



SERVICE TECHNIQUE DE LA NAVIGATION AERIEENNE
DIRECTION GENERALE DE L'AVIATION CIVILE

GUIDE DE CALCUL DES EMISSIONS DUES AUX AERONEFS

rapport n°656

Erika HERMS

Juin 2003

I. INTRODUCTION

Ce guide fournit la méthodologie de base pour le calcul des émissions dues aux aéronefs sur et autour d'un aéroport. Seuls les avions sont pris en compte dans ce document, les hélicoptères n'étant pas traités.

Les émissions s'effectuant au dessus de 3000 pieds (fin de la montée, croisière, descente) ne sont pas considérées.

Les moteurs d'avions (réacteurs, turbopropulseurs, moteurs à pistons) émettent des polluants lors des différentes opérations effectuées sur et autour de l'aéroport. Ce guide est consacré aux moteurs destinés à la propulsion ; les groupes auxiliaires de puissance (GAP ou APU pour Auxiliary Power Unit) ne sont pas pris en compte.

Afin de compléter l'inventaire d'émissions d'un aéroport, on peut se reporter au guide rédigé par le CITEPA¹ permettant d'évaluer les émissions dues aux sources aéroportuaires à l'exclusion des aéronefs.

Des exemples d'autres guides de calcul d'émissions consacrés au trafic aérien sont donnés à la fin de ce document.

II. OBJECTIF D'UN INVENTAIRE D'EMISSION

La connaissance des émissions de polluants dans l'atmosphère est la base de l'élaboration de toute réglementation quelle que soit la zone géographique considérée.

Les inventaires d'émission peuvent répondre à plusieurs besoins à l'échelle globale ou locale.² Bien que les avions rejettent des polluants sur l'ensemble de leurs vols, ce guide ne traite que des émissions ayant un impact au niveau de la zone aéroportuaire.

Les besoins auxquels les inventaires doivent répondre au niveau local sont les suivants :

§ Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie³

Les inventaires d'émission doivent être réalisés dans le cadre des Plans Régionaux de la Qualité de l'Air⁴.

§ Modélisation du transport et de la transformation physico-chimique des polluants dans l'atmosphère

§ Modélisation de l'impact économique de la pollution de l'air

§ Gestion de la qualité de l'air et de l'impact sur l'environnement et la santé⁵

§ Information aux riverains, administrations...

¹ CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique - infos@citepa.org / "Guide méthodologique pour la détermination des émissions dans l'atmosphère d'une zone aéroportuaire à l'exception des aéronefs" - Réf.417 - 07.04.2003

² A l'échelle globale les inventaires doivent répondre aux conventions et protocoles internationaux ainsi qu'aux directives européennes. A titre d'exemple : UNFCCC (United Nations Framework Convention On Climate Change), UNECE/LRTAP Convention (United Nations Economic Commission for Europe/Long Range Transboundary Air Pollutants), Protocole de Kyoto relatif à la réduction des gaz à effet de serre.

³ LAURE : Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie - Loi n°96-1236 du 30.12.1996

⁴ PRQA : Plans Régionaux de la Qualité de l'Air / Décret n°98-362 du 06.05.1998

⁵ A ce sujet on peut citer le "Guide méthodologique à destination des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre sur la prise en compte du trafic aérien dans les études air et santé" publié par le STBA/DGAC - Juillet 1999

Les inventaires d'émission ne permettent pas d'accéder directement à la qualité de l'air. En effet, la qualité de l'air est estimée à partir des concentrations de polluants dans l'air. Ces concentrations dépendent de l'intensité des émissions mais également des conditions physiques de dispersion et des transformations chimiques des polluants dans l'atmosphère. Les modèles de dispersion et de transformations chimiques peuvent permettre de passer des inventaires d'émission à la notion de qualité de l'air ; ils sont améliorés et validés par des mesures dans l'air ambiant.

III. RAPPEL DE LA REGLEMENTATION

Les polluants pris en compte dans les inventaires sont différents selon que l'on se place à l'échelle globale (effet de serre, réduction de la couche d'ozone) ou à l'échelle locale (impact sur l'environnement et la santé).

La Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie réglemente les polluants à l'échelle locale. Il s'agit du dioxyde d'azote, des particules fines en suspension, du plomb, de l'ozone, du monoxyde de carbone, du benzène et du dioxyde de soufre. Les objectifs de qualité, les seuils d'information, les valeurs limites, et les seuils d'alerte correspondent à des concentrations à ne pas dépasser pour chaque polluant⁶. Ces concentrations peuvent être des moyennes annuelles, journalières, horaires ou sur 8h, ainsi que des centiles 50 ou 98 des moyennes horaires. Cette réglementation concerne les polluants caractérisant la qualité de l'air. Cependant elle peut servir de base aux inventaires d'émissions à l'échelle locale.

L'ozone résulte de la réaction chimique entre plusieurs polluants et n'est donc pas considéré dans les inventaires.

Le plomb est plutôt lié au trafic routier.

Les émissions des particules fines en suspension sont actuellement mal connues et difficilement quantifiables.

Les inventaires prennent en compte les émissions des composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) dans leur globalité. Il n'est donc actuellement pas possible de quantifier les émissions de benzène séparément. Parfois, la distinction entre COVNM et méthane n'est pas faite et l'on considère alors les hydrocarbures en globalité.

Ce guide prend donc en compte les polluants suivants :

dioxyde d'azote, monoxyde de carbone, hydrocarbures imbrûlés, dioxyde de soufre.

⁶ Décret n°98-360 du 06.05.1998 / Arrêté du 17.08.1998

IV. EMISSIONS DES AERONEFS

Les aéronefs émettent des oxydes d'azote ($\text{NO}_x = \text{NO}_2 + \text{NO}$), du monoxyde de carbone (CO), des hydrocarbures imbrûlés (HC), des suies, du dioxyde de soufre (SO_2), de la vapeur d'eau (H_2O) et du dioxyde de carbone (CO_2).

Espèce émise	Origine	Impact
NO_x	§ formés par oxydation de l'azote de l'air aux fortes valeurs de température et de pression en sortie de chambre de combustion du moteur (décollage et montée)	§ impact local : participent à la formation d'ozone (et d'autres réactions chimiques), effet sur la santé § impact global : participent à la formation ou à la destruction d'ozone dans les couches hautes de l'atmosphère
CO	§ résulte de la combustion incomplète du kérosène, émis lorsque le moteur tourne au ralenti (stationnement et roulage au sol)	§ impact local : participe à la formation d'ozone (et d'autres réactions chimiques), effet sur la santé § impact global (faible) : effet indirect sur le forçage radiatif
HC	§ résultent de la combustion incomplète du kérosène, émis lorsque le moteur tourne au ralenti (stationnement et roulage au sol)	§ impact local : participent à la formation d'ozone (et d'autres réactions chimiques), effet sur la santé § impact global : participent aux réactions chimiques dans la haute atmosphère, effet direct du méthane sur l'effet de serre
Suies	§ résidus solides des gaz d'échappement	§ impact local : effet sur la santé § impact global : participent aux réactions hétérogènes (destruction d'ozone) et au forçage radiatif
SO₂	§ résulte de l'oxydation du soufre contenu dans le kérosène lors de la combustion	§ impact local : effet sur la santé, formation d'acide sulfurique § impact global : acidification de l'atmosphère, formation d'aérosols à partir des sulfates
H₂O	§ produit de la combustion du kérosène	§ impact global : formation d'aérosols, de cristaux de glace, de cirrus participant aux réactions hétérogènes et au forçage radiatif
CO₂	§ produit de la combustion du kérosène	§ impact global : gaz à effet de serre

