

Intégration de données environnementales dans les études de capacité aéroportuaire

Rapport d'étude



service technique de l'Aviation civile

Intégration de données environnementales dans les études de capacité aéroportuaire

Service technique de l'aviation civile
Département Aménagement, Capacité, Environnement

Rédacteur - Alexandre GAMA

Vérificateur - Paul-Emmanuel THURAT

Approbateur - Philippe HOEPPE

Juillet 2012



Résumé

Les données utilisées et produites lors de la réalisation d'études de capacité aéroportuaire sont suffisamment détaillées et exhaustives pour être également utilisées afin d'estimer certains impacts environnementaux. L'objet de ce rapport est de présenter un modèle, qui, à l'aide de données de simulation de capacité aéroportuaire, permet d'obtenir des estimations précises des consommations et des émissions des aéronefs en circulation sur l'infrastructure d'un aéroport. La prise en compte de ces estimations lors d'une étude de capacité aéroportuaire vise à permettre une approche plus complète et pluridisciplinaire de l'évaluation des gains et pertes engendrés par les divers scénarios étudiés. Ce rapport présente donc le modèle et les solutions techniques retenues pour mettre en œuvre celui-ci, à savoir une base de données d'émissions et de consommations pour la plupart des aéronefs ainsi qu'un programme informatique couplant cette base de données avec les données de simulation de capacité aéroportuaire. Enfin, un cas pratique d'étude permet d'évaluer les possibilités du modèle proposé.

Abstract

Data used for airport capacity studies are extremely detailed and complete. They can therefore be used in order to evaluate some environmental impacts as well. This report describes a fuel burn and emission model designed to allow the calculation of precise estimates of both, the fuel consumption and the pollutants emission of aircrafts while they land, taxi, and take-off. Taking those estimates into account in an airport capacity study adds a pluridisciplinary dimension to the evaluation of the advantages and drawbacks of the various scenarios considered. This report also describes the technical tools created in order to put the fuel burn and pollutants emission model in application, namely a database of aircraft emissions and fuel consumption, and a computer program designed to link the data contained in said database to the airport capacity simulation data. Eventually, this report presents the results obtained with those tools for an actual airport capacity study, in order to demonstrate the possibilities offered by this model.

Mots clés

Émission, consommation, aéronef, avion, réacteur, turbopropulseur, kérosène, étude, capacité, aéroportuaire, simulation, temps, accéléré, polluants, environnement, base, de, données, aviation, civile, STAC, SIMMOD

Sommaire

Introduction.....	11
1. Les données environnementales qui peuvent être intégrées aux études de capacité aéroportuaire	13
1.1. Capacité et impacts environnementaux.....	13
1.1.1 Présentation rapide de la capacité aéroportuaire	13
1.1.2 Intérêt de la prise en compte de facteurs environnementaux	15
1.2 Aperçu du cadre réglementaire concernant l'environnement.....	18
1.2.1 Réglementation des émissions sonores.....	18
1.2.2 Réglementation des émissions de polluants	19
1.3. Objectifs du projet d'intégration de données environnementales dans les études de capacité aéroportuaire	21
1.3.1 Outils existants de calcul d'impact environnemental utilisés et parti pris pour ce projet	21
1.3.2 Indicateurs environnementaux retenus	22
2. Modélisation de la consommation de carburant et des émissions des moteurs d'avions....	25
2.1. Modélisation des divers régimes moteurs usuels des avions sur les aéroports	25
2.1.1 Hypothèses générales sur l'utilisation des moteurs pendant les phases du cycle LTO	25
2.1.2 Hypothèses concernant l'utilisation des APU	27
2.1.3 Modélisation pratique de ces hypothèses et valeurs retenues	29
2.2 Modélisation des émissions de polluants	33
2.2.1 Émissions de CO et de NO _x	33
2.2.2 Émissions d'hydrocarbures imbrûlés et de composés organiques volatils	33
2.2.3 Émissions de SO ₂	33
2.2.4 Émissions de PM _{2,5}	34
2.2.5 Émissions de CO ₂	37
2.3 Limites de la modélisation	38
2.3.1 Les aspects environnementaux: des aspects encore peu précisément évalués	38
2.3.2 Les imprécisions principales de la modélisation	39
3 Automatisation des calculs d'émissions et de consommations	41
3.1 Création d'un outil informatique de mise en œuvre du modèle	41
3.1.1 Données d'entrée.....	41
3.1.2 Type d'outil créé pour le traitement de ces données	43
3.2 Calcul des durées des divers régimes moteur	45
3.2.1 Principe général de calcul	45
3.2.2 Transformation des profils de vitesse « tout ou rien » en profils de vitesses variables	46
3.2.3 Transformation des profils de vitesses rectangulaires en profils de vitesse trapézoïdaux	47
4 Application pratique sur un cas d'étude: étude ROUL	49
4.1 Présentation des scénarios étudiés	49

