 trajectoires modélisées.

Répartition Jour/Soirée/Nuit :

Type d'aviation	Type d'appareil	Mouvements annuels	Pourcentage Jour (6h-18h)	Pourcentage Soirée (18h-22h)	Pourcentage Nuit (22h-6h)
Passagers	B 737-500	5000	70 %	25 %	5 %
	A 320	5000	70 %	25 %	5 %
	MD 83	4000	70 %	25 %	5 %
	EMB 145	26000	70 %	25 %	5 %
	DHC 830	32800	70 %	25 %	5 %
	BAE 146	4300	70 %	25 %	5 %
Fret	EMB 120	8000	70 %	25 %	5 %
	B 727-200	200	30 %	10 %	60 %
	B 757-200	1300	30 %	10 %	60 %
	B 747-400	700	30 %	10 %	60 %
Affaires	A 310	1700	30 %	10 %	60 %
	Cessna 550	2500	70 %	25 %	5 %
Générale	Baron 58P	2500	70 %	25 %	5 %
	Motomoteurs	18000	80 %	20 %	0 %
Total		112.000			

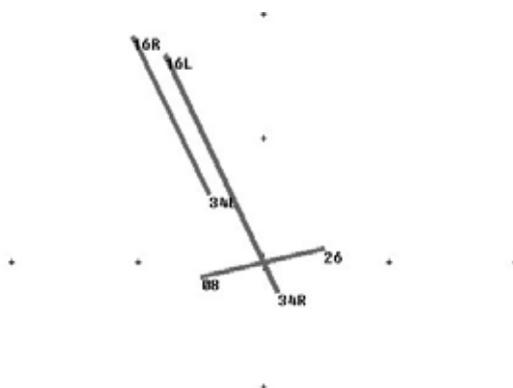
Répartition par trajectoires : Voir Tableau n° 1 en annexes.

Répartition du trafic du PGS par flux sur la journée caractéristique



2.1.2 SCENARIO A LONG TERME (PEB)

Infrastructure : Deux pistes croisées orientées 16L-34R (3900m) et 08-26 (1900m), ainsi qu'une nouvelle piste orientée 16R-34L (2600m), parallèle à la première.



Trafic : 170000 mouvements annuels.

Flotte : 12 avions, tous de Chapitre 3, avec une marge de plus de 8 dB. Les avions choisis correspondent à une évolution prévisible de la flotte actuelle. Les avions les plus bruyants du chapitre 3 (MD-83, B727-200 huskité) auront été remplacés à terme (ici par des B757-200).

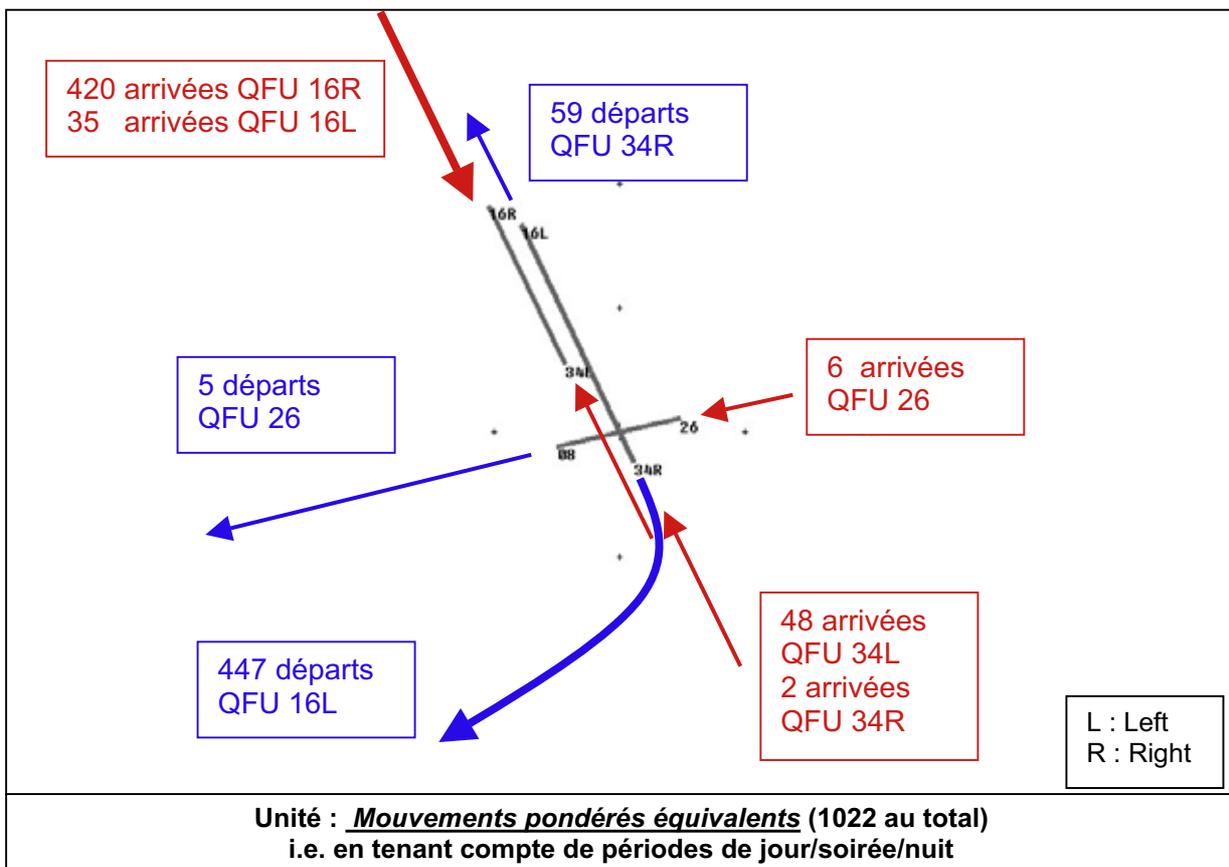
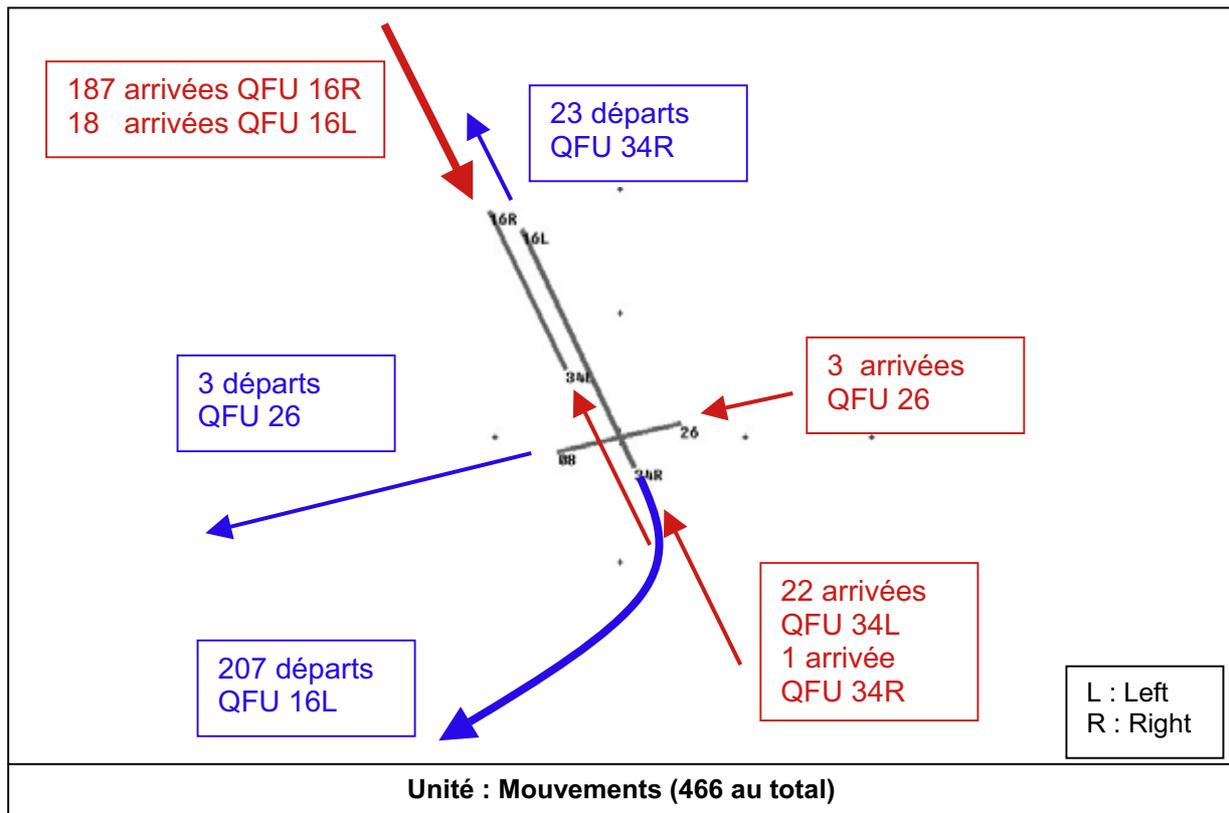
Trajectoires : 29 trajectoires modélisées, c'est-à-dire une de moins que dans le PGS. En effet, deux trajectoires d'arrivées sont créées sur la nouvelle piste 16R-34L, mais trois trajectoires du scénario PGS ne sont plus utilisées (deux départs vers le sud en 26 et une arrivée en 34R).

Répartition par périodes Jour/Soirée/Nuit :

Type d'aviation	Type d'appareil	Mouvements annuels	Pourcentage Jour (6h-18h)	Pourcentage Soirée (18h-22h)	Pourcentage Nuit (22h-6h)
Passagers	B 737-500	12000	70 %	25 %	5 %
	A 320	12000	70 %	25 %	5 %
	B 757-200	5900	70 %	25 %	5 %
	EMB 145	61000	70 %	25 %	5 %
	DHC 830	43000	70 %	25 %	5 %
	BAE 146	6400	70 %	25 %	5 %
	EMB 120	5200	70 %	25 %	5 %
Fret	B 757-200	4000	30 %	10 %	60 %
	B 747-400	2300	30 %	10 %	60 %
	B 767-300	2200	30 %	10 %	60 %
Affaires	Cessna 550	4000	70 %	25 %	5 %
	Baron 58P	4000	70 %	25 %	5 %
Générale	Monomoteurs	8000	80 %	20 %	0 %
Total		170.000			

Répartition par trajectoires : Voir Tableau n° 2 en annexes.

Répartition du trafic du PEB par flux sur la journée caractéristique



2.2 PARAMETRES TESTES

Deux types de paramètres ont été testés : les paramètres liés aux hypothèses de trafic, et les paramètres de modélisation liés aux fonctionnalités du logiciel. Les paramètres testés sont :

Paramètres liés aux hypothèses de trafic retenues :

- Nombre total de mouvements
- Atterrissages/Décollages (impact des atterrissages, impact des décollages)
- Types d'avions commerciaux
- Répartition du trafic d'un avion sur les trajectoires
- Répartition Jour/Soir/Nuit
- Aviation générale (Prise en compte ou non)

Paramètres de la modélisation :

- Profils des avions au décollage (masses des avions au décollage)
- Version du modèle : INM 6.1
- Température
- Pente de l'ILS
- Relief (Prise en compte, modifications)
- Dispersion

Chacun de ces 12 paramètres a été testé de manière indépendante, c'est-à-dire en conservant tous les autres paramètres à la même valeur que pour le scénario de référence. Ainsi, sauf indication contraire, chaque paramètre a été testé, toutes choses restant égales par ailleurs.

Au total, 105 simulations ont été réalisées. Le tableau suivant présente la liste des simulations effectuées. La valeur du paramètre dans les scénarios de référence du PGS et du PEB est rappelée à plusieurs reprises (**en gras**), mais correspond à une unique simulation pour le PGS et une unique simulation pour le PEB :

Liste des simulations effectuées

Paramètre testé	Horizon	Valeur du paramètre	Variation du paramètre
Nombre total de mouvements annuels	PGS	28.000	- 75 %
		56.000	- 50 %
		84.000	- 25 %
		100.800	- 10 %
		106.400	- 5 %
		112.000	Référence PGS
		117.600	+ 5 %
		123.200	+ 10 %
		140.000	+ 25 %
		168.000	+ 50 %
		196.000	+ 75 %
		224.000	+100 %
		280.000	+ 150 %
		336.000	+ 200 %
	PEB	42.500	- 75 %
		85.000	- 50 %
		127.500	- 25 %
		153.000	- 10 %

		161.500	- 5 %
		170.000	Référence PEB
		178.500	+ 5 %
		187.000	+ 10 %
		212.500	+ 25 %
		255.000	+ 50 %
		297.500	+ 75 %
		340.000	+100 %
		425.000	+ 150 %
		510.000	+ 200 %
Impact des décollages et des atterrissages	PGS	-	PGS sans décollages
		-	PGS sans atterrissages
		-	Echanges Arrivées-Départs
	PEB	-	PEB sans décollages
		-	PEB sans atterrissages
		-	Echanges Arrivées-Départs
Types d'avions commerciaux	PGS	B747-400 remplacé par l'A340	<i>Voir 3.3 pour plus de détails</i>
		DHC830 remplacé par l'EMB145	
		B727-200 huskité remplacé par un B727-200 non-huskité	
		MD-83 remplacé par un A-320	
	PEB	B747-400 remplacé par l'A340	
		DHC830 remplacé par l'EMB145	
Répartition d'un avion sur les trajectoires	PGS	-	Décollages du MD-83 basculés du QFU 26 aux QFUs 16-34
Pourcentage Jour/Soirée/Nuit des vols commerciaux (passagers)	PGS	J:70% S:25% N:5%	Référence PGS
		J:70% S:30% N:0%	
		J:70% S:20% N:10%	
		J:80% S:15% N:5%	
		J:60% S:35% N:5%	
	PEB	J:70% S:25% N:5%	Référence PEB
		J:70% S:30% N:0%	
		J:70% S:20% N:10%	
		J:80% S:15% N:5%	
		J:60% S:35% N:5%	
Pourcentage Jour/Soirée/Nuit des vols commerciaux (fret)	PGS	J:30% S:10% N:60%	Référence PGS
		J:30% S:15% N:55%	
		J: 30% S: 5% N:65%	
	PEB	J:30% S:10% N:60%	Référence PEB
		J:30% S:15% N:55%	
		J: 30% S: 5% N:65%	
Aviation générale	PGS	94.000	Sans aviation générale
		18.000	Aviation générale uniquement
	PEB	162.000	Sans aviation générale
		8.000	Aviation générale uniquement
Profils au décollage	PGS	Profils minima (masses minimales)	-
		Profils 85% MTOW	Référence PGS
		Profils maxima (masses maximales)	-
	PEB	Profils minima (masses minimales)	-
		Profils 85% MTOW	Référence PEB
		Profils maxima (masses maximales)	-
Dernière version INM 6.1	PGS	-	Scénario PGS avec INM 6.1
		-	Scénario PGS sans A310 ni DHC830 avec INM6.0c
		-	Scénario PGS sans A310 ni DHC830 avec INM6.1
	PEB	-	Scénario PEB avec INM 6.1
		-	Scénario PEB sans DHC830 avec INM6.0c

		-	Scénario PEB sans DHC830 avec INM6.1	
Température	PGS	T = 5 °C		
		T = 10 °C		
		T = 15°C	Référence	
		T = 20 °C		
		T = 25 °C		
	PEB	T = 5 °C		
		T = 10 °C		
		T = 15°C	Référence	
		T = 20 °C		
		T = 25 °C		
Pente de l'ILS	PGS	3°	Référence PGS	
		3°5	-	
		4°	-	
	PEB	3°	Référence PEB	
		3°5	-	
		4°	-	
Relief (Prise en compte)	PGS	Sans relief	Référence PGS	
		Avec relief		
	PEB	Sans relief	Référence PEB	
		Avec relief		
Relief (Modifications)	PGS	Avec relief	Nouvelle référence PGS	
		+ 25 m		
		+ 50 m		
		+ 100 m		
		+ 150 m		
		+ 200 m		
		- 25 m		
		- 50 m		
		-100 m		
		-150 m		
		-200 m		
		PEB	Avec relief	Nouvelle référence PEB
			+ 25 m	
	+ 50 m			
	+ 100 m			
	+ 150 m			
	+ 200 m			
	- 25 m			
	- 50 m			
	-100 m			
-150 m				
-200 m				
Dispersion	PGS	Aucune dispersion	Référence	
		Dispersion faible	1 ° pour les arrivées ² 5 ° pour les départs	
		Dispersion forte	3° pour les arrivées 10° pour les départ	
	PEB	Aucune dispersion	Référence	
		Dispersion faible	1 ° pour les arrivées 5 ° pour les départs	
	Dispersion forte	3° pour les arrivées 10° pour les départ		

Liste des simulations effectuées

² Demi-angle du faisceau, ce-dernier étant centré sur la trajectoire nominale

2.3 METHODE D'EXPLOITATION DES RESULTATS

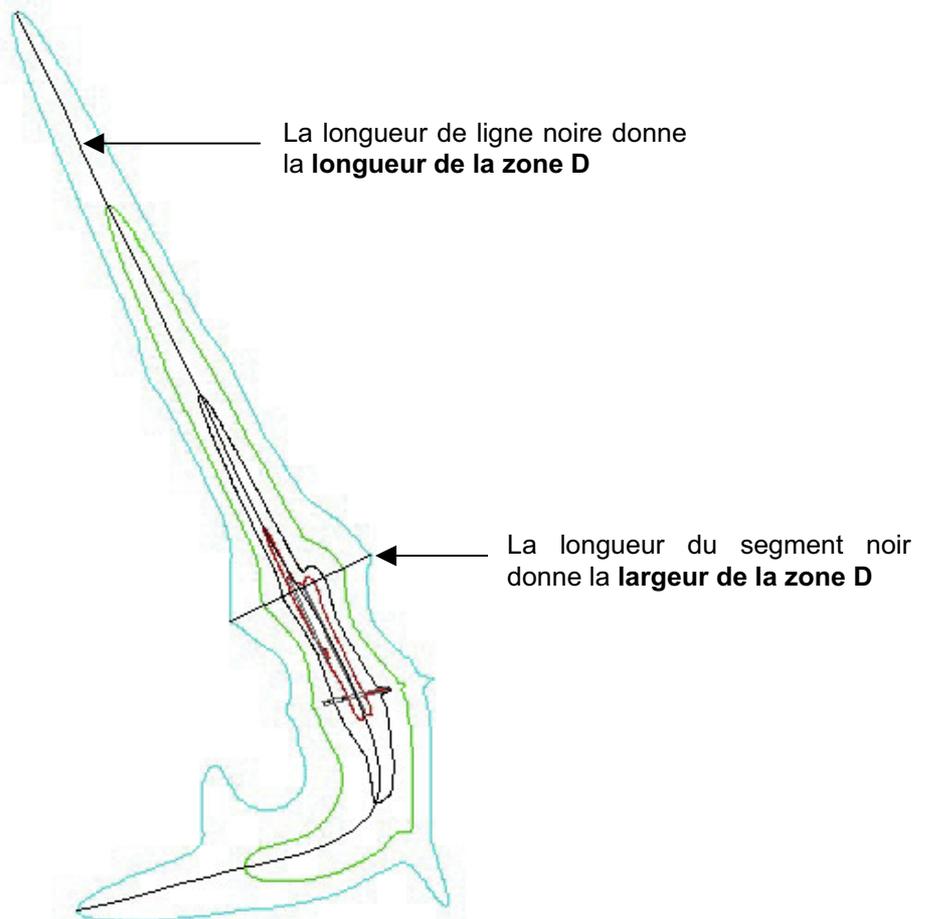
2.3.1 DEFINITION DES INDICATEURS UTILISES

La surface d'une zone de bruit est l'indicateur le plus couramment utilisé pour décrire l'étendue de cette zone. Cependant cet indicateur ne suffit pas à traduire l'étalement longitudinal et l'étalement latéral des zones. Or l'impact d'un paramètre peut être différent sur la longueur, la largeur ou la surface des zones de bruit. C'est pourquoi, pour chacune des zones A, B, C et D d'un scénario, les trois indicateurs suivants seront estimés :

Longueur : La longueur d'une zone donnée est définie par la longueur d'une partie de la courbe lissée joignant les extrémités de toutes les zones (A, B, C et D), cette partie étant limitée à l'intérieur de la zone considérée. Sa valeur n'est pas donnée par le logiciel INM et est estimée sous Autocad. L'unité est le km.

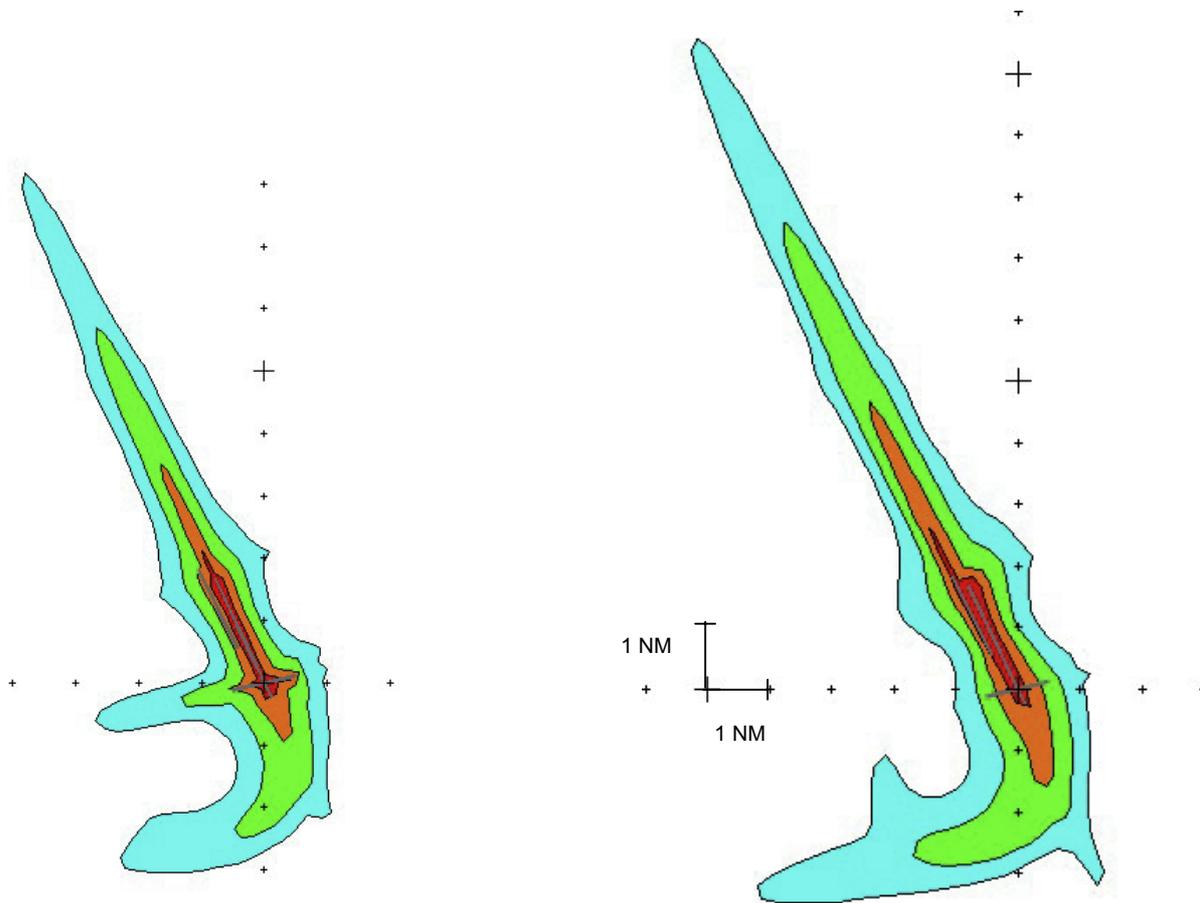
Largeur : La largeur d'une zone donnée est définie par la largeur du segment transversal au seuil 16 L et compris dans cette zone. Sa valeur n'est pas donnée par le logiciel INM et est estimée sous Autocad. L'unité est le km.