V. LA CERTIFICATION DES MOTEURS

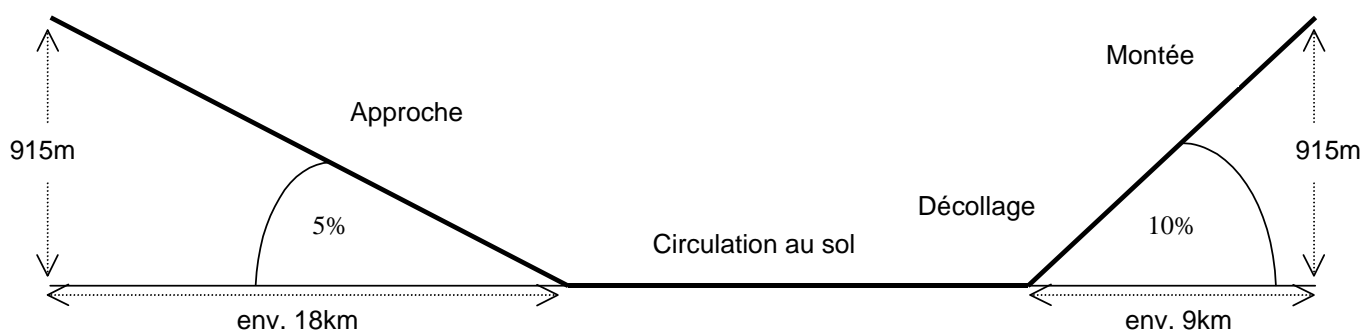
V.1. Cycle atterrissage - décollage

La certification des moteurs est basée sur le cycle atterrissage - décollage (CAD ou LTO pour Landing - Take-Off) défini dans l'annexe 16 - Vol. II de l'OACI⁷. Il décompose les opérations de l'avion sur et autour de l'aéroport en quatre phases de la façon suivante : approche, circulation au sol, décollage, montée.

Dans le cadre de la certification des moteurs des réglages de poussée et des temps au régime d'utilisation sont associés à chaque phase (voir paragraphe IV.2.).

De façon théorique le cycle atterrissage - décollage inclut les opérations de l'avion du sol jusqu'à une hauteur de 3000 pieds (915m). Cette hauteur correspond à celle de la couche limite directement affectée par les phénomènes se produisant en surface à l'échelle locale tels que la pollution, les cycles thermiques diurnes, les vents locaux.

Les distances au niveau du sol peuvent être estimées à partir de pentes moyennes à l'atterrissage et au décollage et sont représentées sur la figure ci-dessous.



V.2. Espèces réglementées

L'annexe 16 - Vol.II de l'OACI fixe les normes limitant les émissions de fumées, d'hydrocarbures imbrûlés, d'oxydes d'azote et de monoxyde de carbone pour les réacteurs d'une poussée nominale au décollage supérieure à 26,7kN.

La limite des émissions de fumées est basée sur un indice de fumées et tient compte de la poussée nominale au décollage.

Les limites des émissions des gaz sont basées sur la masse totale de polluant émis lors d'un cycle LTO divisée par la poussée nominale au décollage. La limite pour les oxydes d'azote tient également compte du rapport de pression entre la sortie et l'entrée du compresseur.

Les hydrocarbures imbrûlés sont des hydrocarbures de toutes catégories et de toutes masses moléculaires ; leur quantité est calculée en équivalent de méthane.

La quantité d'oxydes d'azote est la somme des quantités de monoxyde d'azote et de dioxyde d'azote calculée comme si le monoxyde d'azote était présent sous forme de dioxyde d'azote.

⁷ Annexe 16 - Vol.II de l'OACI : "Protection de l'environnement - Emissions des moteurs d'aviation" - OACI-Juillet 1993 / Cette annexe sert de base à la certification des moteurs d'aéronefs en ce qui concerne la pollution atmosphérique ; elle contient les procédures d'essais et de mesure et fixe les normes limitant les émissions de fumées, d'hydrocarbures, d'oxydes d'azote et de monoxyde de carbone.

L'indice de fumées est un indice sans dimension et ne fournit pas d'information sur la masse de fumées effectivement émise.

Le calcul des limites réglementaires pour les gaz nécessite l'utilisation des débits de carburant et des facteurs d'émission pour chaque phase du cycle LTO et pour chaque polluant. Ces facteurs regroupés dans une base de données peuvent servir à l'établissement des inventaires d'émissions (voir paragraphe VII.2.).

VI. DOMAINE D'APPLICATION

Avant d'établir un inventaire d'émissions il faut définir le domaine d'application selon les critères suivants :

- § choix des espèces
- § choix de la période d'étude
- § choix de l'aire d'étude
- § choix de la précision de l'étude (données de trafic : aéronefs et opérations)

VI.1. Choix des espèces

Le paragraphe IV. donne la liste des principales espèces émises par les aéronefs. Les espèces peuvent être choisies en fonction de leur impact au niveau local ou global.