4.1.1 Contexte et objectif de l'étude	49
4.1.2 Hypothèses du domaine de la capacité	49
4.1.3 Hypothèses du domaine environnemental.....	49
4.2 Résultats obtenus.....	51
4.2.1 Résultats globaux.....	51
4.2.2 Conclusions des résultats détaillés	52
4.3 Discussion des résultats.....	53
4.3.1 Remarques concernant les hypothèses initiales	53
4.3.2 Comparaison des résultats par rapport aux conclusions tirées en capacité	54
4.3.3 Sensibilité des résultats et conclusions sur la modélisation proposée	55
Conclusion	57
Bibliographie.....	59
Annexe A: liste des abréviations, sigles et acronymes utilisés.....	61
Annexe B: comparaison modèle simple OCEAN/modèle détaillé proposé	62
Annexe C: coefficients de redressement actuellement retenus.....	63
Annexe D: résultats détaillés pour le cas d'étude ROUL.....	64
Annexe E: plan de Paris CdG.....	65
Annexe F: tableau synthétique des difficultés rencontrées et des solutions proposées.....	66
Annexe G: extrait de la documentation des outils créés.....	67

Liste des illustrations

Illustration 1: Principaux maillons d'un aéroport.....	13
Illustration 2: Exemples de capacités de programmation pour divers aéroports européens (source: STAC)	14
Illustration 3: Relation entre le retard et le nombre de mouvements réalisables	15
Illustration 4: Évaluation d'un scénario via une simulation	16
Illustration 5: Les quatre phases du cycle LTO standard de l'OACI (source: DGAC).....	19
Illustration 6: Cycle de l'ozone (source: Joel Schwartz).....	23
Illustration 7: Fonctionnement des différents types d'inverseurs de poussée	26
Illustration 8: Relation entre consommation et poussée	32
Illustration 9: Coupe d'un réacteur à double flux (source: Larousse)	36
Illustration 10: Capture d'écran de SIMMOD.....	42
Illustration 11: Importance de la détermination des arrêts qui ne correspondent qu'à des ralentissements	47
Illustration 12: Modélisation des accélérations et décélérations conservant les temps SIMMOD.....	48
Illustration 13: Modélisation des accélérations et décélérations conservant les distances SIMMOD.....	48

Résumé

- Au cours des dernières années, l'augmentation des prix du pétrole et le développement de réglementations environnementales plus poussées ont fait de la question de la consommation de carburant des avions au roulage un enjeu majeur. Bien que la gestion des flux demeure le principal objet des études de capacité aéroportuaire, afin de fournir un aperçu plus complet des diverses conséquences qu'un projet aurait, il semble approprié de s'intéresser également aux émissions de polluants et à la consommation de carburant au roulage, d'autant plus que la plupart des données nécessaires pour les calculs d'émissions et de consommation de carburant sont également nécessaires pour les calculs afférents à la gestion des flux. Ce projet propose donc une méthode et des outils pour évaluer, à partir des données de simulation de capacité aéroportuaire générées par le logiciel SIMMOD, la consommation de carburant et les émissions des polluants suivants : CO₂, SO₂, CO, NO_x, composés organiques et les particules fines. Celles-ci peuvent être calculées pour toutes les phases du cycle LTO (*Landing Take-Off*) de l'OACI, même si le projet se concentre principalement sur la phase de roulage du cycle LTO.