Surface : Aire de la zone (sans exclure l'aire des zones incluses). Sa valeur est indiquée par le logiciel INM. L'unité est le km².



Scénario	Zone	Longueur (km)	Largeur (km)	Surface (km ²)
PGS (112.000 mvts)	A (Lden 70)	4,848	0,417	1,609
	B (Lden 62)	9,521	0,928	6,003
	C (Lden 55)	17,007	1,844	21,356
	D (Lden 50)	25,568	3,550	52,079
PEB (170.000 mvts)	A (Lden 70)	6,030	0,744	2,611
	B (Lden 62)	12,868	1,303	10,028
	C (Lden 55)	23,166	2,476	34,126
	D (Lden 50)	34,202	4,393	79,608

Valeur des indicateurs pour les scénarios de référence



Zones du PGS

Zones du PEB

Légende :

- Zone A : Lden 70 (rouge)
- Zone B : Lden 62 (orange)
- Zone C : Lden 55 (vert)
- Zone D : Lden 50 (bleu)

2.3.2 VARIATION MAXIMALE – VARIATION MOYENNE

Afin de mesurer l'impact de chaque paramètre, et de pouvoir comparer simplement cet impact avec celui d'autres paramètres, deux descripteurs agrégés ont été définis :

- **Variation moyenne** : Pour un paramètre et un indicateur fixé, c'est la moyenne des variations obtenues (pour toutes les zones et pour tous les scénarios dérivés avec ce paramètre, PGS et PEB confondus). La variation d'un indicateur est elle-même définie par le rapport entre la valeur absolue de la variation de cet indicateur, et la valeur de cet indicateur pour le cas de référence. Elle est toujours positive et exprimée en pourcentage.
- **Variation maximale** : Pour un paramètre et un indicateur fixé, c'est la variation maximale (pour toutes les zones et pour tous les scénarios dérivés avec ce paramètre, PGS et PEB confondus), en valeur absolue. Elle est toujours positive et exprimée en pourcentage.

Un exemple de calcul de variation moyenne et maximale est présenté en page suivante.

Deux raisons expliquent ce choix :

- Le calcul d'une élasticité est impossible dans la plupart des cas testés. En effet, une élasticité est le rapport d'une variation d'un indicateur sur une variation d'un paramètre quantifiable. Or, dans la plupart des simulations effectuées, le paramètre modifié n'est pas quantifiable (sauf pour le nombre de mouvements, la pente de l'ILS et la température). Il faut donc se ramener à une comparaison des indicateurs par rapport au cas de référence (i.e. variation des indicateurs)
- Au total, 105 simulations ont été effectuées (en incluant les 2 cas de référence). Pour chacune de ces simulations et pour chaque zone A, B, C et D, les valeurs des indicateurs longueur, largeur et surface ont été estimées. Cela fait 12 indicateurs par simulation, et par conséquent 12 variations calculées par simulation. Au total, cela fait 1260 variations à analyser (105 x 12). D'où la nécessité d'utiliser les notions de variations moyennes ou maximales.

Le tableau suivant sera complété pour chacun des paramètres testés. Ces informations traduiront l'impact global du paramètre sur la surface, longueur et largeur des courbes.

Indicateur	Variation maximale	Variation moyenne
Longueur	.. %	.. %
Largeur	.. %	.. %
Surface	.. %	.. %

Exemple de calcul de variation :

Paramètre : Nombre total de mouvements

Tableau des indicateurs obtenus :

Scénario	Zone	Longueur (km)	Largeur (km)	Surface (km ²)
PGS (112.000 mvts) (Référence)	A (Lden 70)	4,848	0,417	1,609
	B (Lden 62)	9,521	0,928	6,003
	C (Lden 55)	17,007	1,844	21,356
	D (Lden 50)	25,568	3,550	52,079
PGS (+ 50 %) (168.000 mvts)	A (Lden 70)	5,248	0,495	2,092
	B (Lden 62)	10,961	1,095	8,438
	C (Lden 55)	19,886	2,291	29,295
	D (Lden 50)	29,546	4,563	73,506

Variation de l'indicateur longueur :

Pour la zone A, elle est égale à : $(5,248-4,848)/4,848 = 8,3\%$

Pour la zone B, elle est égale à : $(10,961-9,521)/9,521 = 15,1\%$

Pour la zone C, elle est égale à : $(19,886-17,007)/17,007 = 16,9\%$

Pour la zone D, elle est égale à : $(29,546-25,568)/25,568 = 15,6\%$

Variation moyenne de l'indicateur longueur :

Elle est égale à : $(8,3+15,1+16,9+15,6)/4 = 14 \%$

Variation maximale de l'indicateur longueur :

Elle est égale à 16,9 %

Remarque : Pour simplifier l'exemple, seul un scénario dérivé du PGS a été pris en compte.

3 RESULTATS

LES PARAMETRES LIES AUX HYPOTHESES DE TRAFIC

3.1 NOMBRE TOTAL DE MOUVEMENTS

Paramètres	Valeur
Nombre total de mouvements annuels	A l'étude
Atterrissages / Décollages	50 % / 50 %
Types d'avions commerciaux	Notamment : B747-400, DHC830, B727-200Huskit
Répartition d'un avion selon les trajectoires	Cf. Annexes p. 4-5
Répartition Jour/Soirée/Nuit	Passagers : Jour : 70%, Soirée : 25%, Nuit : 5% Fret : Jour : 30%, Soirée : 10%, Nuit : 60%
Prise en compte de l'aviation générale	Oui
Profils au décollage	85 % MTOW
Version du modèle INM	6.0c
Température	15 °C
Pente de l'ILS	3 °
Prise en compte du relief	Non
Modification du relief	Non
Dispersion des trajectoires	Non

Pour le scénario de type PGS, des simulations comportant de 28.000 mouvements annuels (77 mouvements/jour) à 336.000 mouvements annuels (921 mouvements/jour) ont été effectuées. Pour le scénario de type PEB, des simulations comportant de 42.500 mouvements annuels (116 mouvements/jour) à 510.000 mouvements annuels (1397mouvements/jour) ont été effectuées. Ces scénarios correspondent à une variation du nombre total de mouvements de -75 % à + 200 % par rapport au cas de référence.

Le Lden est un indice d'exposition au bruit : chaque survol d'un type avion sur une trajectoire apporte une contribution en un point donné. Par conséquent, multiplier le trafic revient à multiplier par autant les contributions de chaque type d'avion en chaque point, ce qui contribue à augmenter l'indice Lden en chaque point. Ainsi, pour chaque zone (Lden 70, 62, 55 ou 50) et horizon (PGS ou PEB) étudié, les indicateurs (*longueur*, *largeur* ou *surface*) sont des fonctions croissantes non majorées du nombre total de mouvements, c'est-à-dire qui tendent l'infini lorsque le nombre de mouvement tend vers l'infini (sans limite).

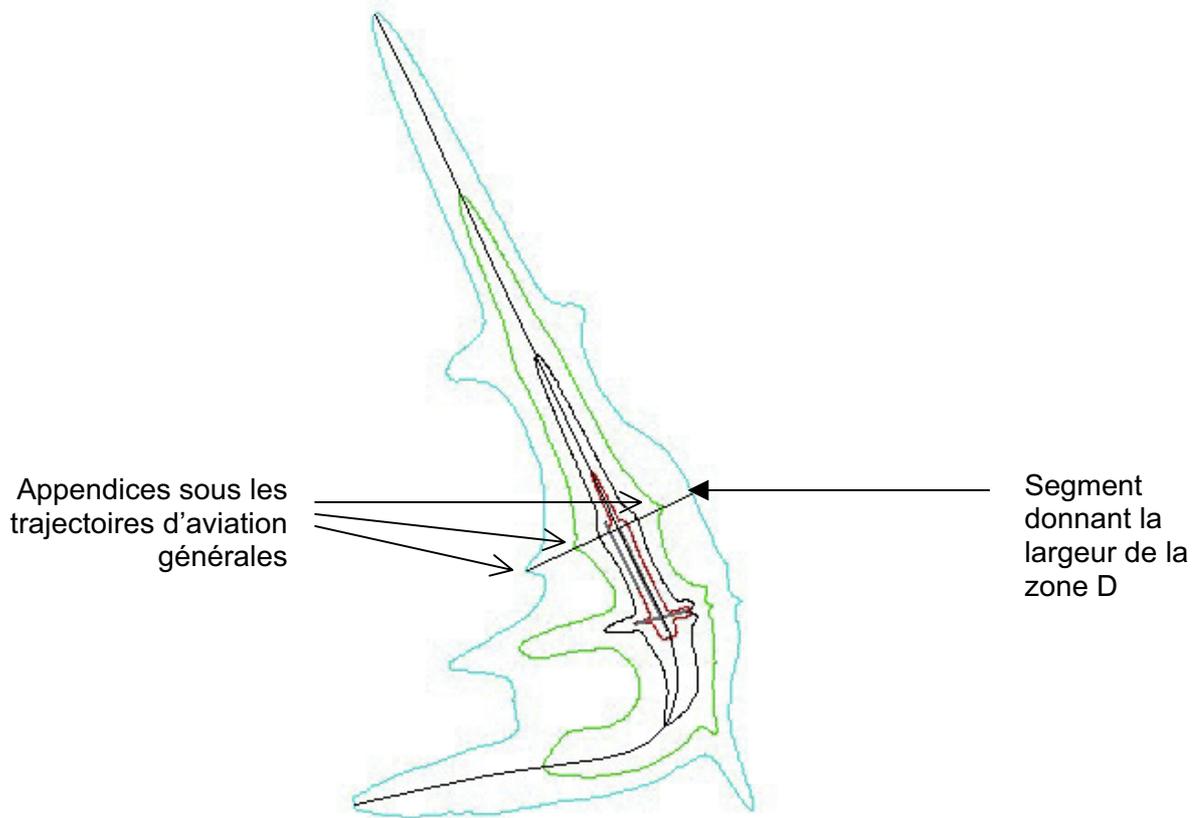
Les résultats sont présentés en Annexe (graphes n° 3, 4 et 5).

3.1.1 COHERENCE DES INDICATEURS LONGUEUR ET SURFACE

Les indicateurs *longueur* et *surface* se comportent de la même manière : ils augmentent ou diminuent en même temps. Dans les simulations effectuées, la *longueur* varie entre 3,9 km (zone A du PGS avec 28.000 mouvements annuels) et 52,5 km (zone D du PEB avec 510.000 mouvements annuels). La *surface* varie entre 0,6 km² (zone A du PGS avec 28.000 mouvements annuels) et 187,9 km² (zone D du PEB avec 510.000 mouvements annuels).

L'indicateur *largeur* montre un comportement identique aux deux précédents indicateurs, excepté pour les zones C et D dans les cas où le trafic augmente. La *largeur* varie entre 0,2 km (zone A du PGS avec 28.000 mouvements annuels) et 7,1 km (zone D du PEB avec

510.000 mouvements annuels). La *largeur* est mesurée transversalement au seuil 16L, or deux trajectoires d'aviation générale sont modélisées transversalement au seuil 16L. L'indicateur *largeur*, qui est censé traduire essentiellement le bruit latéral des avions (dominé essentiellement près des pistes par la poussée au décollage, et l'inversion de poussée à l'atterrissage), est donc biaisé par la prise en compte des bruits de survol sous les trajectoires transversales d'aviation générales. Ces bruits de survol sont prépondérants au fur et à mesure que l'on s'éloigne des pistes, donc aux faibles indices. Ce phénomène se traduit par un appendice sur les courbes des zones C et D au travers du seuil 16L, sous les trajectoires transversales, lorsque le trafic augmente.



Scénario dérivé du PGS avec 336.000 mouvements annuels

3.1.2 UNE ZONE D TRES SENSIBLE

Les variations maximales sont obtenues pour la zone D, ce qui prouve que la zone la plus sensible est la zone D. Ceci est valable quelque soit l'horizon (PGS ou PEB) et l'indicateur étudié (*longueur, largeur, surface*). Plus généralement, plus la courbe est d'indice Lden faible, plus elle est sensible aux variations d'un des paramètres de trafic. Ainsi, la zone A est la zone la moins sensible.

3.1.3 DECALAGE DES COURBES DE 3 dB(A) PAR DOUBLEMENT DU TRAFIC

Lorsque l'on multiplie le trafic global par deux (toutes choses restant égales par ailleurs), les courbes sont décalées de + 3 dB(A) : Ainsi, la courbe Lden 62 dB(A) du cas initial se superpose parfaitement avec la courbe 65 dB(A) du cas avec un trafic doublé. Il en est de même pour chaque valeur d'indice.

3.1.4 UN PEB PLUS BRUYANT QUE LE PGS, POUR UN MEME TRAFIC GLOBAL

Selon tous les indicateurs (longueur, largeur, surface) et pour toutes les zones, le scénario de référence du PEB (170.000 mouvements) est plus bruyant que celui du PGS (112.000 mouvements).

Les différentes simulations effectuées (Voir les graphes n° 3, 4 et 5 en annexes) montrent aussi que, pour un même nombre total de mouvements compris entre 50.000 et 300.000 mouvements annuels, le scénario de type PEB est plus bruyant que le scénario de type PGS : la *longueur* ou la *surface* des zones du PEB sont plus importantes que celles du PGS. Il en est de même pour la *largeur* des zones A, B, C, mais pas de la zone D. La zone D du PGS devient plus large que celle du PEB à partir de 100.000 mouvements annuel. Les raisons exposées au 3.1.1. pourraient expliquer ce phénomène marginal (biais de l'indicateur *largeur*).

Pour un nombre de mouvements égal, le scénario de type PEB est donc plus bruyant que celui de type PGS. Ce résultat n'était pas prévisible avant simulation. En effet, deux différences existent entre le PEB et le PGS, et ces différences ont des effets opposés sur l'exposition au bruit :

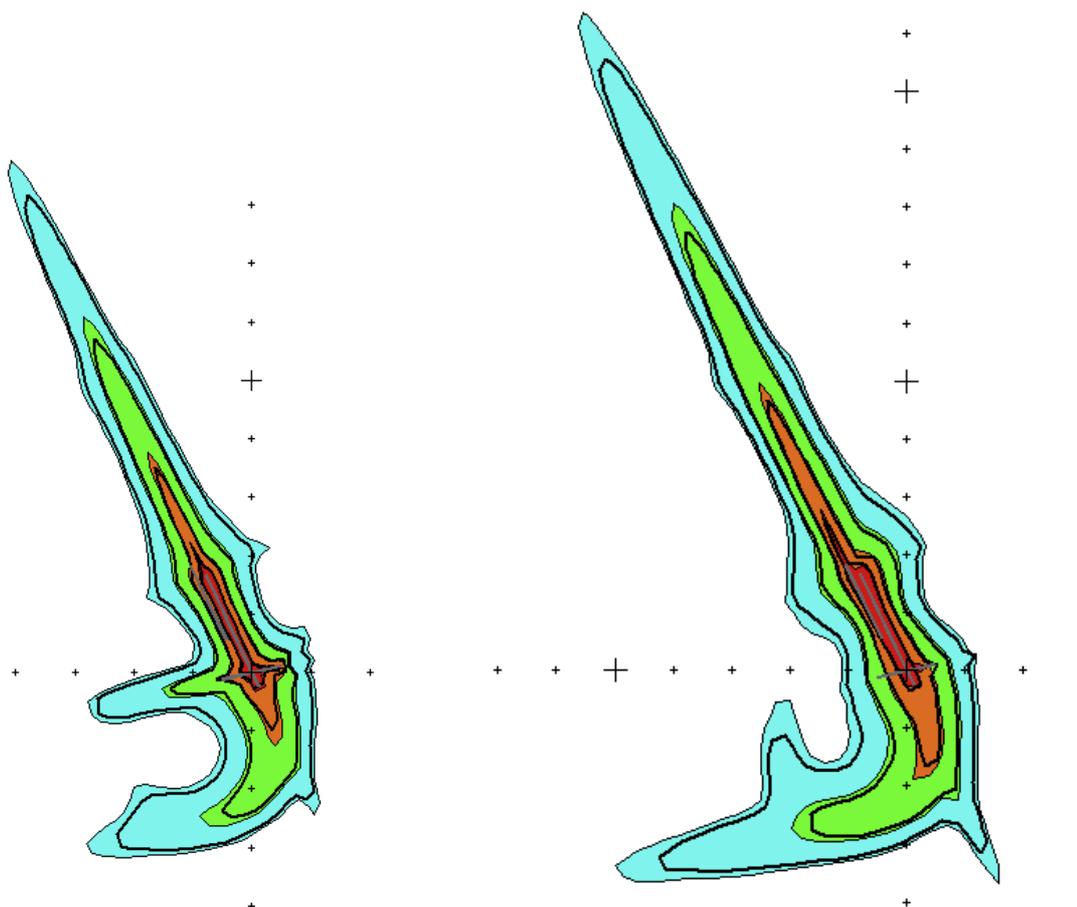
- La flotte d'avions du PEB est plus moderne (i.e. moins bruyante) que celle du PGS pour l'aviation commerciale ;
- La proportion d'aviation générale dans le trafic du PEB (5%) est moindre que celle du PGS (16%). Or l'aviation générale est moins bruyante que l'aviation commerciale.

3.1.5 IMPACT GLOBAL : VARIATIONS OBTENUES

Les variations ont été calculées uniquement pour les scénarios dérivés où 25 % du nombre total de mouvements ont été ajoutés ou supprimés par rapport aux scénarios de référence PGS ou PEB. Ces variations sont présentées dans le tableau suivant :

Indicateur	Variation maximale	Variation moyenne
Longueur	14 %	9 %
Largeur	18 %	12 %
Surface	21 %	19 %

3.1.6 IMPACT DE L'AUGMENTATION DE 25% DU NOMBRE TOTAL DE MOUVEMENTS



PGS avec 25% de mouvements en plus

PEB avec 25 % de mouvements en plus

Courbes en noir : Courbes du scénario de référence

La modification du nombre total de mouvements - toutes choses restant égales par ailleurs (notamment la répartition des avions sur les trajectoires) - a un impact global sur l'ensemble de chaque contour. Ainsi, dans le cas d'une augmentation des mouvements de 25%, on constate un gonflement global de toutes les zones de bruits sur l'ensemble de leurs contours.

3.1.7 ANALYSE DE REGRESSION

Une analyse de régression a été réalisée à partir des graphes montrant la longueur, la largeur ou la surface des zones en fonction du nombre de mouvements. Cette analyse consiste à utiliser la méthode des moindres carrés pour calculer les paramètres d'une équation dont la forme est donnée.

Les formes d'équations envisagées sont :

Affine : $y = mx + b$

Logarithmique : $y = c \ln x + b$

Puissance : $y = c x^b$

Une fois la forme de l'équation choisie, la valeur du coefficient de détermination R^2 indique si la courbe est bien adaptée aux données. R^2 est toujours inférieur à 1, mais plus il est proche de 1, meilleure est la régression. En général, lorsque R^2 est supérieur à 0.95, la courbe est très bien adaptée aux données.

Une analyse de régression a été réalisée pour chaque indicateur (longueur, largeur, surface) et pour chaque zone (A, B, C et D), du PGS et du PEB.

La forme des équations les mieux adaptées aux données dépend de l'indicateur choisi :

- pour la longueur et pour la largeur, les meilleurs résultats sont obtenus avec des équations de type « Puissance » : $y = c x^b$
- pour la surface, les meilleurs résultats sont obtenus avec des équations de type « Affine » : $y = mx + b$

Les résultats avec les courbes de régression sont présentés en Annexes (Graphes 63 à 65). Les équations sont données dans le tableau suivant :

Indicateur	Zone	Cas	Equation	Coefficient R^2
Longueur (km)	A	PEB	$Y = 0,2578 X^{0,2657}$	0,9487
		PGS	$Y = 0,4910 X^{0,1986}$	0,9608
	B	PEB	$Y = 0,0844 X^{0,4155}$	0,9944
		PGS	$Y = 0,0780 X^{0,4104}$	0,9936
	C	PEB	$Y = 0,3654 X^{0,3442}$	0,9990
		PGS	$Y = 0,2498 X^{0,3629}$	0,9993
	D	PEB	$Y = 0,4536 X^{0,3604}$	0,9974
		PGS	$Y = 0,3901 X^{0,3603}$	0,9988
Largeur (km)	A	PEB	$Y = 0,0338 X^{0,2565}$	0,9979
		PGS	$Y = 0,0020 X^{0,4582}$	0,9988
	B	PEB	$Y = 0,0234 X^{0,3347}$	0,9970
		PGS	$Y = 0,0071 X^{0,4189}$	0,9999
	C	PEB	$Y = 0,0116 X^{0,4469}$	0,9957
		PGS	$Y = 0,0072 X^{0,4795}$	0,9939
	D	PEB	$Y = 0,0147 X^{0,4716}$	0,9983
		PGS	$Y = 0,0053 X^{0,5604}$	0,9963
Surface (km ²)	A	PEB	$Y = 0,000009 X + 0,8837$	0,9883
		PGS	$Y = 0,000009 X + 0,5692$	0,9872
	B	PEB	$Y = 0,00004 X + 2,4908$	0,9923
		PGS	$Y = 0,00004 X + 1,3813$	0,9955
	C	PEB	$Y = 0,0001 X + 9,5916$	0,9904
		PGS	$Y = 0,0001 X + 5,3359$	0,9945
	D	PEB	$Y = 0,0003 X + 20,307$	0,9924
		PGS	$Y = 0,0004 X + 10,641$	0,9967

Tous les coefficients de détermination sont supérieurs à 0,95 (sauf un à 0,9487).