Au niveau local, le choix des espèces peut être déterminé par le type d'étude. Dans le cas d'un inventaire qui ne fournit que des bilans de masses (cas des PRQA), l'ensemble des polluants peut être pris en compte. Par contre, dans le cas d'étude d'impact certains polluants seront privilégiés. A titre d'exemple, les oxydes d'azote et les hydrocarbures seront étudiés dans le cadre de la formation d'ozone (pollution photochimique) et le dioxyde de soufre sera étudié dans le cadre de l'acidification de l'atmosphère.

A partir des considérations faites aux paragraphes III. et V.2., seules les espèces suivantes peuvent actuellement être retenues pour les calculs d'émissions : NO_x, CO, HC, SO₂.

VI.2. Choix de la période d'étude

Dans le cas des PRQA la base de temps est l'année. Cependant certaines études distinguant les variations saisonnières nécessitent des bases de temps plus courtes (trimestrielles, mensuelles...).

Les études d'impact étudiant les variations diurnes nécessitent des calculs d'émissions sur des durées assez courtes (jour/nuit, heure). Selon le degré de précision des données d'entrée des modèles de dispersion les durées peuvent être encore plus courtes.

VI.3. Choix de l'aire d'étude

La base du choix de l'aire d'étude est le cycle théorique défini dans l'annexe 16 - Vol.II.

Dans le cadre des PRQA, l'aire d'étude est la région. Les distances au niveau du sol du cycle LTO théorique sont inférieures à la dimension de la région. Cependant, il est possible de considérer que seuls les polluants émis depuis le sol jusqu'à une hauteur de 915m auront un impact sur la région (hauteur correspondant à la couche limite).

Dans le cas d'études plus locales, le cycle LTO peut être tronqué de façon à obtenir des distances au sol compatibles avec l'étude⁸ (en faisant varier les durées des phases d'approche et de montée).

VI.4. Choix de la précision de l'étude

Le niveau de précision des données est conditionné par les objectifs de l'étude.

Dans le cadre des PRQA (pour lesquels les inventaires fournissent des masses de polluants sur une année) le trafic aérien d'un aéroport pourra être divisé en quelques catégories d'aéronefs alors que dans le cadre d'une modélisation qui nécessite de connaître les émissions toutes les heures les immatriculations ainsi que les heures d'arrivée et de départ devront être disponibles.

Il en va de même pour les opérations. Dans le cadre des PRQA la connaissance du nombre de mouvement est suffisante, dans le cas d'études plus détaillées la connaissance des opérations effectivement effectuées fournit les durées de chaque phase et distances parcourues au sol.

VI.5. Résumé

Quelle que soit l'étude réalisée, l'utilisateur du guide doit définir son domaine d'application selon les critères listés plus haut.

Entre une étude qui fournit des bilans de masses sur une année et une étude qui fournit des données d'entrée précises sur une heure (voir moins) pour les modèles de dispersion les niveaux de précision peuvent varier graduellement.

L'utilisateur fera son choix en fonction de l'étude, mais il sera parfois limité par les renseignements qui pourront lui être fournis.

Le paragraphe VII.1. fournit des niveaux par ordre croissant de détail des renseignements pouvant être obtenus concernant les aéronefs et les opérations.

⁸ Le "Guide méthodologique à destination des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre sur la prise en compte du trafic aérien dans les études air et santé" publié par le STBA/DGAC propose une aire d'étude autour de la piste définie de la façon suivante : 300m de part et d'autre de l'axe de la piste et 6 km à chaque extrémité de la piste.

VII. DONNEES DE BASE

Les informations à recueillir sont de deux ordres :

- données de trafic
- données d'émissions de polluants

VII.1. Données de trafic

Les données de trafic doivent être suffisamment complètes afin de faciliter les calculs et d'approcher la réalité. Ces données peuvent être demandées auprès des aéroports, des Directions de l'Aviation Civile ou de tout autre service disposant des statistiques relatives au trafic.

Elles peuvent être classées en deux catégories : les données concernant les aéronefs et celles concernant les opérations. Elles doivent couvrir la période de l'étude.