- Les émissions sont étroitement liées à la consommation de carburant et le calcul des émissions nécessite donc que le taux de consommation de carburant soit déterminé au préalable. Les données produites par les outils de simulation de capacité aéroportuaire pour les calculs de gestion des flux d'avions entrent alors en jeu car elles sont suffisamment précises pour pouvoir servir à déterminer les consommations des avions. Ensuite, selon le polluant, diverses méthodes de calcul sont mises en œuvre pour obtenir des estimations des émissions à partir des consommations de carburant des moteurs. Les taux d'émission de CO, NO_x et les composés organiques sont déterminés en multipliant le taux de consommation de carburant par des indices des émissions, lesquels dépendent des types de moteurs et des réglages de poussée. Les émissions de SO₂ et de particules fines sont obtenues par la mise en œuvre de la méthode FOA3.0 (troisième version de la méthode « *First Order Approximation* ») développée par la FAA et enfin, les émissions de CO₂ sont déterminées en soustrayant la quantité de carbone contenue dans les espèces chimiques autres que le CO₂ des gaz d'échappement des moteurs à la quantité de carbone entrant dans les moteurs en tant que combustible.

- Prendre en compte les estimations de consommation et d'émissions dans les études de capacité aéroportuaire est surtout intéressant si ces estimations permettent de rendre compte des différences, parfois subtiles, qu'il peut y avoir entre les scénarios envisagés dans les études de capacité. Les outils créés pour mettre en œuvre les calculs de ces estimations doivent donc utiliser au mieux les données de simulation de capacité aéroportuaire afin de rester le plus précis possible. Les outils créés sont ainsi capables de moduler la consommation des avions selon qu'ils sont au départ ou à l'arrivée (les avions au départ consomment plus car ils sont plus lourds), de simuler des procédures de roulage avec des moteurs éteints et de calculer des consommations et émissions pour les APU (*Auxiliary Power Unit*).

- Les outils ont été testés sur une simulation de l'aéroport Paris CdG où les avions de la famille A320 (42 % de la flotte utilisant cet aéroport) ont été équipés de systèmes leur permettant de rouler sans utiliser leurs moteurs principaux, mais à une vitesse plus lente que les autres avions. Tous les autres avions ont été systématiquement considérés comme roulant en utilisant tous leurs moteurs. Cette simulation visait à évaluer les avantages et les inconvénients possibles de tels systèmes de roulage moteurs éteints et était donc tout indiquée pour évaluer les possibilités offertes par l'intégration de la consommation de carburant et des estimations des émissions dans une étude de capacité aéroportuaire. Les résultats préliminaires montrent que l'utilisation de systèmes de roulage moteurs éteints pour les appareils de la famille A320 pénalise par contre les autres avions qui, gênés par ces avions roulant moins vite, ont ainsi un temps de fonctionnement de moteur plus long. Cependant, les économies globales de carburant réalisées sur l'ensemble de la flotte fréquentant l'aéroport sont assez faibles (moins de 10 %), puisque 34 % des aéronefs non équipés sont des avions long-courriers qui ont des taux de consommation de carburant beaucoup plus élevés que les avions de la famille A320 et de plus, les avions de la famille A320 doivent utiliser leurs APU pendant le roulage si tous les moteurs ne sont pas en fonction, ce qui implique que les économies de carburant des moteurs sont légèrement contre-balançées par une surconsommation des APU.

- Cette simulation a également été l'occasion de tester la pertinence du modèle de consommation et d'émission. Pour l'instant, les principales conclusions sont que la différenciation des avions au départ de ceux à l'arrivée et la prise en compte de la consommation de carburant des APU ont un impact très important, aussi bien sur la consommation de carburant que sur les émissions calculées. Cependant, le modèle est toujours en cours d'élaboration et des données plus opérationnelles sont encore nécessaires afin de calibrer correctement les taux d'émissions et de consommation de carburant pour chaque modèle d'avion.