Pour la surface, les coefficients devant X correspondent aux valeurs d'élasticité. Ils montrent une plus grande sensibilité pour les indices les plus faibles. L'ordre de grandeur des

variations est une augmentation de la surface de 0,1 km² à 4 km² pour une augmentation de 10.000 mouvements.

La longueur, la largeur et la surface devraient être nulles lorsque le nombre de mouvements est nul. Ce n'est pas le cas avec l'équation de la surface. Si la forme de l'équation est choisie linéaire, c'est-à-dire de la forme « $y = a x$ », nulle en zéro, le coefficient de détermination est inférieur à 0,95 mais reste bon (entre 0,85 et 0,95).

3.1.8 REGRESSIONS LINEAIRES

Des régressions de la forme « $y = a x$ » ont été réalisées avec le carré de la longueur, le carré de la largeur, et la surface. Les résultats avec les courbes de régression linéaires sont présentés en Annexes (Graphes 66 à 68). Les coefficients R² montrent une bonne corrélation puisqu'ils sont supérieurs à 0,85 dans la plupart des cas. Pour des variations de trafic comprises entre +/- 25 % du trafic initial, l'erreur relative est alors inférieure à 20% pour la longueur et la largeur, et inférieure à 10 % pour la surface. Les équations sont données dans le tableau suivant :

Indicateur	Zone	Cas	Equation	Coefficient R ²
Longueur ² (au carré) (km ²)	A	PEB	$Y = 0,0002 X$	0,8290
		PGS	$Y = 0,0001 X$	0,2639
	B	PEB	$Y = 0,0008 X$	0,9439
		PGS	$Y = 0,0007 X$	0,9487
	C	PEB	$Y = 0,0025 X$	0,8863
		PGS	$Y = 0,0021 X$	0,9043
	D	PEB	$Y = 0,0059 X$	0,9440
		PGS	$Y = 0,0049 X$	0,9370
Largeur ² (au carré) (km ²)	A	PEB	$Y = 0,000002 X$	0,5847
		PGS	$Y = 0,000001 X$	0,9911
	B	PEB	$Y = 0,000008 X$	0,9105
		PGS	$Y = 0,000007 X$	0,9783
	C	PEB	$Y = 0,00004 X$	0,9971
		PGS	$Y = 0,00003 X$	0,9925
	D	PEB	$Y = 0,0001 X$	0,9922
		PGS	$Y = 0,0001 X$	0,9944
Surface (km ²)	A	PEB	$Y = 0,00001 X$	0,8747
		PGS	$Y = 0,00001 X$	0,8630
	B	PEB	$Y = 0,00005 X$	0,9497
		PGS	$Y = 0,00005 X$	0,9622
	C	PEB	$Y = 0,0002 X$	0,9297
		PGS	$Y = 0,0002 X$	0,9518
	D	PEB	$Y = 0,0004 X$	0,9496
		PGS	$Y = 0,0004 X$	0,9728

Dans le but d'estimer rapidement les variations de longueur, largeur ou surface d'un scénario dont on ne ferait que changer son nombre total de mouvements (toutes choses restant égales par ailleurs), on pourra donc considérer en première approximation que :

- **La longueur des zones d'un scénario est proportionnelle à la racine carrée du nombre total de mouvements**

Equation du type : $Y = c \cdot \sqrt{X}$

Y : Longueur
c dépend du scénario de référence et de l'indice de la courbe
X : Nombre total de mouvements

- La largeur des zones d'un scénario est proportionnelle à la racine carrée du nombre total de mouvements

Equation du type : $Y = b \cdot \sqrt{X}$

Y : Largeur

b dépend du scénario de référence et de l'indice de la courbe

X : Nombre total de mouvements

- La surface des zones d'un scénario est proportionnelle au nombre total de mouvements

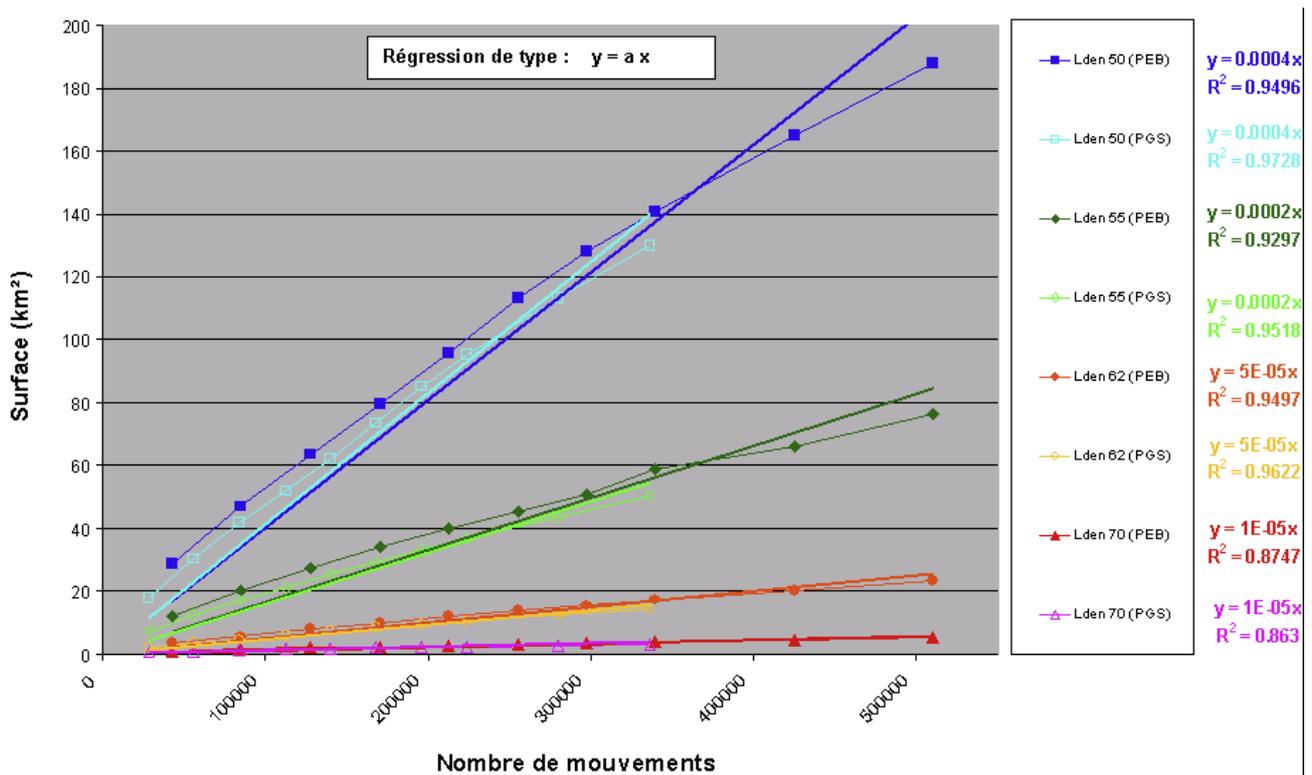
Equation du type : $Y = a \cdot X$

Y : Surface

a dépend du scénario de référence et de l'indice de la courbe

X : Nombre total de mouvements

Le graphe suivant présente les régressions linéaires obtenues pour la surface :



3.1.9 CONFIRMATION DE LA SENSIBILITE DE LA ZONE D

Les coefficients de régression linéaire (a, b, et c) sont indépendants du nombre total de mouvements. Cependant, ils peuvent dépendre de tout autre paramètre du scénario de référence : indice de la zone considérée, infrastructure, typologie de la flotte, trajectoires, relief, température, etc.

Les pentes obtenues (c'est-à-dire les coefficients de proportionnalité a, b, et c) sont presque identiques pour le PGS et le PEB : on en déduit une faible influence du scénario sur ces coefficients. Cependant, on constate qu'ils sont fortement liés à l'indice Lden, c'est-à-dire à la zone de bruit : plus l'indice est faible, plus la pente est forte. Donc, plus la zone est d'indice est faible, plus elle sera sensible à une variation du nombre total de mouvements. Ce résultat traduit la sensibilité croissante des zones pour des indices de plus en plus faibles, et confirme la forte sensibilité de la zone D, dans sa globalité, par rapport au nombre total de mouvements.

3.2 IMPACT DES ATERRISSAGES ET DES DECOLLAGES

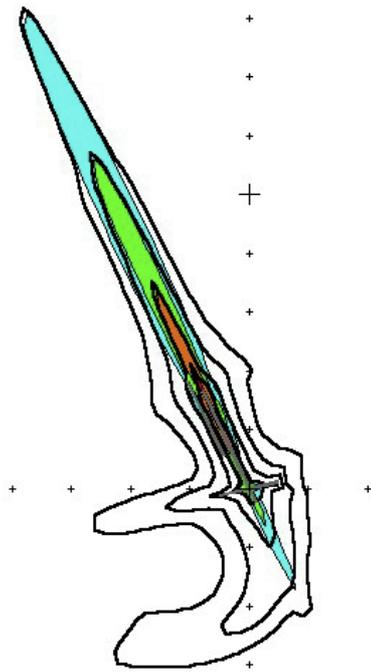
Paramètres	Valeur
Nombre total de mouvements annuels	PGS : 112.000 ; PEB : 170.000
Atterrissages / Décollages	A l'étude
Types d'avions commerciaux	Notamment : B747-400, DHC830, B727-200Huskit
Répartition d'un avion selon les trajectoires	Cf. Annexes p. 4-5
Répartition Jour/Soirée/Nuit	Passagers : Jour : 70%, Soirée : 25%, Nuit : 5% Fret : Jour : 30%, Soirée : 10%, Nuit : 60%
Prise en compte de l'aviation générale	Oui
Profils au décollage	85 % MTOW
Version du modèle INM	6.0c
Température	15 °C
Pente de l'ILS	3 °
Prise en compte du relief	Non
Modification du relief	Non
Dispersion des trajectoires	Non

3.2.1 IMPACT DES ATERRISSAGES OU DES DECOLLAGES SEULS

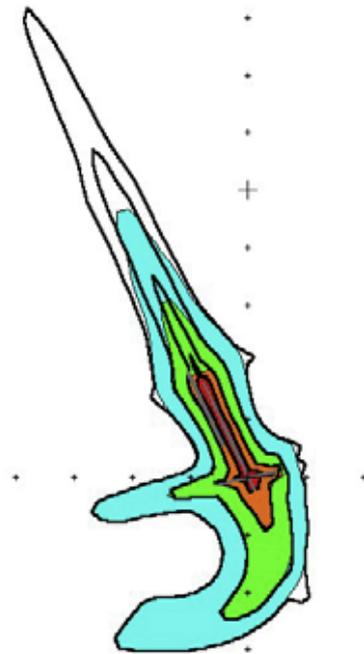
Afin de distinguer les impacts respectifs des décollages et des atterrissages sur les courbes de bruit, quatre simulations ont été réalisées, en supprimant soit tous les décollages, soit tous les atterrissages, à partir du PGS et du PEB, toutes choses restant égales par ailleurs. La répartition entre atterrissages et décollages dans les scénarios de référence PGS et PEB est équilibrée (50 % / 50 %).

Les résultats concernant l'impact des décollages ou des atterrissages (Annexes - Graphes n°6 à 11) ne mettent en évidence aucune différence entre les scénarios PGS et PEB. Les résultats obtenus montrent un poids équivalent des décollages et des atterrissages sur la longueur des zones. L'impact des décollages est majoritaire sur la surface des zones. Les décollages ont un impact quasiment exclusif sur la largeur des zones. Les décollages déterminent à eux-seuls la largeur des zones, puisque la largeur d'une zone du PGS est pratiquement égale à la largeur de la zone de même indice pour un scénario dérivé de ce PGS auquel on supprime tous les atterrissages. L'indicateur largeur est donc fortement corrélé aux décollages des avions. Il est en effet mesuré au travers du seuil 16L. Or l'exposition au bruit au voisinage du seuil 16L provient essentiellement de la poussée maximale au décollage des avions.

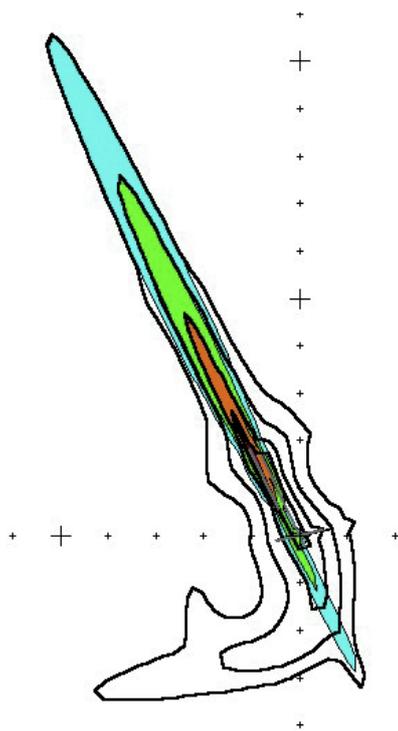
L'observation des courbes (voir page suivante) montre aussi une forte localisation de l'impact des décollages ou des atterrissages. Les courbes situées au nord des pistes sont déterminées par les atterrissages, les courbes situées au sud des pistes sont déterminées par les décollages, que ce soit pour le PGS ou le PEB. La répartition du trafic par QFU (voir 2.1.1 et 2.1.2) permet d'expliquer la localisation des impacts : 87 % des arrivées se font en 16L pour le PGS (89 % pour le PEB en comptant aussi celles du 16R), 66 % des départs se font en 16L pour le PGS (87% pour le PEB). Ces chiffres sont calculés à partir des flux en *mouvements pondérés équivalents*.



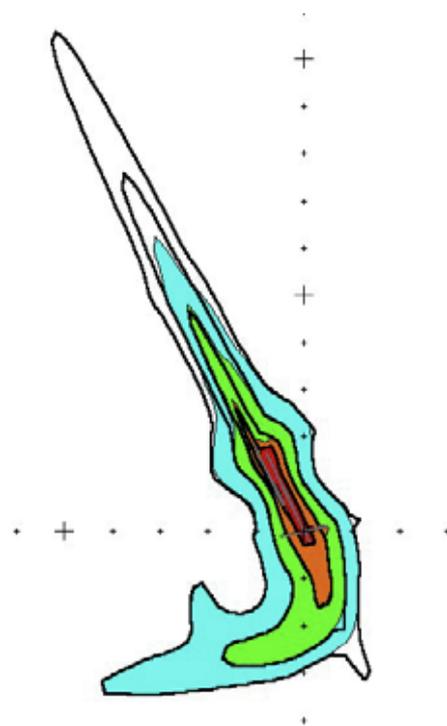
PGS sans décollages



PGS sans atterrissages



PEB sans décollages



PEB sans atterrissages

Courbes en noir : Courbes du scénario de référence

Le tableau suivant présente les variations obtenues. Ces variations sont calculées pour des scénarios dérivés avec 50 % de trafic en moins (suppression de toutes les arrivées ou de tous les départs).

Indicateur	Variation maximale	Variation moyenne
Longueur	32 %	25 %
Largeur	76 %	71 %
Surface	82 %	70 %

3.2.2 ÉCHANGE DES DÉPARTS ET DES ARRIVÉES

Deux simulations complémentaires ont été effectuées. Pour le PEB et le PGS, le fonctionnement du système a été inversé : les arrivées ont été transformées en départs et réciproquement, les départs ont été transformés en arrivées. Les trajectoires et le trafic ont été conservés, seul le sens des avions sur les trajectoires (et donc leurs profils) a été changé. Ces simulations restent purement fictives, car la plupart des trajectoires suivies par les départs dans les scénarios de référence (avec virage peu après le bout de piste) seraient considérées comme dangereuses pour les arrivées. En effet, les avions à l'atterrissage interceptent généralement l'axe de piste 10 à 20 kilomètres avant le seuil de piste.

Les changements effectués dans ces deux nouvelles simulations (échanges départs-arrivées) sont des changements importants puisqu'ils concernent tous les vols : toutes les trajectoires (arrivées et départs) ont été modifiées. De plus, ces modifications sont longues et délicates à effectuer dans le modèle de bruit.

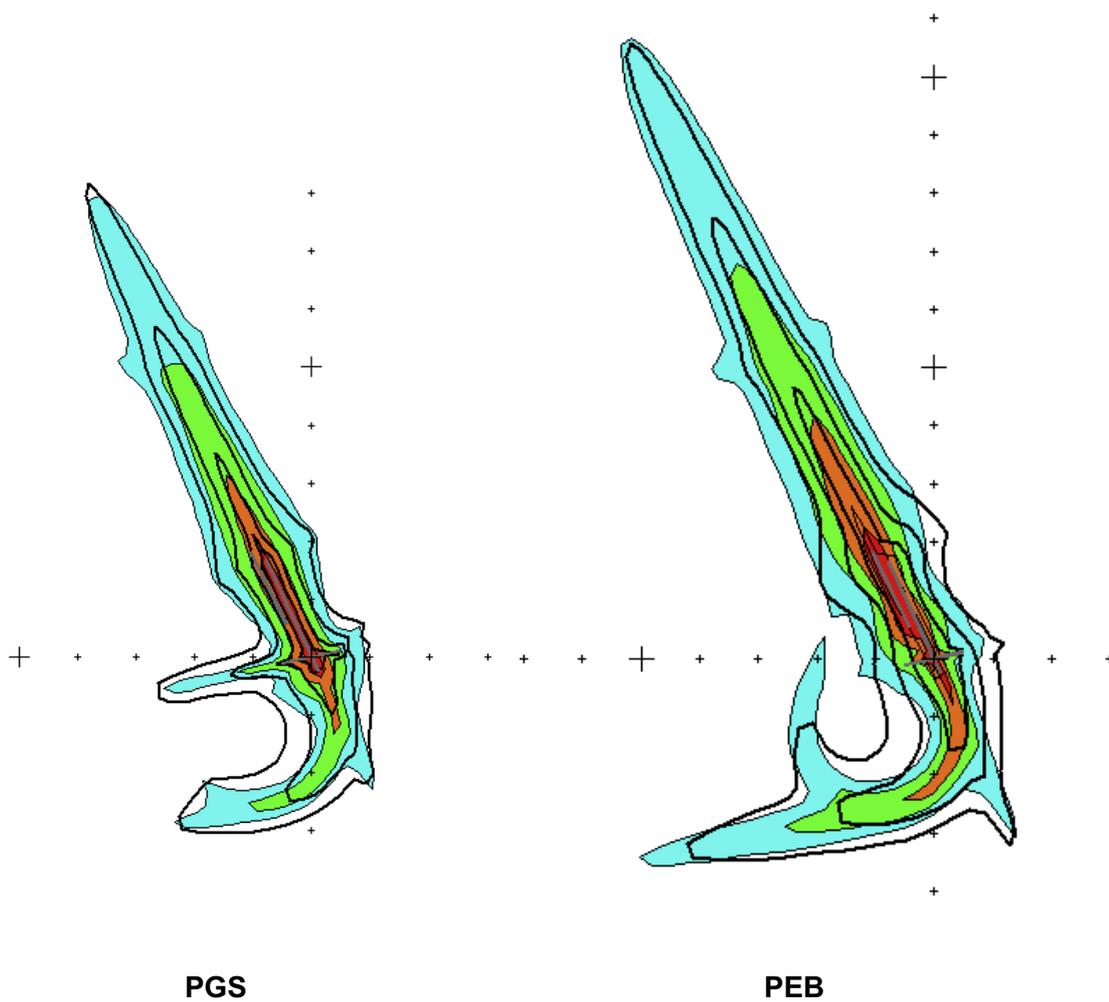
La répartition du trafic selon les différents QFUs a été totalement inversée. Le QFU 34 (vers le Nord) est désormais prédominant (77 % du trafic pour le PGS, 88% pour le PEB). Le QFU 16 (vers le Sud) est désormais emprunté par 11 % du trafic pour le PGS, et 10% du trafic pour le PEB. La répartition du trafic arrivées / départs reste égale à 50 % / 50 %.

Les zones de bruit obtenues (voir page suivante) ont des formes et des dimensions proches de celles des scénarios de référence, même si localement des différences importantes peuvent être constatées. Les nouvelles surfaces obtenues restent du même ordre de grandeur.

Le basculement des décollages du QFU 16 au QFU 34 provoque une diminution de la largeur de la zone A (mesurée au seuil 16L) de 43 % pour le PGS.

On constate un élargissement des zones sous les trajectoires empruntées désormais majoritairement par les décollages, et réciproquement, il y a un rétrécissement des zones sous les trajectoires désormais empruntées par les atterrissages. En terme de largeur des zones de bruit, les décollages sont donc plus bruyants que les atterrissages.

Pour les trajectoires au Sud de l'aéroport, qui sont spécifiques, soit aux départs, soit aux arrivées, on peut remarquer la tendance suivante (souvent vérifiée mais pas toujours confirmée) : en terme de longueur des zones de bruit, les atterrissages seraient plus bruyants que les décollages.



Echange des départs et des arrivées

Courbes en noir : Scénarios de références

Les variations moyennes obtenues sont de 4 % pour la surface et la longueur, et de 18 % pour la largeur. Les variations maximales obtenues sont de 12 % pour la surface et la longueur, et de 43 % pour la largeur.

3.3 TYPES D'AVIONS COMMERCIAUX

Paramètres	Valeur
Nombre total de mouvements annuels	PGS : 112.000 ; PEB : 170.000
Atterrissages / Décollages	50 % / 50 %
Types d'avions commerciaux	A l'étude
Répartition d'un avion selon les trajectoires	Cf. Annexes p. 4-5
Répartition Jour/Soirée/Nuit	Passagers : Jour : 70%, Soirée : 25%, Nuit : 5% Fret : Jour : 30%, Soirée : 10%, Nuit : 60%
Prise en compte de l'aviation générale	Oui
Profils au décollage	85 % MTOW
Version du modèle INM	6.0c
Température	15 °C
Pente de l'ILS	3 °
Prise en compte du relief	Non
Modification du relief	Non
Dispersion des trajectoires	Non

Afin de mesurer l'influence d'un changement de type d'avion, les simulations suivantes ont été effectuées, à partir du PGS et du PEB :

A partir du PGS et du PEB :

- remplacement du Boeing 747-400 par un Airbus A 340-200 ;
- remplacement du bi-turbopropulseur DHC-830 par un bi-turboréacteur de même gamme (EMB 145).

A partir du PGS :

- remplacement du Boeing 727-200 huskité (Chapitre 3 bruyant) par un B727-200 non huskité (Chapitre 2) ;
- remplacement d'un MD-83 (chapitre 3 bruyant) par un A-320 (chapitre 3 moins bruyant).