Données relatives aux aéronefs

Aéronefs	
Niveau 1	§ Liste des types d'aéronefs
Niveau 2	§ Liste des types d'aéronefs § Classification des aéronefs dans des catégories de trafic (domestique/international ; commercial/général)
Niveau 3	§ Liste des immatriculations des aéronefs § Classification des aéronefs dans des catégories de trafic (domestique/international ; commercial/général)
Niveau 4	§ Liste des immatriculations des aéronefs § Attribution des moteurs pour chaque immatriculation § Classification des aéronefs dans des catégories de trafic (domestique/international ; commercial/général)

Comme exposé au chapitre VI, le choix du niveau de détail est fonction de l'étude. Cependant lorsqu'il est possible d'obtenir des renseignements sur les moteurs équipant les aéronefs du trafic étudié (niveau 4), la recherche peut s'avérer moins importante que pour les niveaux 1, 2 ou 3.

La classification des aéronefs dans des catégories de trafic n'est pas une donnée nécessaire au calcul proposé dans ce guide. Néanmoins, elle peut l'être pour d'autres méthodologies (voir chapitre IX).

A partir des niveaux 1, 2 ou 3 la recherche des moteurs équipant les aéronefs du trafic étudié doit être effectuée.

Ce guide propose une liste non exhaustive de documents qui permettent cette recherche.

INTAG : INTernational Airline Guide⁹

Ce guide contient une liste importante d'aéronefs incluant les immatriculations, types d'aéronefs, noms de constructeurs, moteurs, etc.

Ce document existe également sur CD-Rom et est remis à jour annuellement.

JP Airline-fleets¹⁰

Ce document répertorie une liste importante d'aéronefs incluant les immatriculations, les types d'aéronefs, noms de constructeurs, moteurs, etc. Il existe également sur CD-Rom et est remis à jour annuellement.

Registre Aéronautique International¹¹

Ce registre contient des informations sur des aéronefs immatriculés dans des pays d'Europe et d'Afrique. Une version sur CD-Rom permet d'obtenir des mises à jours régulières.

Jane's¹²

Les publications sont nombreuses. Contrairement aux autres documents ci-dessus qui sont plutôt des bases de données, les publications Jane's fournissent des informations détaillées sur les aéronefs, les moteurs, les équipements militaires et civils, etc.

⁹ INTAG : Publié par EPS AVIATION PUBLISHERS / email : info@epsair.com

¹⁰ JP Airline-fleets : Publié par BUCHER&Co. Publikationen / email : jp@buchair.ch /
Internet : <http://www.buchairnet.com>

¹¹ Registre aéronautique International : Publié par Bureau Veritas / Internet : <http://www.bureauveritas.com>

¹² Jane's : Jane's Publishing / Internet : <http://www.janes.com>

Données relatives aux opérations

Opérations	
Niveau 1	§ Nombre de mouvements
Niveau 2	§ Nombre de mouvements
	§ Distinction entre les arrivées et les départs
	§ Durée moyenne du roulage sur l'aéroport étudié
Niveau 3	§ Nombre de mouvements
	§ Distinction entre les arrivées et les départs
	§ Durées des opérations pour chaque phase du cycle LTO par catégorie d'aéronef (jets, turbopropulseurs...)
Niveau 4	§ Nombre de mouvements
	§ Distinction entre les arrivées et les départs
	§ Durées des opérations pour chaque phase du cycle LTO par type d'aéronef (A320, B747...)
Niveau 5	§ Nombre de mouvements
	§ Distinction entre les arrivées et les départs
	§ Durées des opérations pour chaque phase du cycle LTO par immatriculation

Plus le niveau de détail est important plus les résultats des calculs seront représentatifs. Selon le nombre de mouvements et les catégories d'aéronefs étudiés les niveaux de détail n'auront pas la même influence sur les résultats des calculs. Une étude de sensibilité permettrait de s'assurer de la nécessité ou non d'avoir un niveau de détail important.

Des informations complémentaires relatives aux opérations peuvent être obtenues auprès des compagnies aériennes qui proposent des procédures types de vol. Il existe également des logiciels qui fournissent des informations sur les durées des différentes phases du cycle LTO et sur les trajectoires. A titre d'exemple, on peut citer les logiciels SIMMOD¹³ et ELVIRA¹⁴.