Executive summary

- Over the past years, the sensible increase in oil prices and the development of more precise environmental regulations has earned the issue of fuel consumption for aircraft during their taxi phases a lot of importance. The aim of airport capacity studies is often to assess the possible benefits of planned modifications of airport infrastructures and/or procedures. Therefore, although flow management remains the primary concern of airport capacity studies, in order to provide a more comprehensive overview of the various consequences a project could have, it seems appropriate to calculate pollutants emissions and taxi fuel burn as well, especially since most of the data needed for emissions and fuel burn estimates are also needed for flow management calculations. This project provides a method and tools to evaluate, using the airport capacity simulation data generated by SIMMOD, the fuel burn and the emissions of the following pollutants: CO₂, SO₂, CO, NO_x, organic compounds and particulate matter. Those can be calculated for all phases of ICAO's LTO cycle (Landing Take-Off) although the project focuses primarily on the taxi phase of the LTO cycle.
- The emissions are tightly related to the fuel consumption and the calculation of emissions estimates requires therefore fuel consumption rates to be determined beforehand using the simulation data produced for the flow management calculations. Then depending on the pollutant, various calculations methods are implemented to obtain emissions estimates from predicted engine fuel consumptions. Emission rates of CO, NO_x and organic compounds are determined by multiplying the engines' fuel consumption rates by emissions indexes which depend on the engines types and thrust settings. SO₂ and particulate matter emissions are obtained by implementing the FOA3.0 (First Order Approximation, third version) method developed by the FAA and finally, CO₂ emissions are determined by subtracting the quantity of carbon contained in the non-CO₂ chemical species of engine exhausts to the quantity of carbon entering the engines as fuel.
- In order for the the emissions and fuel burn estimates to be accurate enough to allow differentiation between various simulations which may not be drastically different from each other, the fuel consumption rates of aircraft engines has to be modelled with a rather high degree of precision. The tools created to implement the emissions and fuel burn calculations differentiate departing aircraft from arriving ones in order to account for the fact that departing aircraft require more thrust to get moving because they carry more fuel and are thus heavier. They also take into account the fact that aircraft may taxi using only part of their engines, may need higher thrust output to gain momentum than they need to simply maintain momentum, especially at heavy weight, and finally, they also account for the use of the APUs (Auxiliary Power Units) in the fuel burn and emissions estimates. These tools also implement a slight reinterpretation of SIMMOD's simulation data in order better match real aircraft's operation. The overall travel times of the simulated aircraft are not much impacted, however, acceleration and deceleration times are computed for the taxi phase and some stops due to priority conflicts are interpreted as mere slow-downs to account for the fact that pilots usually manage their taxi speeds so that they avoid having to stop for only a few seconds because of priority conflicts. Since these elements have virtually no incidence on the overall taxi time or the global flow management of an airport SIMMOD doesn't implement them, but they are however required to determine which thrust settings were used by the aircraft during their taxi phase and thus how much fuel they burnt while on the ground.
- The tools were tested on a SIMMOD simulation of Paris CDG airport where A320 family aircraft (42 % of the fleet using this airport) were equipped with systems allowing them to taxi without using their main engines, but at a slower speed than other aircraft. All the other aircraft were systematically taxiing using all their engines. Using this simulation to assess the possible benefits and drawbacks of such engineless taxi systems was an excellent opportunity to evaluate the possibilities offered by integrating fuel burn and emissions estimates in an airport capacity study. Preliminary results show that although the use of engineless taxi systems for A320 family aircraft saves a lot more engine use time than the slower taxi speed of those aircraft generates additional engine use time for non-A320 aircraft, overall fuel savings of the entire fleet are much lower than the engine use time savings lead to expect. The main reasons for this are that 34 % of the non-A320 aircraft are longhaul aircraft which have much higher fuel consumption rates than the A320 family aircraft. Furthermore, A320 family aircraft have to use their APU during taxi if their engines aren't both online and therefore, engine fuel consumption savings are slightly dampened by a higher APU fuel burn.