Avion	Moteur	Chapitre
B727-200	JT8D-15	Chapitre 2
B727-200 Huskité	JT8D-15 Huskité	Chapitre 3 les plus bruyants
MD-83	JT8D-219	Chapitre 3 bruyants
DHC-8 300	PW123	Chapitre 3 les moins bruyants
EMB145	AE3007	
A340-200	CFM56-5A1	
B747-400	PW4056	

Chapitre des avions concernés

Les résultats sont présentés en Annexes (Graphes 12 à 17), et montrent que :

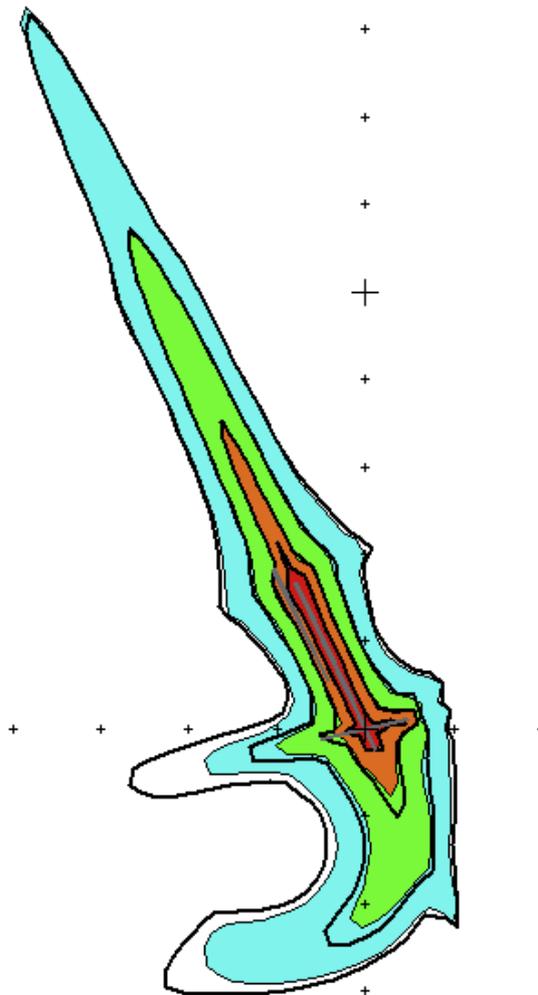
- l'A-340-200 (257 t) est légèrement moins bruyant que le B747-400 (395 t) : les zones exposées au bruit sont légèrement réduites ;
- le bi-turboréacteur est plus bruyant que le bi-turbopropulseur, si l'on considère les indicateurs longueur et surface. Cependant, le bi-turboréacteur est moins bruyant en terme de largeur ;
- le B727-200 non huskité est plus bruyant que le B727-200 huskité ;
- l'A-320 est moins bruyant que le MD-83.

3.3.1 IMPACT GLOBAL

En moyenne sur tous les scénarios calculés, 11 % des vols sont concernés par une modification du type d'avion. Les variations maximales sont obtenues dans le cas du remplacement du chapitre 3 par un chapitre 2 (B727-200 huskité par B727-200 non huskité). Le tableau suivant présente les variations obtenues.

Indicateur	Variation maximale	Variation moyenne
Longueur	14 %	6 %
Largeur	17 %	10 %
Surface	30 %	15 %

3.3.2 EXEMPLE : IMPACT DU REMPLACEMENT DU MD83 PAR L'A320 (PGS)



PGS avec A320 au lieu de MD83

Courbes en noir : Courbes du scénario de référence

Ce changement du MD 83 (avion bruyant du chapitre 3) par un A320 (avion moins bruyant du chapitre 3), provoque une diminution globale des zones de bruit (longueur, largeur, surface). Le rétrécissement des courbes de bruit est essentiellement localisé sous les trajectoires correspondant à la majorité des départs (départs en QFU 16). Cependant, sous les trajectoires correspondant à la majorité des arrivées (arrivées en QFU 16), on constate le phénomène inverse : il y a un allongement des courbes. Cela montre qu'au décollage l'A320 est moins bruyant que le MD83, mais qu'à l'atterrissage, le MD83 est légèrement moins bruyant. Globalement, il en résulte une diminution des zones de bruit.

3.4 REPARTITION D'UN AVION (MD 83) SUR LES TRAJECTOIRES

Paramètres	Valeur
Nombre total de mouvements annuels	PGS : 112.000 ; PEB : 170.000
Atterrissages / Décollages	50 % / 50 %
Types d'avions commerciaux	Notamment : B747-400, DHC830, B727-200Huskit
Répartition d'un avion selon les trajectoires	A l'étude
Répartition Jour/Soirée/Nuit	Passagers : Jour : 70%, Soirée : 25%, Nuit : 5% Fret : Jour : 30%, Soirée : 10%, Nuit : 60%
Prise en compte de l'aviation générale	Oui
Profils au décollage	85 % MTOW
Version du modèle INM	6.0c
Température	15 °C
Pente de l'ILS	3 °
Prise en compte du relief	Non
Modification du relief	Non
Dispersion des trajectoires	Non

Dans cette partie, il s'agit de tester la modification de la répartition d'un avion sur les trajectoires, toutes choses restant égales par ailleurs, notamment le type d'avion et le nombre de mouvements.

Une seule simulation a été réalisée : pour le PGS, le trafic des décollages du MD-83 en QFU 26 a été basculé sur les QFUs16 et 34, au prorata de la répartition déjà existante entre ces QFUs16 et 34 (respectivement 80% et 20%).

Dans le scénario de référence du PGS, 296 avions de type MD83 décollent en QFU 26. Il y a 4.000 mouvements de MD 83 sur un total de 112.000 mouvements. Dans le nouveau scénario, ces 296 décollages ont été basculés sur les QFUs 16 (237 décollages) et 34 (59 décollages).

3.4.1 IMPACT GLOBAL

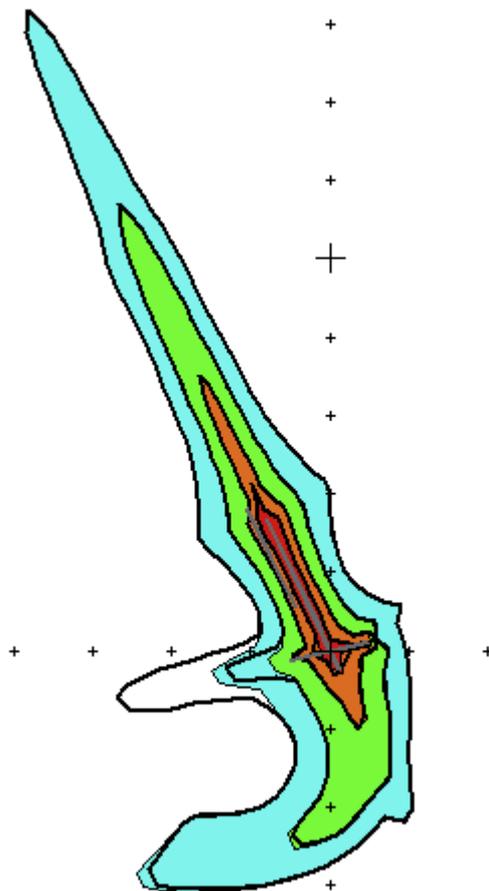
Le basculement des décollages de MD-83 du QFU 26 sur les QFUs 16 et 34 provoque une diminution globale et moyenne de la surface des courbes d'environ 1,5 %. Pourtant, seul 0,3 % du trafic global est concerné par cette modification de trajectoire (296 mouvements sur 112.000).

Les variations maximales de la longueur et la surface sont obtenues pour la zone D, et celle de la largeur pour la zone A. Les résultats sont présentés en Annexe (Graphes 18 à 20). Le tableau suivant présente les variations obtenues (0,3 % des vols sont concernés par la modification) :

Indicateur	Variation maximale	Variation moyenne
Longueur	2 %	1,5 %
Largeur	1 %	1 %
Surface	3,5 %	1,5 %

3.4.2 IMPACT LOCAL

Le schéma suivant présente l'impact du basculement des décollages de MD 83 du QFU 26 aux QFUs 16 et 34 (de la piste secondaire sur la piste principale). On constate que cet impact est localisé sous les trajectoires de décollage en QFU 26, avec une diminution de surface et de longueur importante (environ 3 km en moins pour la zone D et 1,5 km en moins pour la zone C). L'augmentation du nombre de décollages en QFU 16 se traduit par une augmentation de la longueur (+ 500 m pour la zone D).



PGS avec basculement des décollages du MD83 du QFU 26 aux QFUs 16-34

Courbes en noir : Scénario de référence.

3.5 REPARTITION JOUR/SOIREE/NUIT

Paramètres	Valeur
Nombre total de mouvements annuels	PGS : 112.000 ; PEB : 170.000
Atterrissages / Décollages	50 % / 50 %
Types d'avions commerciaux	Notamment : B747-400, DHC830, B727-200Huskit
Répartition d'un avion selon les trajectoires	Cf. Annexes p. 4-5
Répartition Jour/Soirée/Nuit	A l'étude
Prise en compte de l'aviation générale	Oui
Profils au décollage	85 % MTOW
Version du modèle INM	6.0c
Température	15 °C
Pente de l'ILS	3 °
Prise en compte du relief	Non
Modification du relief	Non
Dispersion des trajectoires	Non

Pour le trafic passager et le fret, la répartition du trafic entre les périodes de jour, soirée et nuit a été étudiée. La répartition Jour/Soirée/Nuit a été modifiée, soit pour les passagers, soit pour le fret, mais pas pour les deux à la fois.

La répartition pour les cas de référence est :

- pour les passagers : Jour = 70 % , Soirée = 25 % , Nuit = 5 %
- pour le fret : Jour = 30 % , Soirée = 10 % , Nuit = 60 %

Les répartitions suivantes ont été testées :

Passagers			Fret		
Jour	Soirée	Nuit	Jour	Soirée	Nuit
60 %	35 %	5 %	30 %	15 %	55%
70 %	20 %	10 %	30 %	5 %	65 %
70 %	30 %	0 %			
80 %	15 %	5 %			

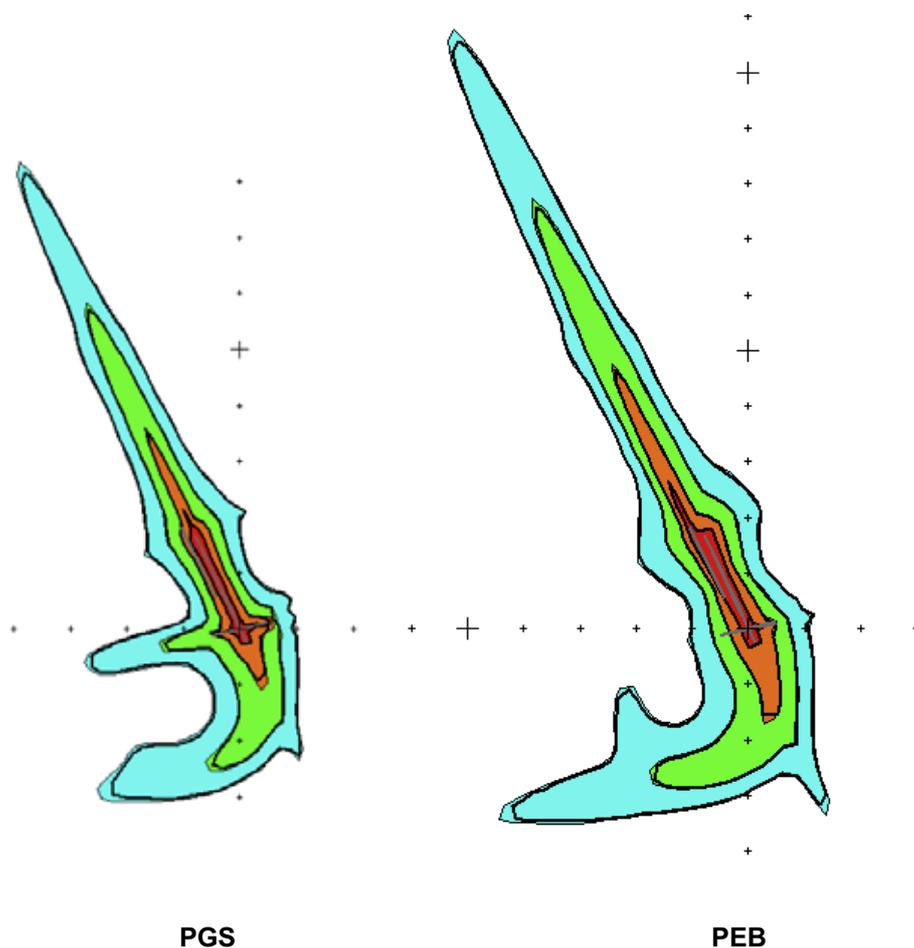
Le transport de passagers représente 58.100 mouvements sur les 112.000 mouvements du PGS, et 145.500 mouvements sur les 170.000 mouvements du PEB. Le fret totalise 3.900 mouvements dans le PGS et 8.500 mouvements dans le PEB.

3.5.1 RESULTATS GLOBAUX DES SIMULATIONS

En moyenne sur tous les scénarios calculés, 3 % des vols sont concernés par une modification de la répartition Jour/Soirée/Nuit. Les résultats sont présentés en Annexe (Graphes 21 à 26). Les variations sont données dans le tableau suivant :

Indicateur	Variation maximale	Variation moyenne
Longueur	4 %	2 %
Largeur	5 %	2 %
Surface	7 %	4 %

3.5.2 EXEMPLE : NOUVELLE REPARTITION JOUR/SOIREE/NUIT POUR LE TRANSPORT DE PASSAGERS



Répartition : Jour = 70%, Soirée = 20%, Nuit = 10 %
(au lieu de Jour = 70%, Soirée = 25%, Nuit = 5 %)

Courbes en noir : Courbes du scénario de référence

Le basculement de 5 % des vols passagers de la soirée sur la nuit provoque une augmentation globale des zones de bruit (longueur, largeur, surface). Cette augmentation concerne d'ensemble du pourtour de chaque zone, mais est surtout localisée sous les trajectoires (arrivées ou décollages).

3.5.3 METHODE DE PREVISION DES RESULTATS

L'impact de la répartition Jour/Soirée/Nuit peut s'estimer en utilisant la notion de **mouvements pondérés équivalents**. Cette notion permet de ramener un changement de répartition Jour/Soirée/Nuit (problème à 3 variables) à une modification du trafic global annuel (problème à une variable, traité au 3.1).

Le changement de variable consiste à calculer : $\alpha = \text{Jour} \times 1 + \text{Soirée} \times 3,16 + \text{Nuit} \times 10$

Pour chaque avion i, on peut écrire :

$$N_{i, eq} = \alpha_i \times T_i$$

Où :

$N_{i, eq}$ = Nombre de *mouvements pondérés équivalents* de l'avion i

α_i = Jour(avion i) x 1 + Soirée(avion i) x 3,16 + Nuit(avion i) x 10

T_i = Trafic annuel de l'avion i

L'exposition au bruit dû à l'avion i dépend de son nombre de *mouvements pondérés équivalents* $N_{i, eq}$.

Soit deux cas, A et B, qui diffèrent seulement par leur répartition Jour/Soirée/Nuit. On a :

$$N_{i, eq} (\text{cas A}) = \alpha_i (\text{cas A}) \times T_i \quad (1)$$

$$N_{i, eq} (\text{cas B}) = \alpha_i (\text{cas B}) \times T_i \quad (2)$$

En introduisant α_i (cas A) au numérateur et au dénominateur de (2), on obtient :

$$N_{i, eq} (\text{cas B}) = \alpha_i (\text{cas A}) \times [\alpha_i (\text{cas B}) / \alpha_i (\text{cas A})] \times T_i$$

Ce qui prouve que l'exposition au bruit de l'avion i du cas B est la même que l'exposition au bruit d'un troisième cas, appelé C, défini comme suit :

- la répartition Jour/Soirée/Nuit du cas C est la même que celle du cas A ;
- le trafic de l'avion i du cas C est : $T_i (\text{cas C}) = [\alpha_i (\text{cas B}) / \alpha_i (\text{cas A})] \times T_i$

Ainsi, déterminer l'exposition au bruit du cas B revient à déterminer l'exposition au bruit du cas C, ayant la même répartition Jour /Soirée/Nuit que le cas A, mais avec le trafic du cas multiplié par : $\alpha_i (\text{cas B}) / \alpha_i (\text{cas A})$.

Où :

$$\alpha_i (\text{cas B}) / \alpha_i (\text{cas A}) = \frac{[\text{Jour}(\text{avion i, cas B}) \times 1 + \text{Soirée}(\text{avion i, cas B}) \times 3,16 + \text{Nuit}(\text{avion i, cas B}) \times 10]}{[\text{Jour}(\text{avion i, cas A}) \times 1 + \text{Soirée}(\text{avion i, cas A}) \times 3,16 + \text{Nuit}(\text{avion i, cas A}) \times 10]}$$

Deux cas peuvent se présenter :

- Dans le cas où tous les avions du cas A ont la même répartition Jour/Soirée/Nuit, changer la répartition Jour/Soirée/Nuit dans le cas B revient à multiplier le trafic global annuel du cas A par le coefficient précédent, qui ne dépend désormais plus de i : $\alpha (\text{cas B}) / \alpha (\text{cas A})$.
- Dans le cas où seule une catégorie d'avion est concernée par un changement de répartition Jour/Soirée/Nuit, et que dans cette catégorie, tous les avions ont la même répartition Jour/Soirée/Nuit, on peut quand même conclure que l'exposition au bruit du cas B est comprise entre l'exposition au bruit du cas A et l'exposition au bruit du cas A avec un trafic multiplié par $\alpha (\text{cas B}) / \alpha (\text{cas A})$.

Le calcul du coefficient multiplicateur de trafic α (simulations effectuées) / α (cas de référence) donne :

Activité	Jour	Soirée	Nuit	Coefficient multiplicateur
Passagers	60 %	35 %	5 %	1,11
	70 %	20 %	10 %	1,17
	70 %	30 %	0 %	0,83
	80 %	15 %	5 %	0,89
Fret	30 %	15 %	55 %	0,95
	30 %	5 %	65 %	1,05

Ainsi, les différentes modifications de la répartition Jour/Soirée/Nuit envisagées ici, ont un impact compris entre celui d'une augmentation de trafic de 17% et celui d'une diminution de trafic de 17 % (coefficients multiplicateurs compris entre 0,83 et 1,17).

3.6 AVIATION GENERALE : IMPACT FAIBLE ET DILUE DANS LE TRAFIC COMMERCIAL

Paramètres	Valeur
Nombre total de mouvements annuels	A l'étude
Atterrissages / Décollages	A l'étude
Types d'avions commerciaux	Notamment : B747-400, DHC830, B727-200Huskit
Répartition d'un avion selon les trajectoires	Cf. Annexes p. 4-5
Répartition Jour/Soirée/Nuit	Passagers : Jour : 70%, Soirée : 25%, Nuit : 5% Fret : Jour : 30%, Soirée : 10%, Nuit : 60%
Prise en compte de l'aviation générale	Oui
Profils au décollage	85 % MTOW
Version du modèle INM	6.0c
Température	15 °C
Pente de l'ILS	3 °
Prise en compte du relief	Non
Modification du relief	Non
Dispersion des trajectoires	Non

Pour mesurer l'impact de l'aviation générale dans les scénarios PEB et PGS, quatre scénarios ont été simulés. Deux scénarios ont été construits avec les mêmes hypothèses que le PGS ou le PEB, mais sans trafic d'aviation générale. Deux autres scénarios ont été construits uniquement avec le trafic d'aviation générale du PGS ou du PEB.

Le même avion a été choisi dans INM (GASEPV) pour modéliser l'aviation générale dans toutes les simulations PEB ou PGS. Il s'agit d'un avion monomoteur à piston, muni d'une hélice à pas variable. Sa masse maximale est de 1,4 tonnes. Le trafic d'aviation générale est de 18.000 monomoteurs/an dans le scénario PGS (112.000 mouvements annuels). Dans le scénario du PEB (170.000 mouvements annuels), il est de 8.000 monomoteurs/an.

Les résultats (Annexes - Graphes n°27 à 32) montrent que la part d'exposition au bruit imputable à l'aviation générale est faible : moins de 1% pour la *longueur*, moins de 20% pour la *largeur*, et enfin moins de 3% pour la *surface*, pour tous scénarios et toutes les zones. L'impact le plus fort est toujours atteint pour la zone D, et pour la largeur, car cet indicateur est mesuré sous les trajectoires d'aviation générale.

Le trafic d'aviation générale, considéré seul, génère des zones de bruit très réduites pour le PGS ainsi que pour le PEB.

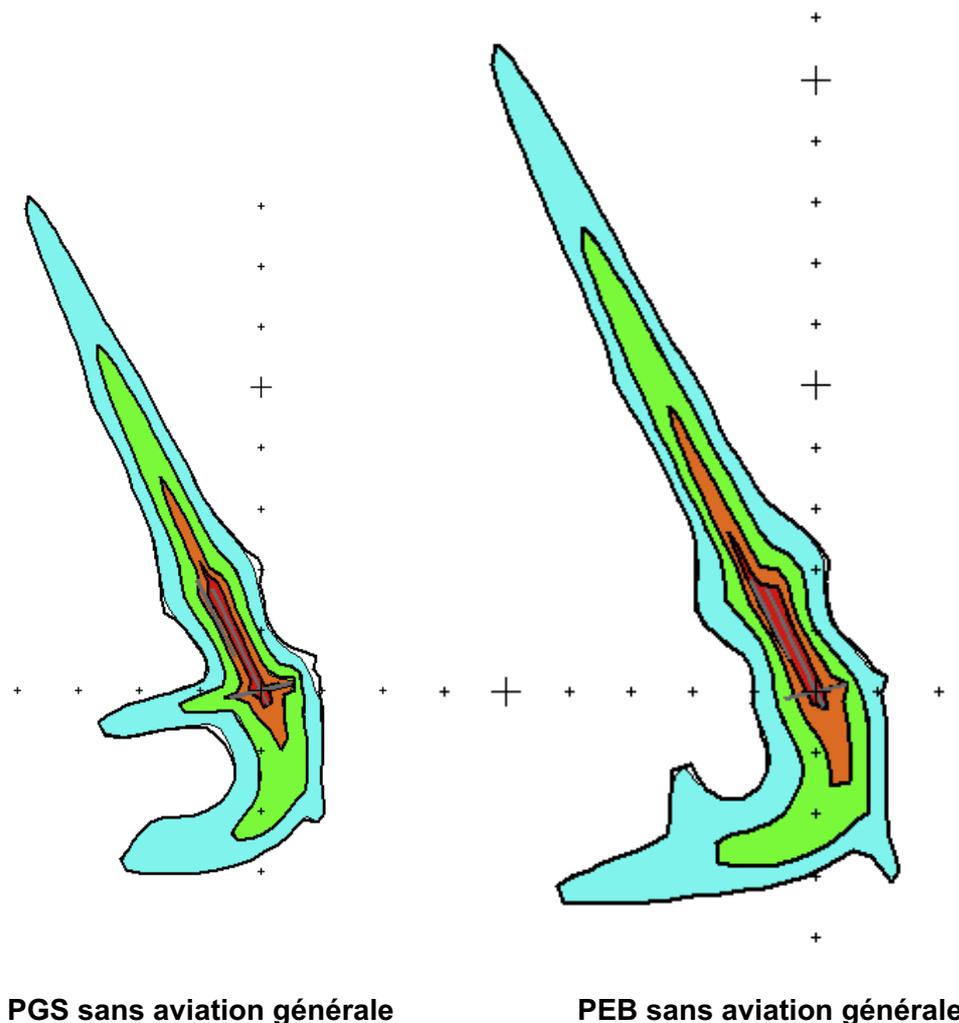
Par ailleurs, la zone A n'est pas connexe : elle est constituée de plusieurs « bulles ». De même pour la zone B. Les zones A et B débordent à peine des pistes, et sont constituées de 7 « bulles » disjointes qui correspondent aux différentes zones de décollages des avions. En effet, sur la piste 16L-34R, il y a 4 points d'alignement au décollage pour l'aviation générale : 2 aux seuils et 2 au niveau des bretelles d'accès. Les bulles des zones A et B sont concentrées au voisinage de ces points.