¹³ SIMMOD : Logiciel développé par la FAA permettant de simuler de l'écoulement du trafic sur l'aéroport

¹⁴ ELVIRA : Logiciel développé par le STNA/DGAC permettant de rejouer les trajectoires suivies par les avions

L'OACI et l'EPA proposent des durées des phases du cycle LTO qui peuvent être utilisées par défaut.

Les durées de la phase de circulation au sol dépendent de la taille de l'aéroport et de son encombrement. L'estimation de ces durées peut être obtenue auprès des aéroports et sera meilleure que les durées proposées par défaut.

OACI

Le tableau ci-dessous reporte les réglages de poussée et les durées de chaque phase du cycle LTO tel que défini dans l'annexe 16 - Vol. II de l'OACI.

Phases	Réglages de poussée (% de la poussée maximale au décollage)		Temps au régime d'utilisation (mn)	
Décollage	100		0,7	
Montée	85		2,2	
Approche	30		4,0	
Circulation au sol et ralenti	7		26,0	

EPA¹⁵

Le tableau ci-dessous fournit des durées types pour différentes catégories d'aéronefs pour chaque phase du cycle LTO.

Durées en mn	Approche		Circulation au sol arrivée		Circulation au sol départ		Décollage		Montée	
Aviation commerciale										
Longs et moyens courriers	4,0		7,0		19,0		0,7		2,2	
Turbo-propulseurs	4,5		7,0		19,0		0,5		2,5	
Transport (piston)	4,6		6,5		6,5		0,6		5,0	
Aviation générale										
Jet d'affaire	1,6		6,5		6,5		0,4		0,5	
Turbo-propulseurs	4,5		7,0		19,0		0,5		2,5	
Pistons	6,0		4,0		12,0		0,3		5,0	

¹⁵EPA (Environmental Protection Agency) : AP-42 Supplement 10 for compilation of air pollutant emission factors / Le document AP-42 est mis à jour régulièrement ; les mises à jour sont répertoriées sur Internet : <http://www.epa.gov/oms/ap42.htm> / Les données du tableau du paragraphe IV.2. sont issues du document AP-42 de 1980.

VII.2. Facteurs d'émission

D'une façon générale, un facteur d'émission est une valeur moyenne qui établit un rapport entre la quantité de polluant émise dans l'atmosphère et l'activité qui lui est associée.

Dans le cas des moteurs d'aéronefs, les facteurs d'émission sont donnés en masse par unité de masse de carburant consommé ou par unité de temps.

Bases de données

Les bases de données décrites ci-dessous fournissent des facteurs d'émissions pour les moteurs d'aéronefs destinés à la propulsion.

Base de données de l'OACI¹⁶

Cette base de données répertorie les émissions issues de la certification des réacteurs d'une poussée nominale au décollage supérieure à 26,7kN.

Elle fournit les facteurs d'émission pour chaque phase du cycle LTO. Les facteurs d'émissions du monoxyde de carbone, des hydrocarbures et des oxydes d'azote sont exprimés en g par kg de carburant consommé. Le débit carburant est exprimé en kg/s.

Les données relatives aux fumées noires ne sont pas exploitables directement puisque l'indice de fumées noires (Smoke Number) ne renseigne que sur l'opacité de la tache produite sur un papier filtre.

Base de données FAEED¹⁷

Cette base de données contient des facteurs d'émission pour différents moteurs d'aéronefs et des informations corrélant les moteurs à des aéronefs spécifiques.

Les données d'émissions sont issues des constructeurs, de la base de données de l'OACI et de l'Agence de la Protection de l'Environnement¹⁸ (EPA).

Les espèces concernées sont le monoxyde de carbone, les hydrocarbures, les oxydes d'azote et dans certains cas les oxydes de soufre. Le débit de carburant est également disponible. Les facteurs d'émissions issus de l'EPA sont exprimés en livres par heure ou en kg par heure.

¹⁶ Base de données de l'OACI : disponible sur Internet : <http://www.qinetiq.com/aircraft.html> / Elle a été établie au sein du CAEP de l'OACI ; la première version date de 1995 et a pour référence ICAO/Doc.9646-AN/943 ; depuis 1998 cette base se trouve sur Internet et est remise à jour régulièrement par DERA (Defence Evaluation Research Agency).