D'une manière générale, les trois indicateurs montrent que le trafic d'aviation générale du PGS est plus bruyant que celui du PEB. Ce résultat est cohérent avec la baisse du trafic d'aviation générale à long terme. Cependant, la largeur de la zone C du PEB est plus grande que celle du PGS, ce qui s'explique par les différences d'infrastructure entre le PGS et le PEB. Dans le PEB, rajouter une piste parallèle en répartissant le trafic sur les deux pistes augmente la largeur des zones.

Le tableau suivant présente les variations obtenues, dans le cas de la prise en compte ou non de l'aviation générale. En moyenne pour les 2 scénarios calculés, 9 % des vols sont concernés par les modifications (vols d'aviation générale).

Indicateur	Variation maximale	Variation moyenne
Longueur	0,5 %	0 %
Largeur	25 %	6 %
Surface	2 %	2 %

Le schéma suivant présente les scénarios PGS et PEB sans l'aviation générale. On constate un rétrécissement des courbes au droit des seuils 16 et 34, c'est-à-dire sous les trajectoires empruntées spécifiquement par l'aviation générale (impact localisé).



Courbes en noir : Courbes du scénario de référence

Page laissée intentionnellement blanche

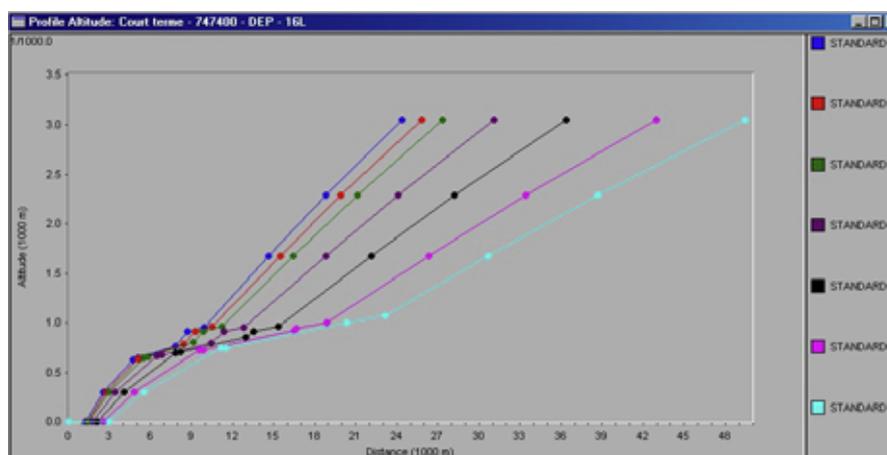
RESULTATS (SUITE)

LES PARAMETRES DE LA MODELISATION

3.7 PROFILS AU DECOLLAGE (MASSES AU DECOLLAGE)

Paramètres	Valeur
Nombre total de mouvements annuels	PGS : 112.000 ; PEB : 170.000
Atterrissages / Décollages	50 % / 50 %
Types d'avions commerciaux	Notamment : B747-400, DHC830, B727-200Huskit
Répartition d'un avion selon les trajectoires	Cf. Annexes p. 4-5
Répartition Jour/Soirée/Nuit	Passagers : Jour : 70%, Soirée : 25%, Nuit : 5% Fret : Jour : 30%, Soirée : 10%, Nuit : 60%
Prise en compte de l'aviation générale	Oui
Profils au décollage	A l'étude
Version du modèle INM	6.0c
Température	15 °C
Pente de l'ILS	3 °
Prise en compte du relief	Non
Modification du relief	Non
Dispersion des trajectoires	Non

Le profil de décollage étudié ici est le profil de hauteur-sol de l'avion. Ce type de profil définit la trajectoire de l'avion dans le plan vertical en donnant la hauteur de l'avion en fonction de la distance-sol parcourue. Dans le modèle de bruit utilisé, certains avions possèdent plusieurs profils au décollage. Certains moyens ou gros porteurs possèdent ainsi une dizaine de profils différents au décollage. Ces profils correspondent à des chargements différents de l'avion, donc à des masses au décollage différentes pour cet avion. En l'absence d'informations précises sur la masse des avions aux décollages, le profil correspondant à un chargement à 85 % de la masse maximale au décollage de l'avion (MTOW) est utilisé dans les modélisations. Cette pratique est recommandée au niveau européen et international, [7] & [8].



Exemples de profils au décollage pour un Boeing 747-400 dans INM

Ainsi, les scénarios de référence (PGS et PEB) sont modélisés avec des profils au décollage correspondant à 85 % de la MTOW. Afin de mesurer l'impact d'un changement de profil sur les courbes en Lden, un scénario avec les profils correspondant à la masse minimum de chaque avion et un scénario avec les profils correspondant à la masse maximum ont été effectués pour le PGS et le PEB.

Dans les deux scénarios dérivés du PGS, les profils au décollage des avions suivants ont été modifiés : 727EM2, 737500, 747400, 757PW, A310, A320, BAE146, EMB145, MD 83. Dans les deux scénarios dérivés du PEB, les profils au décollage des avions suivants ont été modifiés : 737500, 747400, 757PW, 767300, A320, BAE146, EMB145. Pour les autres types d'avions, il n'existe qu'un seul profil au décollage dans INM.

Les résultats sont présentés en Annexes (Graphes n°33 à 35). Le changement des profils de décollage a un impact similaire sur le PGS ou le PEB. Pour la configuration avec des profils minima (masses minimales), la longueur des zones diminue. Pour la configuration avec des profils maxima (masses maximales), la longueur des zones augmente. Il en est de même pour la largeur et la surface. Ainsi, lorsque la masse des avions au décollage des avions augmente, le scénario devient plus bruyant. Les variations des indicateurs restent comprises entre +/- 15%.

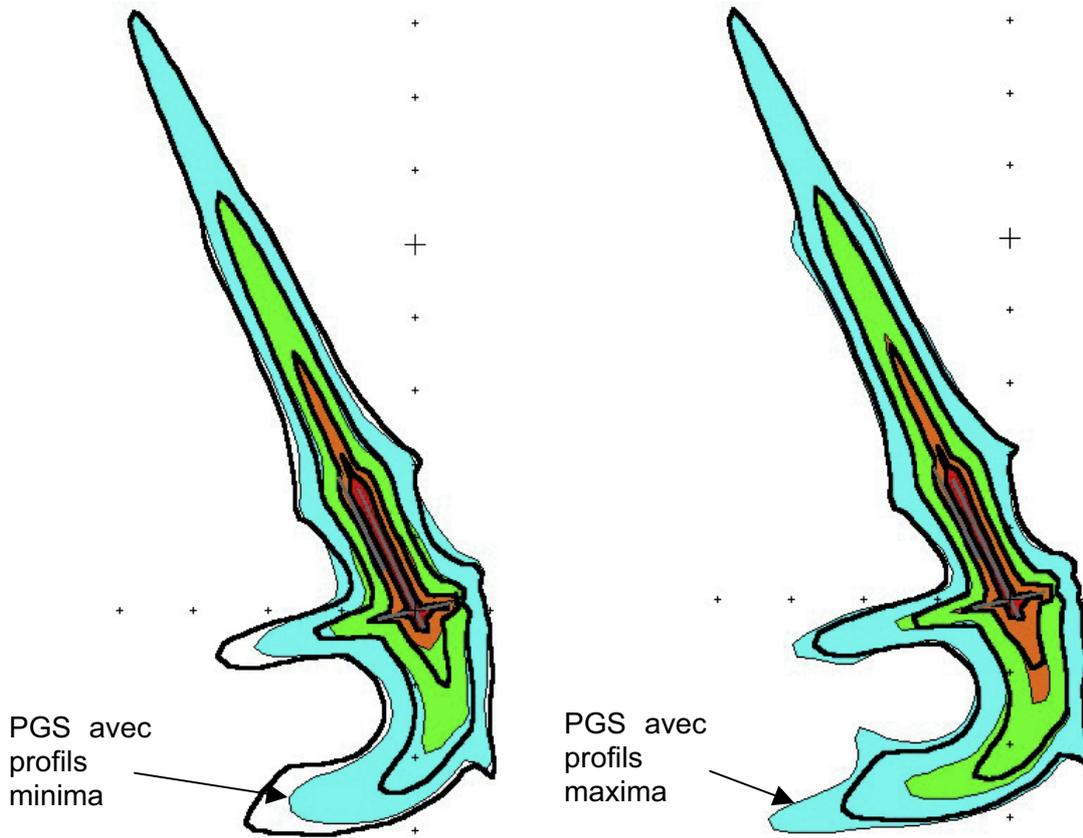
Le changement de masse au décollage n'a pas le même impact sur toutes les zones. La zone A est la moins sensible. Cependant, la zone D n'est pas la plus sensible pour les trois indicateurs. Pour l'indicateur longueur, les variations sont maximales pour la zone B. Pour la surface, les variations sont maximales pour la zone C. Pour la largeur, c'est la zone D qui est la plus sensible.

L'observation des zones permet de compléter l'analyse des indicateurs (voir les schémas ci-après) : on constate que les zones sont allongées ou raccourcies principalement sous les trajectoires de décollage en QFU 16 ou QFU 26. Cette région correspond aussi aux trajectoires d'arrivée en QFUs opposés, mais l'exposition au bruit dues aux arrivées n'est pas modifiée par le changement des profils de décollage. Le changement des profils au décollage ne modifie que la trajectoire des avions qui décollent, et n'a donc aucune conséquence sur le bruit dû aux avions qui atterrissent.

On constate que les zones sont modifiées là où la proportion des décollages est largement supérieure à celle des atterrissages : Pour le PGS, il y a 199 *mouvements pondérés équivalents* par jour qui décollent en QFU 16, mais seulement 4 qui atterrissent en QFU 34. De même, il y a 66 *mouvements pondérés équivalents* d'avions par jour qui décollent en QFU 26, mais aucun qui n'atterrit en 08. A l'inverse, sur les régions où le nombre d'atterrissage est prépondérant, les zones sont très peu modifiées : il y a 281 *mouvements pondérés équivalents* d'atterrissage en QFU 16 contre 54 décollages.

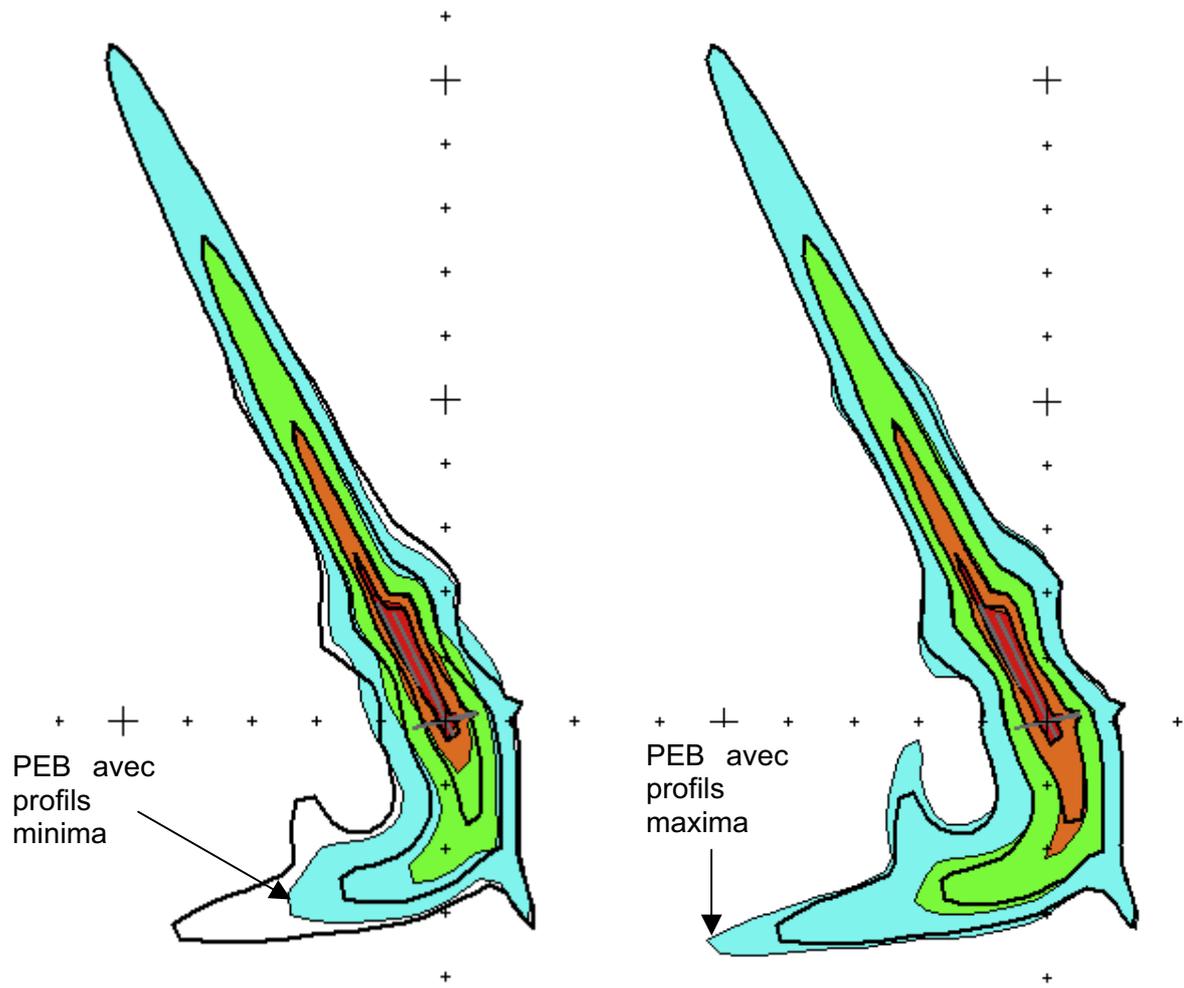
En moyenne sur tous les scénarios calculés, 26 % des vols sont concernés par une modification de profil au décollage. Les variations sont présentées dans le tableau suivant :

Indicateur	Variation maximale	Variation moyenne
Longueur	14 %	7 %
Largeur	11 %	4 %
Surface	15 %	10 %



Scénario de type PGS avec profils minima ou maxima

Courbes en noir : Courbes du scénario de référence



Scénario de type PEB avec profils minima ou maxima

Courbes en noir : Courbes du scénario de référence

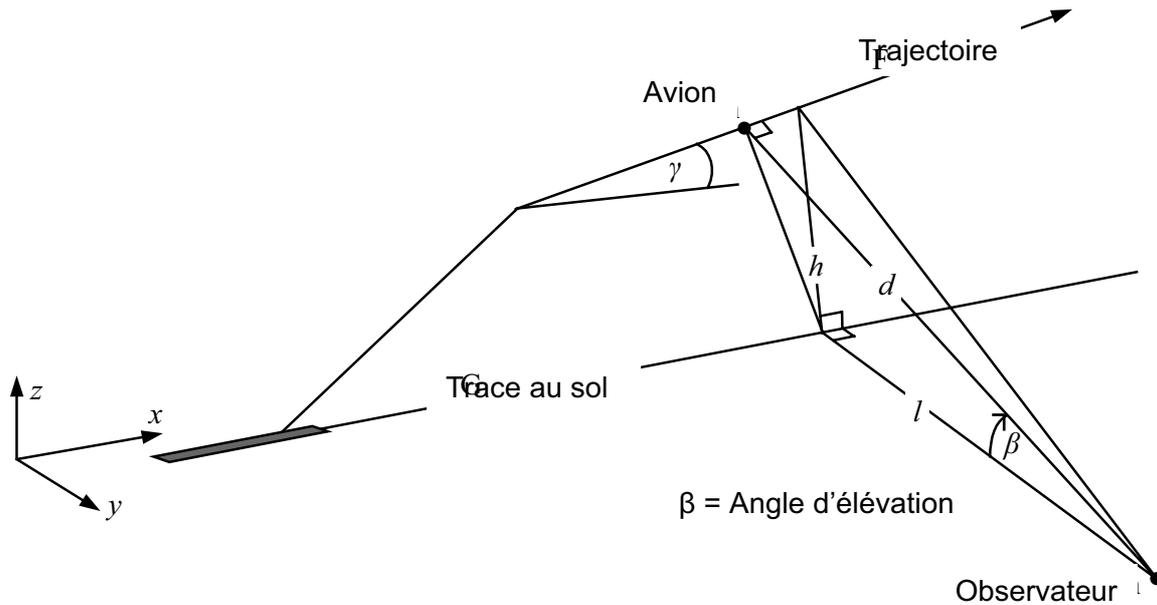
3.8 NOUVELLE VERSION INM 6.1

Paramètres	Valeur
Nombre total de mouvements annuels	PGS : 112.000 ; PEB : 170.000
Atterrissages / Décollages	50 % / 50 %
Types d'avions commerciaux	Notamment : B747-400, DHC830, B727-200Huskit
Répartition d'un avion selon les trajectoires	Cf. Annexes p. 4-5
Répartition Jour/Soirée/Nuit	Passagers : Jour : 70%, Soirée : 25%, Nuit : 5% Fret : Jour : 30%, Soirée : 10%, Nuit : 60%
Prise en compte de l'aviation générale	Oui
Profils au décollage	85 % MTOW
Version du modèle INM	A l'étude
Température	15 °C
Pente de l'ILS	3 °
Prise en compte du relief	Non
Modification du relief	Non
Dispersion des trajectoires	Non

Une nouvelle version du logiciel de bruit (INM 6.1) a été mise en ligne par la FAA à partir du 4 Mars 2003 [9]. A partir du PGS et du PEB, deux simulations ont été réalisées avec INM 6.1, afin de constater l'impact du changement de version.

Les changements apportés à la nouvelle version d'INM sont :

- **Modification du modèle** : modification de la fonction d'atténuation latérale du bruit pour les avions à réaction avec moteurs sous l'aile et pour les turbopropulseurs. L'atténuation latérale est un phénomène complexe constaté lors de mesures de bruit in situ : lorsque le point d'observation n'est pas situé sous la trajectoire de l'avion mais à une certaine distance en latéral (à partir de 1 km), le niveau de bruit mesuré est inférieur au niveau de bruit source auquel on soumet les règles d'atténuation en $1/d^2$ et d'absorption atmosphérique. Une atténuation supplémentaire doit être prise en compte : cette atténuation est due aux interférences des ondes entre elles lors de la réfraction sur le sol (effet de sol). Dans la version 6.1 d'INM, l'expression de la fonction d'atténuation latérale a été modifiée, et son domaine d'utilisation est restreint à des angles d'élévation de 0 à 30° (auparavant 60°). Ainsi, pour des angles d'élévation de 30° à 90°, l'atténuation latérale est nulle. Il en résulte une augmentation générale des niveaux de bruit. La FAA prévoit une augmentation de la surface des zones de l'ordre de 3 à 6 % ;
- **Modification de la base de données** :
 - ajout de nouveaux profils pour les avions militaires ;
 - ajout de nouveaux types d'avions : Airbus 300-622R avec moteurs PW4158, Airbus 321-232 avec moteurs IAE V2530-A5, Airbus A330-343 avec moteurs RR Trent 772B, Boeing 737-800 avec moteurs CFM56-7B26, Boeing 757-300 avec moteurs RB211-535E 4B ;
 - modifications de données de bruit des avions suivants : F4C, DHC8, DHC830, A310 ;
 - modification des données de performances (profils) des avions suivants : A 319, A 320, A 320-230, A-340, B 767-400, B 777-200, B 777-300 ;



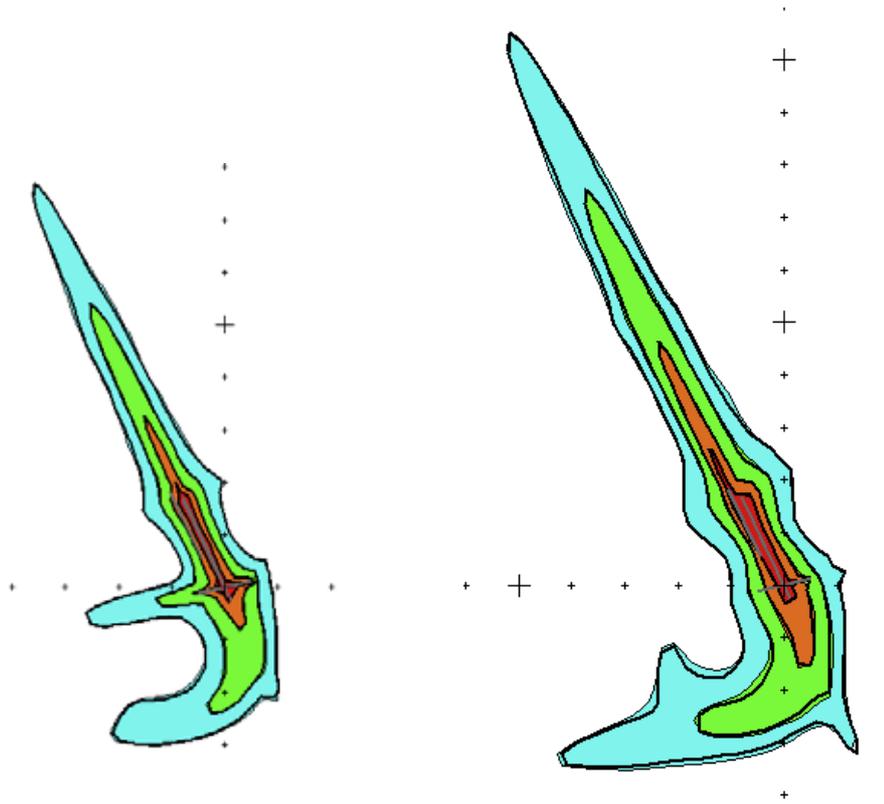
Seules deux modifications ont un impact potentiel sur le PGS et le PEB : le changement de la fonction d'atténuation latérale du bruit des avions, et la modification des données de l'A310 et du DHC830.

Seul le changement de la fonction d'atténuation latérale sera étudié ici. Afin de distinguer l'impact de ce changement, deux nouvelles simulations ont été effectuées pour le PGS et le PEB, en supprimant le trafic des A310 et DHC830, et en utilisant INM 6.0c ou INM 6.1.

Les résultats sont présentés en Annexes (Graphes 36 à 41). On constate un gonflement des courbes dans leur globalité. La longueur, la largeur et la surface sont supérieures avec INM 6.1. Les variations absolues sont de l'ordre de + 100 m pour la longueur et la largeur, et de + 1 à 5 km² pour la surface. Les résultats pour la surface sont conformes à ceux annoncés par la FAA.

Le tableau ci-dessous présente les variations pour chaque indicateur :

Indicateur	Variation maximale	Variation moyenne
Longueur	1 %	0,5 %
Largeur	3 %	2 %
Surface	8 %	5 %



PGS avec INM 6.1
(sans A320 ni DHC830)

PEB avec INM 6.1
(sans DHC830)

Courbes en noir : Courbes du scénario de référence
(sans A320 ni DHC 830)

3.9 TEMPERATURE

Paramètres	Valeur
Nombre total de mouvements annuels	PGS : 112.000 ; PEB : 170.000
Atterrissages / Décollages	50 % / 50 %
Types d'avions commerciaux	Notamment : B747-400, DHC830, B727-200Huskit
Répartition d'un avion selon les trajectoires	Cf. Annexes p. 4-5
Répartition Jour/Soirée/Nuit	Passagers : Jour : 70%, Soirée : 25%, Nuit : 5% Fret : Jour : 30%, Soirée : 10%, Nuit : 60%
Prise en compte de l'aviation générale	Oui
Profils au décollage	85 % MTOW
Version du modèle INM	6.0c
Température	A l'étude
Pente de l'ILS	3 °
Prise en compte du relief	Non
Modification du relief	Non
Dispersion des trajectoires	Non

Dans le calcul des courbes de bruit, la température intervient :

- lors de l'estimation de la poussée des moteurs. Cette poussée sert ensuite à calculer le niveau de bruit émis par l'avion, ainsi que l'altitude de l'avion en fonction de la distance qu'il parcourt (profil en altitude) ;
- lors du calcul de l'absorption atmosphérique. Cette absorption est due à l'agitation moléculaire de l'air situé entre la source sonore et le récepteur. Elle dépend de la température, de l'humidité relative et de la fréquence du son (spectre de la source). Les valeurs de l'absorption atmosphérique utilisées par INM sont détaillées dans le document SAE ARP 866A, [10].

Des simulations à 5°C, 10°C, 20°C et 25°C ont été réalisées, sur le PGS et le PEB. La température des cas de référence est de 15°C, et l'humidité relative est fixée à 70%. Les résultats sont présentés en Annexes (Graphes 42 à 44).

Entre 5°C et 25°C, on constate que les trois indicateurs (longueur, largeur, surface) croissent puis décroissent, en passant par un maximum. Ce maximum est atteint :

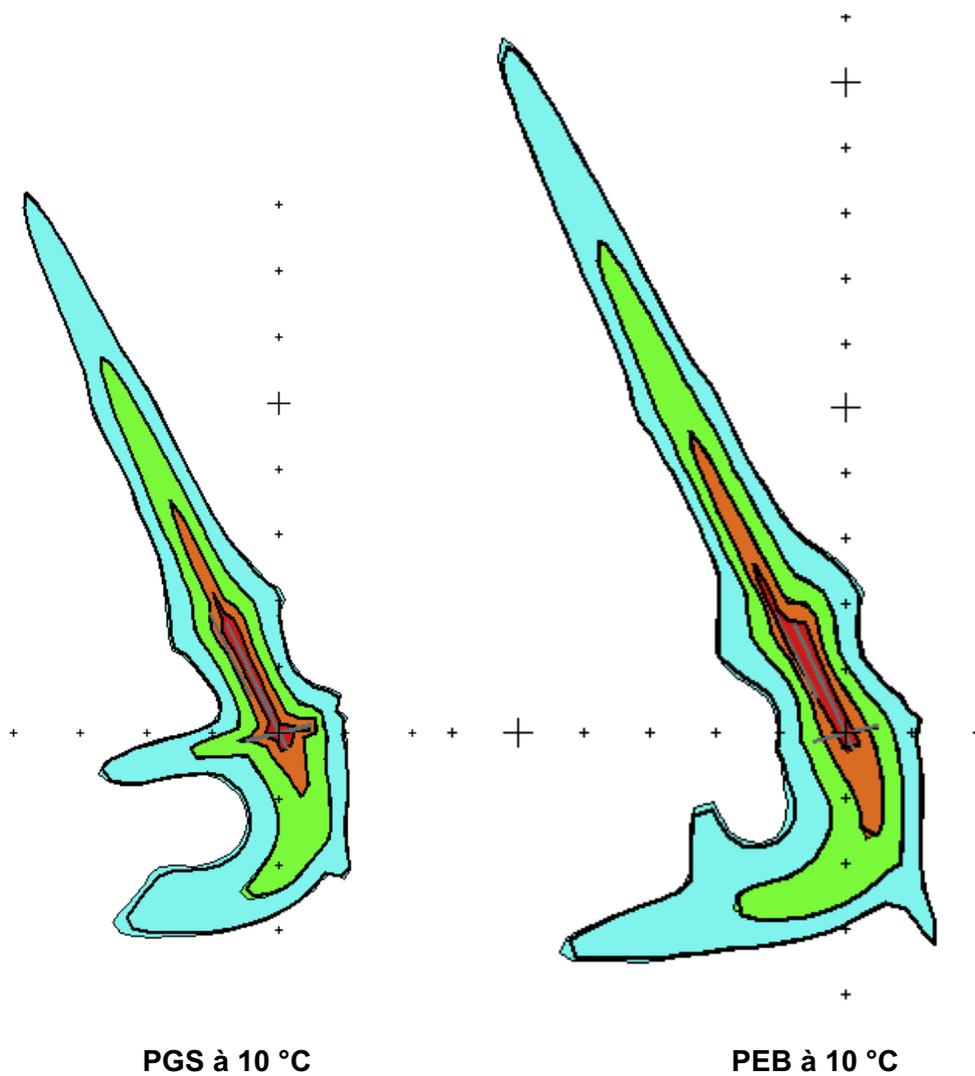
- à 15°C : pour la longueur des zones A et B ; pour la largeur de la zone A ; pour la surface de la zone A
- à 10°C : pour la longueur des zones C et D ; pour la largeur des zones B et C ; pour la surface de la zone C ; pour la surface de la zone B du PGS et celle de la zone d du PEB
- à 5°C : pour la largeur de la zone D ; pour la surface de la zone d du PGS.

L'impact final de la température sur les courbes d'exposition au bruit est donc un phénomène complexe qui résulte de la conjonction des effets de la température sur le niveau de bruit reçu, à savoir : la poussée des moteurs, l'altitude de l'avion au décollage, et l'absorption atmosphérique. Cette dernière fait aussi intervenir l'humidité relative et le spectre d'émission sonore de l'avion, et peut conduire à diminuer le bruit au niveau du récepteur dans des proportions très différentes, selon les conditions météorologiques, le type d'avion (spectre), et la distance source-récepteur.

Le tableau suivant donne les variations :

Indicateur	Variation maximale	Variation moyenne
Longueur	6 %	2 %
Largeur	13 %	4 %
Surface	16 %	5 %

Les courbes suivantes montrent l'impact de l'abaissement de la température de 15°C à 10°C. On constate une augmentation globale des courbes.



Courbes en noir : Courbes du scénario de référence

3.10 PENTE DE L'ILS

Paramètres	Valeur
Nombre total de mouvements annuels	PGS : 112.000 ; PEB : 170.000
Atterrissages / Décollages	50 % / 50 %
Types d'avions commerciaux	Notamment : B747-400, DHC830, B727-200Huskit
Répartition d'un avion selon les trajectoires	Cf. Annexes p. 4-5
Répartition Jour/Soirée/Nuit	Passagers : Jour : 70%, Soirée : 25%, Nuit : 5% Fret : Jour : 30%, Soirée : 10%, Nuit : 60%
Prise en compte de l'aviation générale	Oui
Profils au décollage	85 % MTOW
Version du modèle INM	6.0c
Température	15 °C
Pente de l'ILS	A l'étude
Prise en compte du relief	Non
Modification du relief	Non
Dispersion des trajectoires	Non

La pente de l'ILS est de 3° pour les scénarios PGS et PEB de référence. C'est la valeur standard de la pente d'approche aux instruments. Des simulations ont été effectuées avec des pentes de 3,5° et de 4°, plus rares mais aussi utilisées en pratique (Strasbourg-Entzheim : 3,5° en approche au QFU 05 ; Nice-Côte-d'Azur : 3,5° en approche au QFU 04L ; Marseille-Provence : 4° en approche au QFU 32R). Le changement de la pente de l'ILS ne modifie que la trajectoire des avions qui atterrissent, et n'a donc aucune conséquence sur le bruit dû aux avions qui décollent.

Les résultats sont présentés en Annexes (Graphes n°45 à 47). Le changement de la pente de l'ILS a un impact similaire sur le PGS ou le PEB. Lorsque la pente de l'ILS augmente, le scénario devient moins bruyant (les trois indicateurs diminuent pour toutes les zones). Les variations des indicateurs sont comprises entre 0 et -13%. Par ailleurs, plus la zone est d'indice faible, plus elle est sensible. La zone D est la zone la plus sensible.

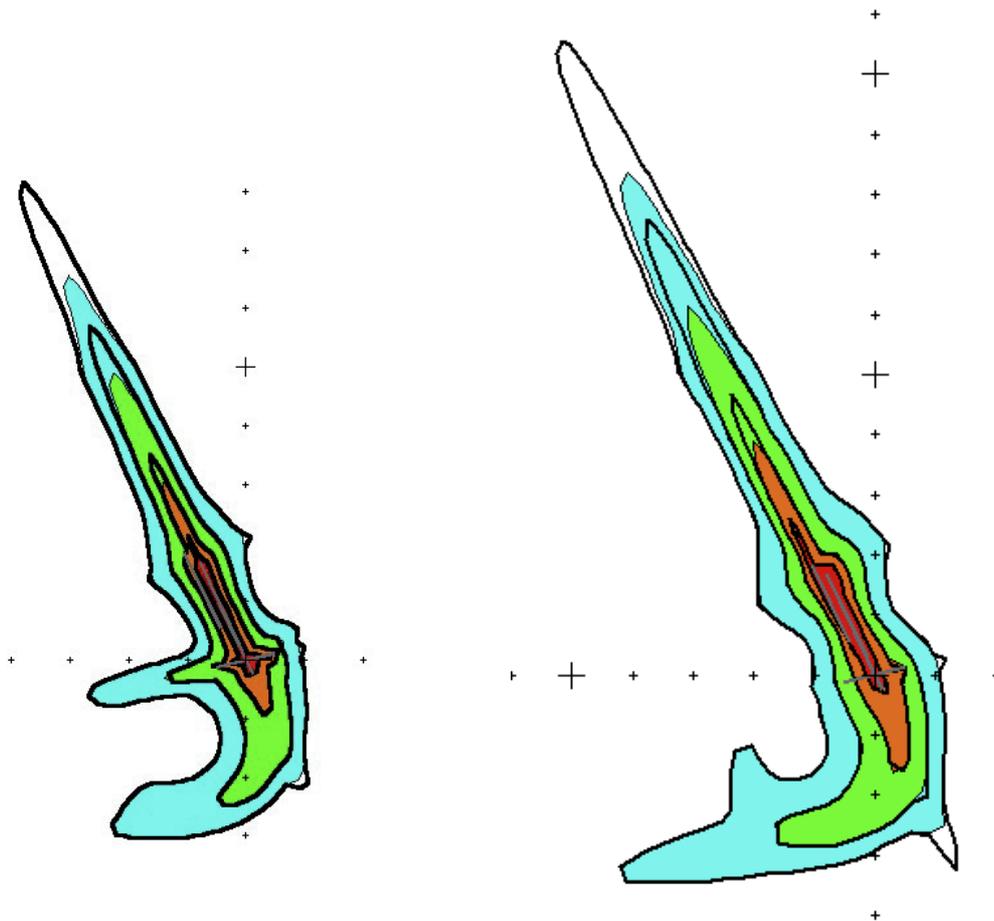
L'impact d'une modification de la pente de l'ILS est localisé. L'observation des zones (voir schéma ci-avant) montre aussi que ces zones sont principalement raccourcies sous les trajectoires d'atterrissage en QFU 16, c'est-à-dire dans les régions où le nombre des avions à l'atterrissage domine largement celui des décollages : 281 arrivées en QFU 16 contre 54 départs en QFU 34.

50 % des vols sont concernés par la modification de la pente de l'ILS (il s'agit des arrivées). Les variations sont présentées dans le tableau suivant :

Indicateur	Variation maximale	Variation moyenne
Longueur	8 %	6 %
Largeur	5 %	1 %
Surface	6 %	3 %

Les résultats obtenus ici de manière théorique tendent à montrer qu'un relèvement de la pente de l'ILS diminuerait l'impact sonore des atterrissage. Cependant, il est à noter que des études pratiques ont montré que ce gain était très limité. L'étude du National Aerospace Laboratory des Pays-Bas [11] explique qu'avec une pente de l'ILS de 3,2° au lieu de 3°, les pilotes ont tendance à configurer les avions avec tous les volets sortis, à cause de

l'augmentation du taux de descente et de la crainte de déclencher l'alerte du système embarqué d'anticollision avec le sol. L'étude montre dans ce cas que l'impact sonore est moindre lorsqu'une approche classique à 3° est effectuée. Une autre étude réalisée en 1999 par Airbus [12] montre que le relèvement de la pente de l'ILS à 3,5° et 4,0° apporte un gain acoustique qui reste localisé sous trace, entre 13 km et 17 km du seuil de piste, et que ce gain disparaît lorsqu'on s'éloigne de l'axe de vol, où l'influence de « l'effet de sol » diminue le gain acoustique apporté par le relèvement de l'ILS.



PGS avec ILS à 4°

PEB avec ILS à 4°

Courbes en noir : Courbes du scénario de référence

3.11 RELIEF

3.11.1 RELIEF AUTOUR DE L'AEROPORT DE BALE-MULHOUSE

Paramètres	Valeur
Nombre total de mouvements annuels	PGS : 112.000 ; PEB : 170.000
Atterrissages / Décollages	50 % / 50 %
Types d'avions commerciaux	Notamment : B747-400, DHC830, B727-200Huskit
Répartition d'un avion selon les trajectoires	Cf. Annexes p. 4-5
Répartition Jour/Soirée/Nuit	Passagers : Jour : 70%, Soirée : 25%, Nuit : 5% Fret : Jour : 30%, Soirée : 10%, Nuit : 60%
Prise en compte de l'aviation générale	Oui
Profils au décollage	85 % MTOW
Version du modèle INM	6.0c
Température	15 °C
Pente de l'ILS	3 °
Prise en compte du relief	A l'étude
Modification du relief	Non
Dispersion des trajectoires	Non

Il est possible de prendre en compte le relief dans le calcul des courbes de bruit. Pour cela, INM utilise un fichier de relief avec un format spécifique (.3TX). Ce type de fichier couvre une zone carrée de 1° de longitude par 1° de latitude. La zone couverte est modélisée par une grille de point espacés de 3" secondes d'arc en latitude et en longitude (environ 93 m). Le fichier contient l'altitude de chacun des points de cette grille. Ce fichier est donc le résultat d'une modélisation numérique du terrain.

Le fichier de relief utilisé a été fourni par l'IGN au format approprié. Il est dérivé de la Bd Alti de l'IGN. Dans la région considérée (Bâle-Mulhouse), l'altitude de aéroport est de 270 m (altitude de l'ARP). Les zones s'étendent sur une région où l'altitude varie entre 240 m et 490 m.

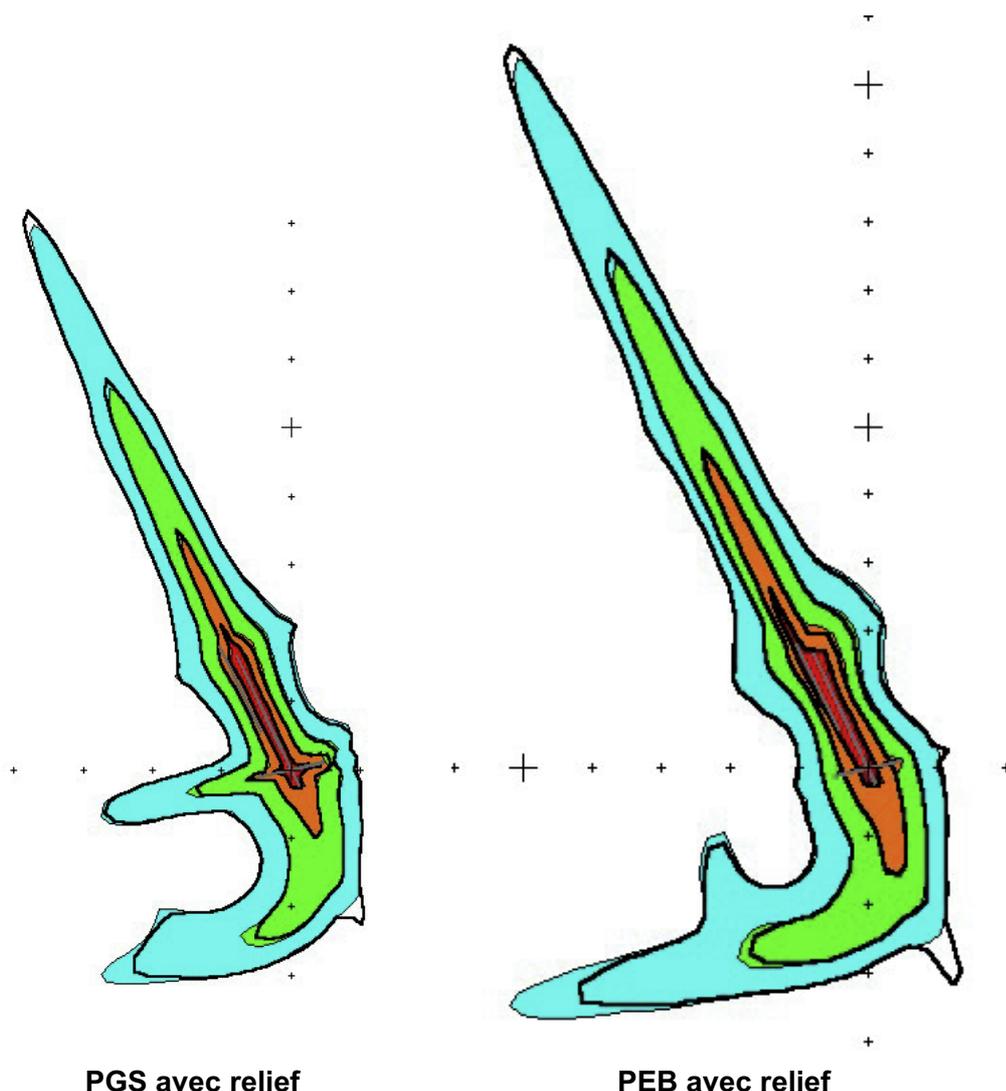
La prise en compte du relief dans le modèle de bruit INM n'intervient que dans le calcul de la distance entre l'émetteur (avion) et le récepteur (point au sol). Ainsi, les effets de masques et de réflexions ne sont pas pris en compte

Les résultats (Annexes – Graphes 48 à 53) montrent que les variations absolues sont de l'ordre de 50 à 300 mètres pour la longueur et la largeur des zones, et de 1 à 2 km² pour la surface.

Au voisinage de l'aéroport, c'est-à-dire pour les zones A et B, le relief varie peu (+/- 20 m). L'impact du relief est essentiellement localisé sous les trajectoires de décollage face au Sud, c'est-à-dire là où les plus hautes collines sont situées. Leur hauteur par rapport aux pistes est de 220 m au maximum. Ce sont surtout les zones C et D qui sont concernées par ces collines.