¹⁷ Base de données FAEED (FAA Aircraft Engine Emission database) : disponible sur Internet : <http://www.epa.gov/oms/aviation.htm> / Elle est gérée par le bureau de l'environnement et de l'énergie (Office of Environment and Energy) de la FAA (Federal Aviation Administration) et mise à jour régulièrement ; le numéro de référence de la base est AEE-110.

¹⁸ EPA (Environmental Protection Agency) : AP-42 Supplement 10 for compilation of air pollutant emission factors

VIII. CALCULS

VIII.1. Formules de base

La consommation de carburant et les émissions sont estimées à partir des formules suivantes :

A partir de la base de données de l'OACI

	Consommation de carburant	Emissions
Pour une phase	$MC_p = DC_p \times T_p$	$ME_p = FE_p \times MC_p$
Pour un cycle LTO	$MC_{LTO} = \sum_p MC_p$	$ME_{LTO} = \sum_p ME_p$
MC : masse de carburant ME : masse de polluant émise DC : débit de carburant FE : facteur d'émission du polluant T : durée _p : phase considérée \sum_p : somme sur l'ensemble des phases du cycle LTO		

A partir de la base de l'EPA

	Consommation de carburant	Emissions
Pour une phase	$MC_p = DC_p \times T_p$	$ME_p = FE_p \times T_p$
Pour un cycle LTO	$MC_{LTO} = \sum_p MC_p$	$ME_{LTO} = \sum_p ME_p$
MC : masse de carburant ME : masse de polluant émise DC : débit de carburant FE : facteur d'émission du polluant T : durée _p : phase considérée \sum_p : somme sur l'ensemble des phases du cycle LTO		

Dans tous les cas, la somme s'effectue sur un polluant à la fois.

Il faut également prêter attention aux différentes unités utilisées dans les bases de données et faire les conversions qui s'imposent avant d'effectuer les calculs à l'aide de ces formules de base.

VIII.2. Cas du dioxyde de soufre

La base de données FAEED¹⁹ fournit quelques facteurs d'émission pour les oxydes de soufre. Cependant, une méthode simple permet d'estimer l'ordre de grandeur des quantités de dioxyde de soufre émises dans l'atmosphère.

Cette méthode est basée sur la connaissance de la quantité de soufre contenu dans le kérosène et sur la réaction chimique d'oxydation du soufre lors de la combustion.

Il faut faire les hypothèses suivantes :

- § La totalité du soufre contenu dans le kérosène est transformée en dioxyde de soufre selon la réaction : $S + O_2 \rightarrow SO_2$.
- § L'ensemble des aéronefs utilise le même carburant.
- § La teneur en soufre dans le carburant est identique dans chaque échantillon de carburant (moyenne sur l'ensemble des échantillons).

La teneur en soufre peut être obtenue auprès des essenciers de l'aéroport étudié. Cette teneur doit être exprimée en pourcentage de masse.

Calcul

Le calcul est basé sur le fait que la masse molaire du dioxyde de soufre est deux fois celle du soufre.

Le tableau ci-dessous donne la formule permettant d'évaluer les émissions de dioxyde de soufre. Cette formule pouvant être utilisée pour chaque phase du cycle LTO comme pour l'ensemble du cycle.

Masse de carburant	Teneur de soufre dans le carburant (%-masse)	Quantité de dioxyde de soufre émise
MC	TS	$MSO_2 = MC \times TS / 100 \times 2$

Il faut veiller à l'homogénéité des unités.

D'après les informations obtenues auprès des essenciers de l'aéroport de Nice - Côte d'Azur en 1995, la teneur en masse de soufre variait de 0,001% à 0,09%. En première approximation, une valeur par défaut de 0,05% est proposée.

¹⁹Base de données FAEED (FAA Aircraft Engine Emission database) : disponible sur Internet : <http://www.epa.gov/oms/aviation.htm> / Elle est gérée par le bureau de l'environnement et de l'énergie (Office of Environment and Energy) de la FAA (Federal Aviation Administration) et mise à jour régulièrement ; le numéro de référence de la base est AEE-110.