Le tableau ci-dessous donne les variations pour chaque indicateur :

Indicateur	Variation maximale	Variation moyenne
Longueur	5 %	2 %
Largeur	11 %	6 %
Surface	4 %	2 %



PGS avec relief

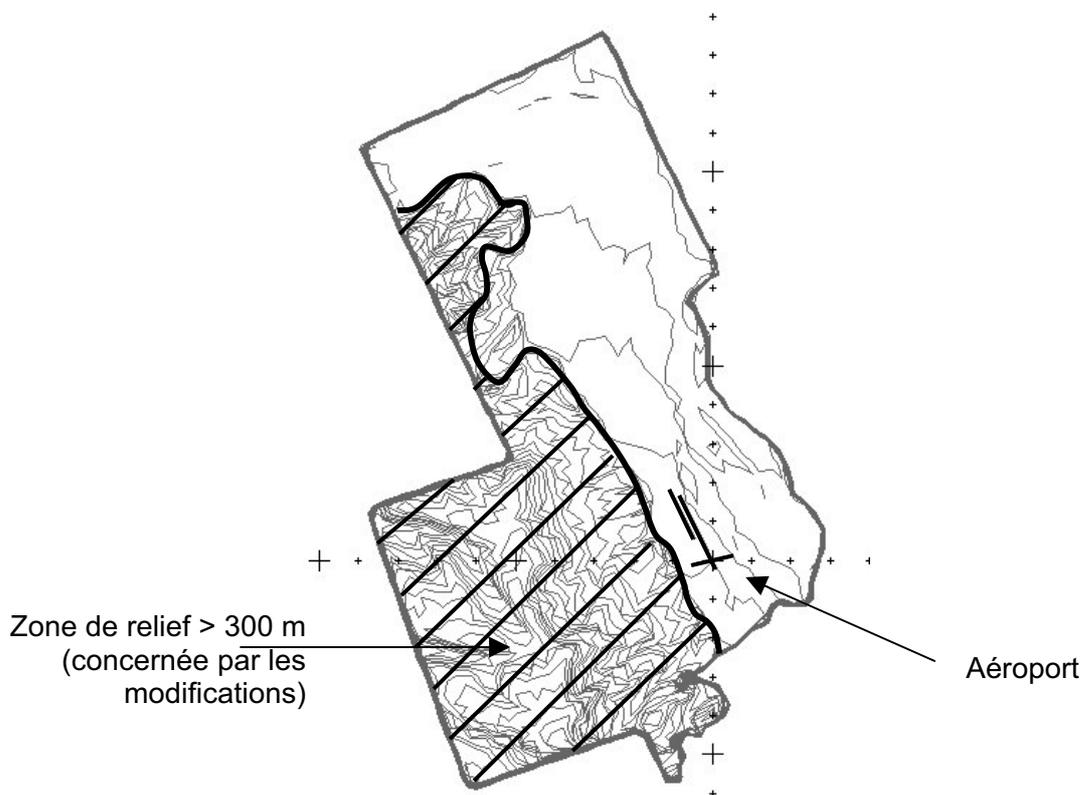
PEB avec relief

Courbes en noir : Courbes du scénario de référence

3.11.2 MODIFICATION DU RELIEF

Paramètres	Valeur
Nombre total de mouvements annuels	PGS : 112.000 ; PEB : 170.000
Atterrissages / Décollages	50 % / 50 %
Types d'avions commerciaux	Notamment : B747-400, DHC830, B727-200Huskit
Répartition d'un avion selon les trajectoires	Cf. Annexes p. 4-5
Répartition Jour/Soirée/Nuit	Passagers : Jour : 70%, Soirée : 25%, Nuit : 5% Fret : Jour : 30%, Soirée : 10%, Nuit : 60%
Prise en compte de l'aviation générale	Oui
Profils au décollage	85 % MTOW
Version du modèle INM	6.0c
Température	15 °C
Pente de l'ILS	3 °
Prise en compte du relief	Oui
Modification du relief	A l'étude
Dispersion des trajectoires	Non

Afin de tester plusieurs cas différents de relief, avec des collines plus ou moins hautes, le fichier « .3TX » du relief de la zone considérée a été modifié. A partir de 300 mètres d'altitude, l'altitude des points a été augmentée de 25, 50, 100, 150 et 200 mètres, ou diminuée de 25, 50, 100, 150 et 200 mètres. Dix nouvelles simulations ont donc été réalisées, pour chaque cas de référence (PGS et PEB). Les zones concernées par les modifications du relief sont figurées sur le schéma ci dessous :



Les résultats sont présentés en annexes (graphes 54 à 56). Les zones A et B couvrent des régions non concernées par les modifications du relief et demeurent peu modifiées. Une partie des zones C et D couvre la région concernée par les modifications du relief. C'est celle située sous les trajectoires de décollage face au Sud (QFU 16). La largeur des zones reste inchangée dans toutes les simulations.

Plus le relief est prononcé (altitude augmente), plus la longueur et la surface des zones augmentent. Lorsque le relief est de moins en moins prononcé (altitude diminue), la longueur et la surface des zones diminuent. En effet, lorsque la distance entre l'avion et le sol diminue, le Lden augmente, et lorsque celle-ci diminue, le Lden augmente.

Dans le cas présent, l'ordre de grandeur de l'allongement (zones C et D) est de l'ordre de + 100 m pour 10 m de relief en plus.

Le tableau ci-dessous donne les variations pour chaque indicateur :

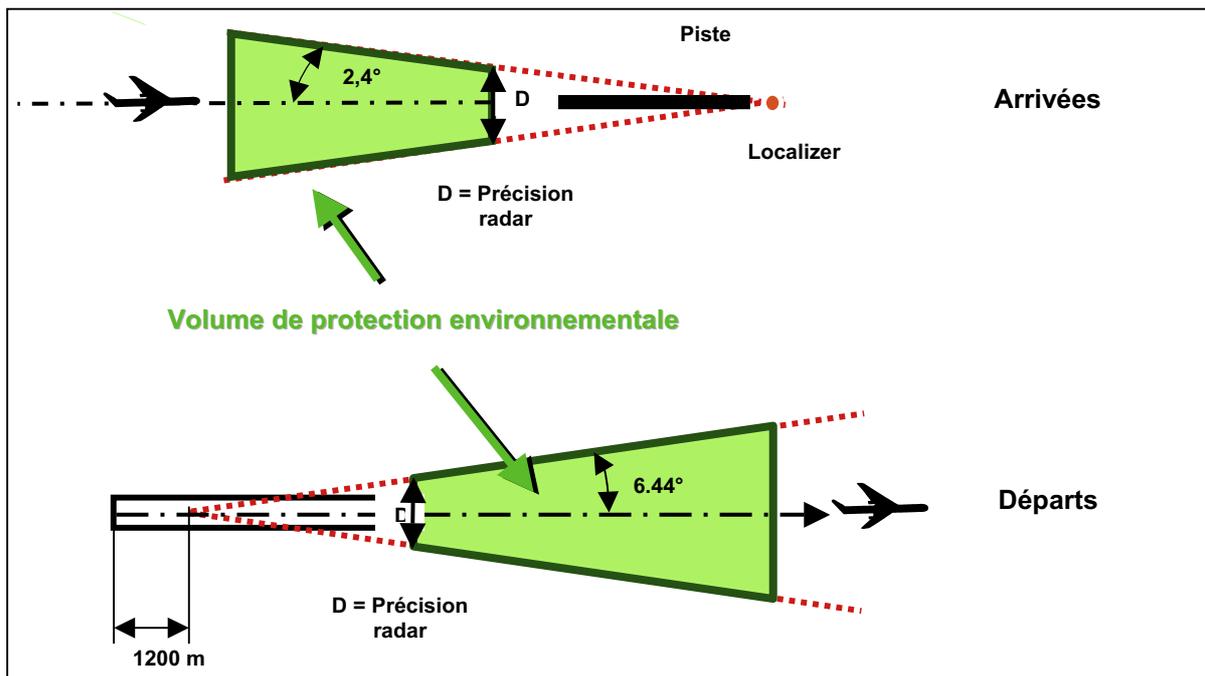
Indicateur	Variation maximale	Variation moyenne
Longueur	10 %	2 %
Largeur	0 %	0 %
Surface	11 %	1,5 %

Remarque : Les scénarios de référence pour le calcul des variations ci-dessus sont ceux des PGS et PEB avec le relief réel.

3.12 DISPERSION

Paramètres	Valeur
Nombre total de mouvements annuels	PGS : 112.000 ; PEB : 170.000
Atterrissages / Décollages	50 % / 50 %
Types d'avions commerciaux	Notamment : B747-400, DHC830, B727-200Huskit
Répartition d'un avion selon les trajectoires	Cf. Annexes p. 4-5
Répartition Jour/Soirée/Nuit	Passagers : Jour : 70%, Soirée : 25%, Nuit : 5% Fret : Jour : 30%, Soirée : 10%, Nuit : 60%
Prise en compte de l'aviation générale	Oui
Profils au décollage	85 % MTOW
Version du modèle INM	6.0c
Température	15 °C
Pente de l'ILS	3 °
Prise en compte du relief	Non
Modification du relief	Non
Dispersion des trajectoires	A l'étude

Les angles des volumes de protection environnementales (VPE) sont de 6,44° au départ et 2,4 ° à l'arrivée (Voir schéma ci-dessous). Lorsque des VPE sont publiés sur un aéroport, les avions doivent les respecter, et par conséquent leur dispersion reste comprise à l'intérieur des cônes des VPE.



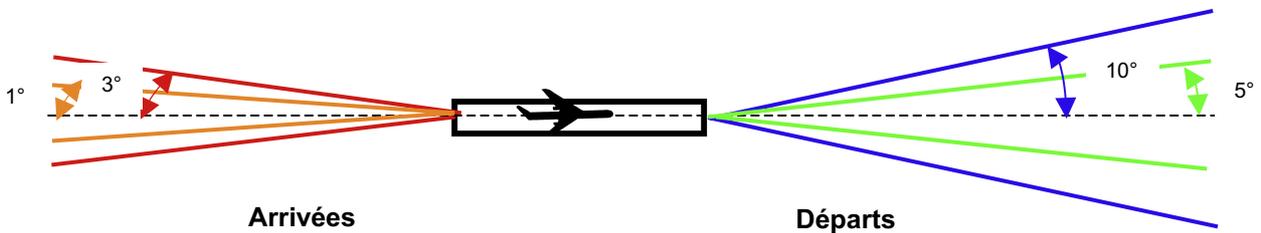
Source : Réseau environnement de la DGAC

Par ailleurs, en l'absence, de mesure sur la dispersion des routes réelles, la circulaire 205-AN/1/25 de l'OACI préconise une dispersion par défaut comprise entre 6° et 11° pour les décollages.

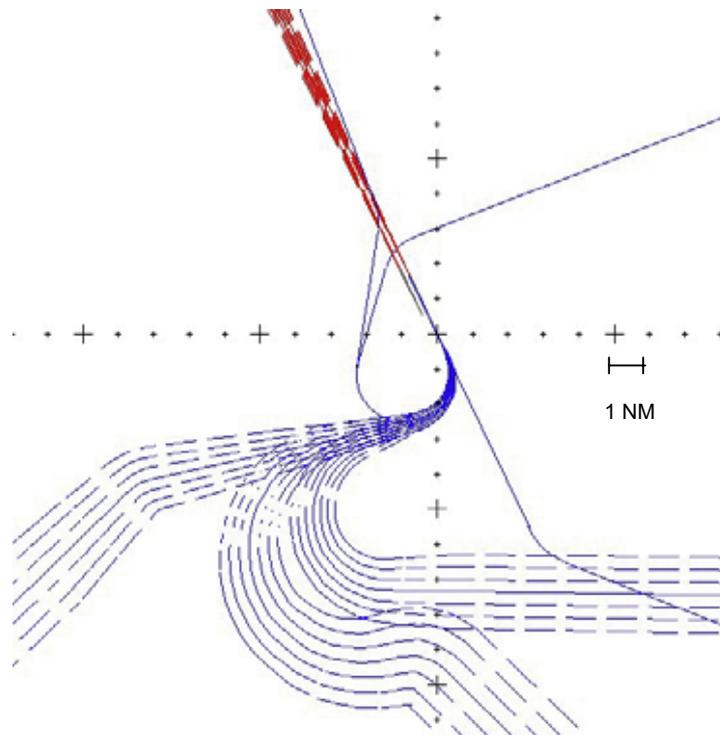
Dans cette étude, deux cas de dispersion ont été étudiés (Voir schéma ci-dessous) :

- Dispersion faible : 5° de dispersion au départ ; 1° de dispersion à l'arrivée
- Dispersion forte : 10° de dispersion au départ ; 3° de dispersion à l'arrivée

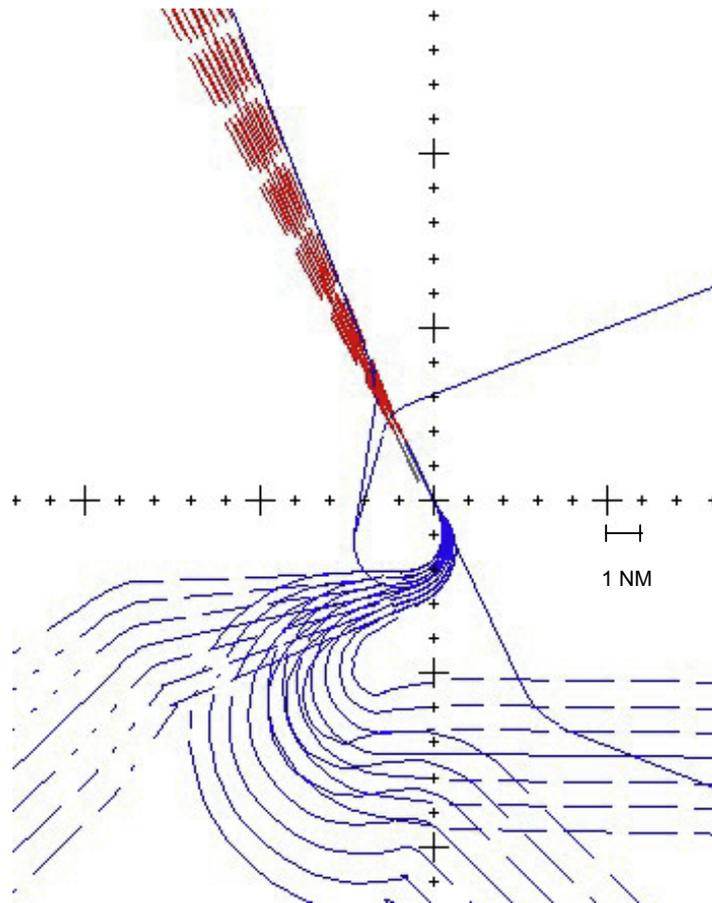
Ces deux cas sont théoriques. Ils ne prennent en compte ni la publication de VPE localement, ni le traitement des trajectoires RADAR (chevelus) à l'aide d'outils appropriés, qui restent les seuls moyens garantissant une modélisation précise de la dispersion réelle des avions.



A l'intérieur de chaque cône de dispersion, 7 sous-trajectoires ont été modélisées sous INM : la trajectoire nominale et 3 trajectoires symétriques de chaque côté. Une distribution gaussienne a été appliquée pour répartir le nombre de mouvements entre les sous-trajectoires. Par mesure de simplification, seules les 5 trajectoires les plus utilisées (2 arrivées en QFU 16, 3 départs en QFU 16) ont été « dispersées ». En moyenne sur tous les scénarios calculés, 59 % des vols ont été dispersés.



Trajectoires dispersées sous INM (1° Arrivées / 5° Départs)
(Dispersion faible)



**Trajectoires dispersées sous INM (3° Arrivées / 10° Départs)
(Dispersion forte)**

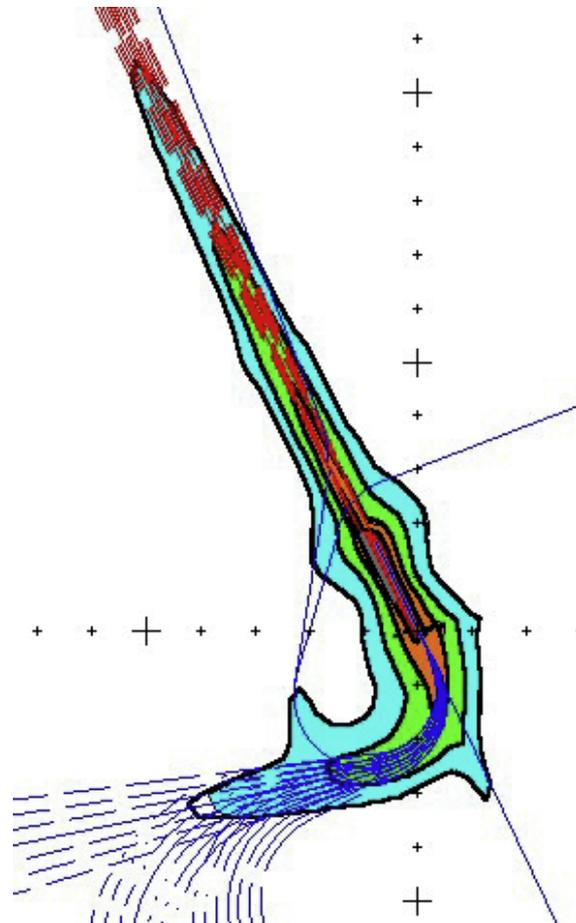
Les résultats sont présentés en Annexes (Graphes 57 à 62). Le tableau suivant donne les variations pour les dispersions faibles et fortes (59 % des vols empruntent des trajectoires dispersées) :

Indicateur	Variation maximale	Variation moyenne
Longueur	6,5 %	2%
Largeur	0 %	0 %
Surface	1,5 %	0,5 %

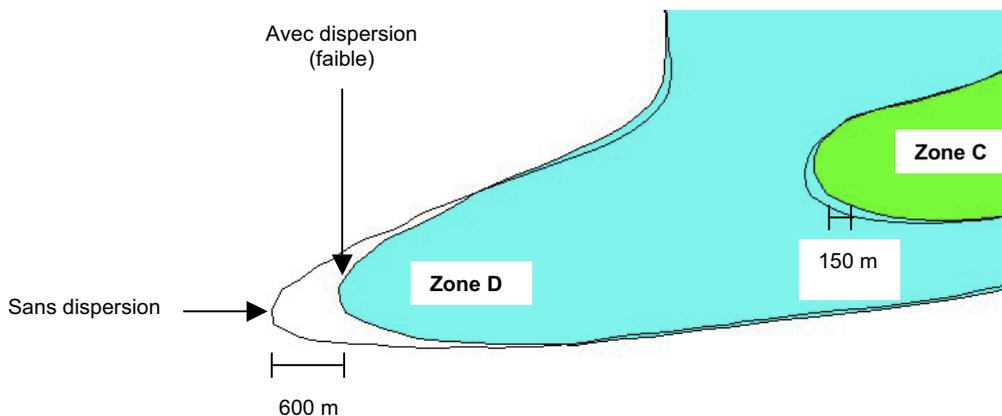
On constate que la dispersion n'a aucun effet sur la largeur des zones (largeur au seuil 16L), et qu'elle a un effet très limité sur la surface des zones. En fait, l'impact de la dispersion est localisé sous les traces au sol des trajectoires nominales concernées par cette dispersion. On note localement, aux extrémités des zones, à la fois un rétrécissement de la longueur de ces zones et une augmentation de leur largeur (voir les schémas suivants). Plus la dispersion est forte, plus ce phénomène s'amplifie.

La dispersion des trajectoires provoque donc un rétrécissement (en longueur) et un gonflement (en largeur) aux extrémités des zones. L'indice Lden est en effet un indice d'exposition au bruit. Il est calculé à partir de la somme des « énergies sonores » des avions, et non pas à partir de niveaux de bruit maximaux. L'ajout des énergies sonores en un point

donné contribue donc à l'augmentation du Lden en ce point. Ainsi, la dispersion des trajectoires entraîne une dispersion des niveaux de bruit au sol. Il en résulte une diminution du Lden des points situés vers le centre du faisceau de dispersion (sous la trajectoire nominale) et une augmentation du Lden des points situés vers les bords de ce faisceau de dispersion. Cela explique le phénomène de rétrécissement-gonflement aux extrémités des zones.



Effet de la dispersion sur le PEB
(1° Arrivées / 5° Départs)



Effet de la dispersion sous la trace des départs en QFU 16 du PEB
(1° Arrivées / 5° Départs)

4 CONCLUSION

4.1 SYNTHÈSE DES VARIATIONS OBTENUES

Paramètres de trafic	Variation moyenne			Variation maximale		
	Longueur	Largeur	Surface	Longueur	Largeur	Surface
Nombre total de mouvements (+ ou – 25 %)	9 %	12 %	19 %	14 %	18 %	21 %
Atterrissages/Décollages	25 %	71 %	70 %	32 %	76 %	82 %
Types d'avions commerciaux	6 %	10 %	15 %	14 %	17 %	30 %
Répartition d'un avion sur les trajectoires	1,5 %	1 %	1,5 %	2 %	1 %	3,5 %
Répartition Jour/Soirée/Nuit	2 %	2 %	4 %	4 %	5 %	7 %
Aviation générale	0 %	6 %	2 %	0,5 %	25 %	2%

Paramètres de modélisation	Variation moyenne			Variation maximale		
	Longueur	Largeur	Surface	Longueur	Largeur	Surface
Profils au décollage	7 %	4 %	10 %	14 %	11 %	15 %
Version du modèle INM	0,5 %	2 %	5 %	1 %	3 %	8 %
Température	2 %	4 %	5 %	6 %	13 %	16 %
Pente de l'ILS	6 %	1 %	3 %	8 %	5 %	6 %
Relief (Prise en compte)	2 %	6 %	2 %	5 %	11 %	4 %
Relief (Modification)	2 %	0 %	1,5 %	10 %	0 %	11%
Dispersion	2 %	0 %	0,5 %	6,5 %	0 %	1,5 %

Le tableau ci-dessus regroupe les variations obtenues. D'une manière générale, le modèle réagit au moindre changement d'un paramètre et la modification d'un paramètre influence les trois indicateurs : longueur, largeur, et surface. Cependant, les paramètres ont des effets différents sur ces trois indicateurs, et donc sur la géométrie des zones. Certains paramètres agissent plutôt sur la longueur, d'autres sur la largeur, et d'autres sur la surface toute entière. Il y a donc une sensibilité des indicateurs (longueur, largeur et surface) selon les paramètres. Ce point fait l'objet du 4.2.

Les modifications d'un paramètre influencent chaque zone de manière différente. Ainsi, les variations diffèrent selon les zones A, B, C ou D. Certaines zones sont plus sensibles que d'autres à certains paramètres. La sensibilité des zones (A, B, C ou D) selon les paramètres est traitée au 4.3.

Les résultats montrent aussi que les modifications des paramètres n'ont pas le même impact sur les courbes de bruit, c'est-à-dire qu'il existe une sensibilité différente des courbes de bruit selon le paramètre modifié. Certains paramètres ont un impact global, d'autres un impact très localisé. La sensibilité des paramètres ainsi que leur type d'impact est analysée au 4.4.

Enfin, les limites de cette étude sont exposées au 4.5.

4.2 SENSIBILITE DES INDICATEURS

Les résultats montrent que la sensibilité dépend de l'indicateur choisi (longueur, largeur ou surface). D'une manière générale, **la surface est l'indicateur le plus sensible**, en terme de variation (moyenne ou maximale). Puis vient la largeur, et enfin la longueur.

Paramètre	Indicateur le plus touché	Indicateur le moins touché
Nombre total de mouvements (+ ou - 25 %)	Surface	Largeur
Impact des Décollages/Atterrissages	Surface	Longueur
Types d'avions commerciaux	Surface	Longueur
Répartition d'un avion sur les trajectoires	Surface	Largeur
Répartition Jour/Soirée/Nuit	Surface	Longueur
Aviation générale (Prise en compte)	Largeur	Longueur
Profils au décollage	Surface	Largeur
INM 6.1	Surface	Longueur
Température	Surface	Longueur
Pente de l'ILS	Longueur	Largeur
Relief (Prise en compte)	Largeur	Longueur / Surface
Relief (Modification)	Longueur / Surface	Largeur
Dispersion	Longueur	Largeur

Sensibilité des indicateurs selon les paramètres

4.3 SENSIBILITE DES ZONES

En définissant la zone la plus sensible comme étant celle pour laquelle les variations maximales sont atteintes le plus souvent, on constate que **la zone D est la zone la plus sensible**. On constate par ailleurs que la zone B est plus sensible que la zone C. Les simulations réalisées ne permettent pas d'expliquer ce phénomène. Les zones les plus sensibles sont dans l'ordre décroissant : D, puis B, puis C et A.

Au delà de ces considérations techniques, il faut aussi noter qu'en raison de l'étendue des zones C et D, les modifications concernant ces zones sont généralement les plus grandes en valeur absolues et donc les plus « visibles » sur une carte. Par ailleurs, la zone C est la plus grande zone du PEB où les constructions de lotissements ou d'immeubles collectifs restent interdites. Ainsi, une légère augmentation de sa surface (ou longueur, ou largeur), notamment au niveau d'une zone urbanisée, sera probablement mal perçue par la commune concernée.

Paramètre	Zone pour laquelle la variation maximale est atteinte		
	Longueur	Largeur	Surface
Nombre total de mouvements (+ ou - 25 %)	B	D	B
Impact des Décollages/Atterrissages seuls	A	A	A
Types d'avions commerciaux	B	C	B
Répartition d'un avion sur les trajectoires	D	A	D
Répartition Jour/Soirée/Nuit	B	D	B
Aviation générale	D	D	D
Profils au décollage	B	D	B
INM 6.1	B	C	D
Température	D	D	D
Pente de l'ILS	D	D	D
Relief (Prise en compte)	D	B	A
Relief (Modification)	D	-	C
Dispersion	C	-	D

La sensibilité des zones selon les paramètres

4.4 SENSIBILITE DES PARAMETRES

4.4.1 QUEL IMPACT : GLOBAL OU LOCALISE ?

Certains paramètres ont un impact global (i.e. gonflement ou rétrécissement de l'ensemble du contour de chaque courbe de bruit), d'autres un impact localisé (i.e. gonflement ou rétrécissement d'une seule partie du contour des courbes de bruit). Cependant, les variations étudiées traduisent mal ce phénomène de localisation, car ce sont des descripteurs globaux. Une certaine hétérogénéité entre les variations maximales des 3 indicateurs peut indiquer une localisation des impacts. C'est le cas pour l'aviation générale (variation maximale très importante uniquement pour la largeur), et la dispersion (variation maximale importante uniquement pour la longueur). Mais seule la visualisation des courbes de bruit permet d'identifier facilement si l'impact est global ou localisé. Le tableau suivant présente les différents types d'impacts pour les 12 paramètres étudiés :

Type d'impact	Type de paramètre	
	Paramètres liés aux hypothèses de trafic	Paramètres de la modélisation
Global	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nombre total de mouvements ▪ Types d'avions commerciaux ▪ Répartition Jour/Soirée/Nuit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Version du modèle INM ▪ Température
Localisé	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Impact des décollages/atterrissages seuls ▪ Répartition d'un avion au décollage selon les trajectoires ▪ Aviation générale 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Profils au décollage ▪ Pente de l'ILS ▪ Relief ▪ Dispersion

Type d'impact (global / local) des paramètres

On constate que les paramètres comme le nombre total de mouvements, les types d'avions commerciaux, la répartition Jour/Soirée/Nuit, la version du modèle INM et la température ont un impact global. Ceci est logique puisque ces paramètres concernent soit l'ensemble du trafic (nombre total de mouvements, version du modèle INM et température), soit le trafic commercial qui est réparti sur toutes les trajectoires hormis celles spécifiques à l'aviation générale (les types d'avions commerciaux, la répartition Jour/Soirée/Nuit).

Les paramètres qui concernent uniquement les atterrissages (la pente de l'ILS), ou uniquement les décollages (les profils, la répartition d'un avion au décollage selon les trajectoires) ont un impact localisé au niveau des trajectoires empruntées respectivement par les atterrissages ou par les décollages. L'impact de l'aviation générale est localisé sous les trajectoires spécifiquement empruntées par ce type d'aviation. La prise en compte du relief a un impact fortement localisé sur les collines survolées par les décollages face au Sud. De même, la prise en compte de la dispersion a un impact fortement localisé aux extrémités des courbes de bruit, sous les trajectoires dispersées.

4.4.2 INTERETS DE LA VARIATION MOYENNE DE LA SURFACE

C'est la **variation moyenne** qui sera utilisée pour classer les différents paramètres selon leur sensibilité. Elle traduit des effets moyens qui sont observés dans les différents scénarios dérivés et pour les différentes zones. La variation maximale traduit quant à elle des effets extrêmes ou des phénomènes marginaux (zone D très sensible, paramètre influençant fortement un seul indicateur, valeur du paramètre excessive dans un scénario dérivé). En conséquence, elle ne sera pas utilisée pour ce classement.

En outre, c'est la **variation moyenne de l'indicateur surface** qui sera utilisée pour classer les paramètres selon leur sensibilité. C'est en effet la surface qui est l'indicateur le plus sensible, et c'est aussi la surface qui traduit le mieux l'exposition au bruit au sol, l'étendue des zones concernées par un niveau d'exposition au bruit.

4.4.3 IMPACTS LIES AU POURCENTAGE DE VOLS CONCERNES

La variation moyenne de la surface a cependant des limites. Elle donne un ordre de grandeur de la variation qui pourrait être obtenue en cas de modification d'un paramètre, mais elle ne permet pas de comparer objectivement les effets des différents paramètres entre eux. En effet, dans la plupart des cas, la modification d'un paramètre ne concerne qu'une partie du trafic. Toutes les variations obtenues (moyenne ou maximale, pour la longueur, largeur ou surface) sont alors liées au nombre de vols concernés. Par exemple, la variation moyenne de l'indicateur surface pour le paramètre « prise en compte de l'aviation générale » est de 2%, mais cette variation est calculée sur des scénarios avec 9 % de mouvements en moins par rapport aux scénarios de référence.

Afin de pouvoir comparer les variations des différents paramètres étudiés, il faut rapporter ces variations au pourcentage de vols concernés par la modification des paramètres. Le tableau suivant présente un indice de sensibilité, défini comme étant le rapport entre la variation moyenne de la surface et le pourcentage de vols concernés.

Paramètres de trafic	Variation moyenne de la surface (Var)	Pourcentage de vols concernés (Vols)	Indice de sensibilité (= Var / Vols)
Nombre total de mouvements (+ ou – 25 %)	19 %	25 %	0,76
Impact des atterrissages ou des décollages seuls	70 %	50 %	1,40
Types d'avions commerciaux	15 %	11 %	1,36
Répartition d'un avion sur les trajectoires	1,5 %	0,3 %	5,00
Répartition Jour/Soirée/Nuit	4 %	3 %	1,33
Aviation générale	2 %	9 %	0,22

Paramètres de modélisation	Variation moyenne de la surface (Var)	Pourcentage de vols concernés (Vols)	Indice de sensibilité (= Var / Vols)
Profils (masses) au décollage	10 %	26 %	0,38
Version du modèle : INM 6.1	5 %	100 %	0,05
Température	5 %	100 %	0,05
Pente de l'ILS	3 %	50 %	0,06
Relief (Prise en compte)	2 %	100 %	0,02
Relief (Modification)	1,5 %	100 %	0,015
Dispersion	0,5 %	59 %	0,008

Indice de sensibilité des paramètres

4.4.4 DES PARAMETRES TRES SENSIBLES, SENSIBLES, OU LOCALEMENT (TRES) SENSIBLES

Selon l'indice de sensibilité défini au 4.4.2, le classement des paramètres des plus sensibles aux moins sensibles serait (sensibilité décroissante) :

- Répartition des avions au décollage (chapitre 3 bruyants) selon les trajectoires
- Impact des atterrissages seuls ou des décollages seuls
- Types d'avions commerciaux
- Répartition Jour/Soirée/Nuit
- Nombre total de mouvements
- Profils (Masses) au décollage
- Prise en compte de l'aviation générale
- Pente de l'ILS
- Température
- Version du modèle INM
- Relief
- Dispersion

L'analyse des différents types d'impacts (global, local) et des indices de sensibilité (variations moyennes de la surface rapportées au nombre de vols concernés) permet de distinguer 3 groupes de paramètres :

→ Paramètres très sensibles :

- **Répartition des avions au décollage (notamment les plus bruyants) selon les différentes trajectoires**
- **Impact des atterrissages seuls, ou des décollages seuls**
- **Types d'avions**
- **Répartition Jour/Soirée/Nuit des avions commerciaux**
- **Nombre total de mouvements**

Les paramètres très sensibles sont des paramètres liés aux hypothèses de trafic : ces paramètres définissent le scénario de trafic. Tous ont un impact global sur les courbes de bruit.

L'impact cumulé de plusieurs paramètres très sensibles doit aussi être considéré comme étant très sensible, même si l'étude n'a pas traité ce type impact. Ainsi, le nombre de mouvements par types d'avions, la répartition Jour/Soirée/Nuit selon les types d'avions et les trajectoires sont aussi des exemples de paramètres très sensibles.

Ces paramètres doivent être choisis ou définis de manière très précise lors de la définition des hypothèses de trafic. La connaissance du type, de la série et de la motorisation de chaque avion est cruciale. La répartition sur les trajectoires, les types d'avions, la répartition Jour/Soirée/Nuit, le nombre total de mouvements doivent donc être définis avec la plus grande précision. Ces données doivent être d'autant plus précises qu'elles concernent des avions particulièrement bruyants, ou des avions au décollage ou encore des avions avec un trafic élevé sur l'aérodrome.

→ Paramètres sensibles :

- **Masses des avions au décollage (profils)**
- **Prise en compte de l'aviation générale**
- **Pente de l'ILS**
- **Température**
- **Version du modèle INM**

Hormis la prise en compte de l'aviation générale, qui est un paramètre lié aux hypothèses de trafic, **les paramètres sensibles sont des paramètres de modélisation**. Ils ne sont pas vraiment modifiables dans le scénario de trafic et doivent être considérés comme des paramètres fixés du début à la fin d'un projet de PGS ou de PEB.

→ **Paramètres localement sensibles (voire localement très sensibles) :**

- **Relief (prise en compte, modification)**
- **Dispersion**

Ces paramètres ont un impact fortement localisé. La variation moyenne de la surface reflète mal leur impact, qui reste faible sur la surface globale, mais qui localement occasionne des variations pouvant être comparables à une augmentation ou une diminution du nombre total de mouvements de 25%. **Les paramètres localement (très) sensibles sont des paramètres de modélisation.**

4.4.5 RELATION ENTRE L'IMPACT D'UN PARAMETRE QUELCONQUE ET CELUI DU NOMBRE TOTAL DE MOUVEMENTS

La surface des zones est approximativement proportionnelle au nombre total de mouvements (3.1.8). Cela signifie que :

« Pour un scénario donné, la variation du nombre total de mouvements de xx %, toutes choses restant égales par ailleurs, entraîne une variation de la surface des zones de xx % environ. »

Deux simulations complémentaires ont permis de vérifier qu'une variation du nombre total de mouvements de +/- 10 % entraîne une variation moyenne de la surface de 8%. Deux autres simulations ont aussi permis de vérifier qu'une variation du nombre total de mouvements de +/- 5 % entraîne une variation moyenne de la surface de 4%.

Réciproquement, on peut en déduire :

« Pour un scénario donné, toute variation de la surface des zones de xx % obtenue par la modification d'un paramètre quelconque aurait pu être obtenue par une variation du nombre total de mouvements de xx % environ. »

En effet, si la modification d'un paramètre quelconque entraîne une variation de la surface des zones de xx%, alors l'impact de ce paramètre (en terme de surface des zones) est proche de l'impact d'une variation de xx % du nombre total de mouvements.

☞ Le tableau suivant présente un classement des paramètres selon leur sensibilité, réalisé à partir de l'indice de sensibilité.

4.4.6 CONSEQUENCES SUR LES PEB/PGS

Classement des paramètres selon leur sensibilité		
Paramètre	Indice de sensibilité	Conséquences sur les PEB/PGS
Répartition des avions selon les différentes trajectoires Type : hypothèses de trafic	Très sensible (5,00)	La modification de la répartition des décollages d'un avion (chapitre 3 les plus bruyants) sur les trajectoires entraîne de fortes variations des courbes alors que le trafic de cet avion est faible (296 mouvements par an). Le décideur doit définir avec précision l'utilisation des pistes et des trajectoires par les avions bruyants au décollage , et le modélisateur doit prendre en compte précisément ces hypothèses dans le modèle, ou alerter le décideur en cas d'incertitude.
Impact des atterrissages seuls ou des décollages seuls Type : hypothèses de trafic	Très sensible (1,40)	L'étude de ce paramètre a permis de distinguer l'impact des décollages de celui des atterrissages : le bruit des décollages est prédominant sur celui des atterrissages pour la largeur (au niveau du seuil de piste) et pour la surface des zones , malgré une répartition équilibrée entre atterrissages et décollages. Il faut donc modéliser précisément les décollages, en particulier les décollages liés aux autres paramètres très sensibles : types d'avions au décollage, répartition Jour/Soirée/Nuit des décollages, nombre de mouvements des décollages.
Types d'avions Type : hypothèses de trafic	Très sensible (1,36)	En raison des fortes disparités acoustiques et de performances qui existent entre les différents types d'avions, il est nécessaire d'identifier avec précision les types d'avions fréquentant l'aérodrome : turbo-propulseurs ou jets, motorisation, chapitre 2 ou 3, avions plus ou moins bruyants du chapitre 3. Un avion (très) bruyant, même avec un trafic relativement faible, peut dimensionner la surface des zones.
Répartition Jour/Soirée/Nuit Type : hypothèses de trafic	Très sensible (1,33)	Les effets d'un changement de répartition peuvent être estimés en utilisant la notion de mouvements pondérés équivalents . Le report de 5 % de trafic du jour sur la nuit est équivalente à une augmentation de trafic global pouvant aller de 15% à 25% pour des cas usuels (%Jour compris entre 60% et 80%, et %Nuit compris entre 5% et 15%).
Nombre total de mouvements Type : hypothèses de trafic	Très sensible (0,76)	Le nombre total de mouvements pris en compte dans l'étude est déterminant , ainsi que le nombre d'atterrissages et de décollages. Il est possible de prévoir approximativement l'effet d'une augmentation ou d'une diminution de trafic : la surface des zones est proportionnelle au nombre total de mouvements .
Profil au décollage (Masse au décollage) Type : modélisation	Sensible (0,38)	En raison de la sensibilité des profils au décollage, il est nécessaire de connaître la masse des avions au décollage : Il faut distinguer les vols d'entraînement et les vols de mise en place, qui se font à masse minimale. Il faut aussi distinguer les vols long-courriers avec des coefficients de remplissage élevés vers certaines destinations, et qui se font à pleine charge . Pour les autres vols et en l'absence d'information, c'est le profil correspondant à un chargement à 85 % de la MTOW qui est doit être retenu.
Aviation générale Type : hypothèses de trafic	Sensible (0,22)	En présence d'un trafic commercial majoritaire, les effets de ce dernier couvrent ceux de l'aviation générale. Il n'est donc pas nécessaire de modéliser le trafic d'aviation générale de manière aussi précise que le trafic commercial . Cependant, pour un aérodrome d'aviation générale, il est nécessaire de décomposer et de distinguer les avions de manière précise (tours de pistes, bimoteurs, pas fixes ou pas variables, puissance du moteur), car une étude réalisée par le STBA sur Nangis-les-Loges montre que des variations importantes peuvent être obtenues selon le type d'avion choisi .
Pente de l'ILS Type : modélisation	Sensible (0,06)	En pratique, il est très difficile de modifier la pente de l'ILS. D'autres considérations doivent être prises en compte : obstacles, sécurité, circulation aérienne. Des études pratiques montrent des gains limités voire nuls, en terme d'exposition au bruit, [11] & [12].
Température Type : modélisation	Sensible (0,05)	En France métropolitaine, en l'absence de données spécifiques, prendre la température standard correspondant aux conditions atmosphériques ISA : 15°C.
INM 6.1 Type : modélisation	Sensible (0,05)	Des recherches améliorent régulièrement les modèles de bruit et leurs bases de données. Lorsqu'une étude est réalisée, le modèle et la version utilisés doivent être précisés . Il faut savoir expliquer et justifier les différences entre les différentes versions.
Relief Type : modélisation (Prise en compte) (Modification)	Localement (très) sensible (0,02) (0,015)	L'impact du relief est d'autant plus important que les zones de bruit couvrent des régions d'altitudes différentes de celle de la piste. Localement, les variations peuvent être équivalentes à celles d'une augmentation de 25% du nombre total de mouvements.
Dispersion Type : modélisation	Localement (très) sensible (0,008)	Pour les aérodromes où le guidage RADAR est effectué, une dispersion correspondant au flux de trajectoires RADAR peut être appliquée. Sinon, utiliser les VPE ou une dispersion « standard ».

4.5 LIMITES DE L'ETUDE

4.5.1 RAPPEL DES OBJECTIFS

Le but de cette étude était d'identifier les paramètres les plus sensibles dans la modélisation d'un PEB ou d'un PGS. Il s'agissait d'identifier les paramètres qui doivent être définis avec la plus grande précision par les personnes responsables des hypothèses de trafic des PEB/PGS (décideurs), et modélisés avec la même précision par les personnes responsables de la modélisation de ces PEB/PGS (modéliseurs).

4.5.2 DES RESULTATS LIES A LA METHODE

La première limite de la méthode est le choix des deux scénarios de référence. Les résultats obtenus sont liés au choix du site (Bâle-Mulhouse). Les avantages de ce choix sont : étude d'un cas concret donc réaliste, aéroport ni trop petit, ni trop grand (112.000 mouvements), deux ou trois pistes dont une croisée, trafic mixte (passagers, fret, aviation d'affaires et aviation générale), nombreuses trajectoires. Les inconvénients liés à ce choix sont : complexité d'interpréter les résultats (nombreuses interactions, difficulté à isoler les effets), résultats liés au choix du site (infrastructures, trajectoires, relief) et au trafic des cas de référence (nombre de mouvements, types d'avions, répartition des mouvements par types d'avions et par Jour/Soirée/Nuit).

La deuxième limite de la méthode est le choix des scénarios dérivés. Les résultats obtenus, (les variations) sont liés au choix des scénarios dérivés, c'est-à-dire au choix des limites à l'intérieur desquelles les paramètres varient. Même si les limites choisies s'expliquent et peuvent se rencontrer dans la réalité, les variations obtenues restent déterminées par ces choix.

Enfin, la troisième limite de cette étude est la définition d'un indice de sensibilité (4.4.3). En effet, certains paramètres concernent l'ensemble du trafic (la température), alors que d'autres n'en touchent qu'une partie (masses des avions au décollage). Certains paramètres sont quantifiables (nombre de mouvement), d'autres ne le sont pas (prise en compte du relief, version du logiciel). Dans ce cas, il était difficile de comparer objectivement la sensibilité des différents paramètres. Un indice de sensibilité a donc été défini comme le rapport entre la variation moyenne de la surface et le pourcentage de vols concernés par la modification d'un paramètre. Cet indice a permis de réduire l'influence du trafic concerné par chaque paramètre, en ramenant les comparaisons à une base identique de nombre de vols modifiés. Le classement des paramètres en fonction de leur sensibilité obtenu dans cette étude (4.4.4 et 4.4.6) n'est donc pas un résultat général, mais seulement une interprétation possible, et liée à la définition d'un indice de sensibilité particulier (4.4.3).

4.5.3 UNE ETUDE THEORIQUE

Bien que réalisée à partir d'un cas concret, cette étude reste théorique, dans la mesure où il s'agissait de tester les réactions d'un modèle (INM). Cette étude est adaptée à la modélisation des PEB/PGS, mais ne permet pas de conclure sur la gêne effectivement ressentie par les riverains lors d'un changement de paramètre, ni sur ce que donneraient des mesures de bruit in situ en cas de modification d'un paramètre. Enfin, les différents cas testés sont fictifs : l'étude ne prend pas en compte les éventuelles contraintes opérationnelles (sécurité, capacité, circulation aérienne, météorologie).

4.5.4 POSITION DES TRAJECTOIRES

Cette étude n'aborde pas l'impact d'un changement de la position des trajectoires. La position des trajectoires détermine entièrement la géométrie des zones obtenues. Cependant, la longueur sous trace, la largeur et la surface des zones restent approximativement constantes lors d'une modification de trajectoire, car l'exposition au bruit reste constante. Les indicateurs longueur, largeur et surface, traduisent surtout l'étendue des zones de bruit, et non pas leur localisation, leur forme. Ils ne permettent donc pas de caractériser une modification de trajectoire. La position des trajectoires est pourtant un paramètre très sensible pour les communes et les riverains concernés. Les trajectoires d'un PEB ou d'un PGS doivent donc être définies avec précision, en respectant les procédures de circulation aérienne en vigueur et en exploitant les informations RADAR disponibles.

REFERENCES

- [1] Décret n°2002-626 du 26 avril 2002 fixant les conditions d'établissement des plans d'exposition au bruit et des plans de gêne sonore des aérodromes et modifiant le code de l'urbanisme.
- [2] Service Technique des Bases Aériennes : Guide technique, Plans d'exposition au bruit et plans de gêne sonore, Méthodologie d'élaboration. Juillet 2003.
- [3] Organisation de l'Aviation Civile Internationale : Normes et pratiques recommandées internationales, Protection de l'environnement, Annexe 16, Volume I, Bruit des aéronefs, 3^{ème} édition (Juillet 1993).
- [4] Arrêté du 2 août 2001 portant restriction d'usage de certains avions relevant du chapitre 3 sur l'aérodrome de Paris - Charles-de-Gaulle (Val-d'Oise)
- [5] Gulding, Olmstead, Fleming : Integrated Noise Model (INM) Version 6.0 User's Guide. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, rapport N° FAA-AEE-99-03, Septembre 1999.
- [6] Olmstead, Fleming, Gulding, Roof, Gerbi, Rapoza : Integrated Noise Model (INM) Version 6.0 Technical Manual. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, rapport N° FAA-AEE-02-01. Janvier 2003.
- [7] ECAC. CEAC Doc 29, 2^{ème} édition, 1997. Rapport sur la méthode normalisée de calcul des courbes de niveau de bruit autour des aéroports civils. *Note : Ce document est en cours de révision.*
- [8] Organisation de l'Aviation Civile Internationale : Méthode recommandée pour le calcul des courbes de niveau de bruit au voisinages des aéroports, Circulaire OACI 205-AN/1/25, 1988.
- [9] Note accompagnant la mise à jour INM Version 6.1, 4 Mars 2003.
- [10] Society of Automotive Engineers, Committee A-21, Aerospace recommended practice ARP 866A, Standard values of atmospheric absorption as a function of temperature and humidity, USA, 1975.
- [11] National Aerospace Laboratory, Pays-Bas, 1998 : Etude d'évaluation du relèvement des axes ILS de l'aéroport de Schiphol.
- [12] AIRBUS, 1999 : Etude d'évaluation des gains acoustiques apportés par des modifications des procédures d'approches.

**direction
générale
de l'Aviation
civile**



**service
technique
des Bases
aériennes**

**31, avenue du
Maréchal Leclerc
94381
Bonneuil-sur-Marne
cedex**

**téléphone :
01 49 56 80 00**

**télécopie :
01 49 56 82 19**

**internet :
www.stba.aviation-civile.gouv.fr**