VIII.3. Récapitulatif

	Méthode	Données
Consommation de carburant	§ cycle LTO	§ liens moteurs-aéronefs § durées des phases du cycle § débits de carburant pour chaque phase
Emissions de CO, HC, NO _x	§ cycle LTO	§ liens moteurs-aéronefs § durées des phases du cycle § facteurs d'émission pour chaque phase
Emissions de SO ₂	§ teneur en soufre dans le carburant	§ pourcentage en masse de soufre dans le carburant § consommation de carburant

IX. AUTRES METHODES D'ESTIMATION DES EMISSIONS

En général, les méthodes d'évaluation des émissions sur et autour d'un aéroport sont basées sur le cycle LTO et suivent les principes exposés dans le présent guide à des niveaux de détails différents selon les informations disponibles.

Le STNA utilise un Logiciel de calcul des Emissions dues aux Aéronefs²⁰ qui contient les facteurs d'émission issus de la base de données de l'OACI et de FAED. La partie la plus importante de ce logiciel est la compilation de données ; les calculs restent simples et suivent les principes du présent guide.

²⁰ Logiciel de calcul des Emissions dues aux Aéronefs : LEA / La version initiale de ce logiciel a été terminée en 1999 ; cette version nécessitera des mises à jour au fur et mesure de son utilisation / Ce logiciel traite des données détaillées ; il est envisagé de réaliser une version simplifiée.

En parallèle, il existe d'autres méthodes plus globales d'estimation des émissions polluantes dues aux aéronefs. Trois exemples sont présentés ci-dessous.

CORINAIR²¹

CORINAIR propose une méthode de calcul selon trois niveaux de difficulté permettant d'estimer les émissions sur l'ensemble du vol. Elle nécessite la connaissance des catégories de trafic (domestique/international), la quantité de carburant vendu et le nombre de cycle LTO pour chaque catégorie.

MEET²²

MEET propose des méthodes de calcul pour différentes catégories de transport (IFR, VFR, militaire) et pour l'ensemble du vol des aéronefs. Elle est basée sur le produit de facteurs d'émission par la quantité d'activité.

ANCAT²³

ANCAT/EC2 est un inventaire global d'émissions d'oxydes d'azote et de consommation de carburant ; il intègre l'ensemble du vol et répartit les émissions avec une résolution de 1°×1°×1km depuis le sol jusqu'à une altitude de 17km. La méthode de calcul est basée sur le nombre de vols d'aéronefs génériques et sur les facteurs d'émission moyens de ces aéronefs.

IPCC²⁴

L'IPCC propose une méthode pour réaliser des inventaires des gaz à effet de serre. Elle se base sur la méthode CORINAIR.

FFA²⁵

Le FFA propose un outil de calcul des émissions de CO₂, NO_x, HC et CO pour les avions commerciaux. Cet outil est composé de deux logiciels :

-PIANO qui prend en compte Les phases de montée, croisière et descente (il utilise la méthode proposée par Boeing)²⁶

-HARP qui prend en compte les opérations du cycle LTO.

La méthode tient également compte des caractéristiques aérodynamiques des avions.

²¹ CORINAIR : Atmospheric Emission Inventory Guidebook est un guide permettant de réaliser des inventaires d'émissions polluantes dans l'atmosphère publié par l'Agence Européenne de l'Environnement (EEA sur Internet : <http://www.eea.eu.int>) / Il contient un chapitre consacré aux aéronefs.

²² MEET : Methodologies for Estimating Emissions from air Traffic / Projet financé par la Commission Européenne dans le cadre du 4^{ème} PCRD /
Sur Internet : <http://www.inrets.fr/infos/cost319/MEETDeliverable18.PDF>

²³ ANCAT : Abatement of Nuisance Caused by Air Transport / Il s'agit d'un groupe d'experts au sein de la CEAC (Conférence Européenne de l'Aviation Civile)/ Un sous-groupe de l'ANCAT a été chargé de réaliser un inventaire global d'émissions de NO_x et de consommation de carburant pour les années 1991/1992 et 2015 ; cet inventaire (ANCAT/EC2) a été publié en 1998 et édité par R.M. Gardner

²⁴ IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) Guidelines for national greenhouse gas inventories

²⁵ FFA (Flygtekniska Försöksanstalten / Institut de recherche aéronautique de Suède) : FFA Methods for Computing Exhaust Emissions from Aircraft : Description and Validation - A. Hasselrot - February 2000

²⁶ PIANO : description su internet : <http://www.lissys.demon.co.uk>