- *This simulation was also a testing ground for the features of the fuel burn and emissions model. For now, the main conclusions are that differentiating departing aircraft from arriving aircraft and taking APU fuel consumption into account has a very high impact on both the calculated fuel consumption and the emissions. However, the current hypothesis concerning thrust settings required respectively to breakaway from a stop and to maintain movement lead to the conclusion that considering that a stop implies a waiting time at idle thrust, then a breakaway impulsion (if idle thrust is not sufficient to get the aircraft moving) before reverting to the thrust setting that is necessary to keep the aircraft in movement (once again, if idle thrust is not enough) generates no significant difference in the fuel burn in comparison with the fuel burn obtained when simply considering that aircraft use the thrust setting required to conserve momentum all the time. However, the model still being a work in progress, more operational data is still required to fully calibrate the thrust settings and the fuel consumption rates for each aircraft model and of now, it is not yet possible to issue definite conclusions as to the actual importance of each features of the model.*

Introduction

Même dans la conjoncture de crise actuelle, la demande de transports aériens reste forte et les aéroports ne cessent de se développer. Les exigences en termes de rentabilité des projets tendent, par contre, à être durcies. Les études de capacité aéroportuaire ont pour objectif d'évaluer les possibilités offertes par les infrastructures aéroportuaires en termes de trafic et contribuent ainsi à l'évaluation de l'opportunité de divers projets de développements aéroportuaires. Elles sont donc d'autant plus utiles que les exigences d'utilité des développements souhaités sont de plus en plus élevées. Les nuisances environnementales des transports aériens, notamment le bruit et la qualité de l'air, entrent également en jeu lors de l'étude d'un projet concernant un aéroport, mais les aspects environnementaux sont généralement étudiés séparément et restent par ailleurs assez peu développés, notamment concernant la prise en compte des émissions des aéronefs.

Comme les données nécessaires aux études de capacité aéroportuaire portent à la fois sur l'infrastructure et sur le trafic qui y circule, elles sont suffisamment descriptives du fonctionnement de l'aéroport étudié pour pouvoir également être utilisées dans l'évaluation d'autres paramètres, que ceux concernant le seul écoulement du trafic. En particulier, ces données pourraient être utilisées pour l'évaluation d'impacts environnementaux, donnant ainsi aux études de capacité une dimension supplémentaire, grâce à l'évaluation conjointe d'impacts environnementaux et d'impacts sur le trafic. Une telle approche s'intègre de plus dans le processus d'évolution constant des moyens d'évaluation des projets, qui vise à renforcer la prise en compte du développement durable dans les projets retenus.

Les transports aériens engendrent de nombreux impacts, principalement négatifs, sur l'environnement, et tous ne peuvent pas être évalués grâce aux données nécessaires aux études de capacité. Tous n'ajoutent pas non plus de dimension pertinente aux conclusions des études de capacité. Quels sont donc les impacts environnementaux qu'il est le plus pertinent d'évaluer à l'occasion d'une étude de capacité aéroportuaire et comment les évaluer, à partir des données de capacité ?

Afin d'apporter une réponse à ce questionnement, ce rapport abordera dans un premier temps quelques notions de capacité aéroportuaire, permettant ainsi de déterminer les aspects environnementaux qui sont le plus liés à ce domaine. Un modèle pour l'évaluation de ces aspects ainsi qu'un ensemble de solutions techniques permettant de mettre ce modèle en œuvre, seront ensuite proposés, avant de conclure sur la pertinence de la prise en compte de données environnementales dans les études de capacité, par la mise en pratique du modèle proposé, sur un cas d'étude concret.

Note à l'intention du lecteur

Ce rapport porte sur un travail réalisé au Service Technique de l'Aviation Civile par un élève ingénieur de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État dans le cadre d'un travail de fin d'étude. Le modèle proposé dans ce rapport n'est pas définitif et son développement sera poursuivi par le Service Technique de l'Aviation Civile.

1. Les données environnementales qui peuvent être intégrées aux études de capacité aéroportuaire

La capacité aéroportuaire est un domaine fortement lié à certains impacts environnementaux des transports aériens. Dans cette première partie, seront présentés les divers impacts environnementaux dont l'évaluation, en complément d'une étude de capacité, peut être opportune. Avant d'aboutir à la définition des indicateurs environnementaux qui ont été retenus pour le projet dont fait l'objet ce rapport, le cadre réglementaire concernant les impacts environnementaux des transports aériens sera également évoqué, afin de préciser les données environnementales qui font déjà l'objet d'une réglementation.

1.1 Capacité et impacts environnementaux

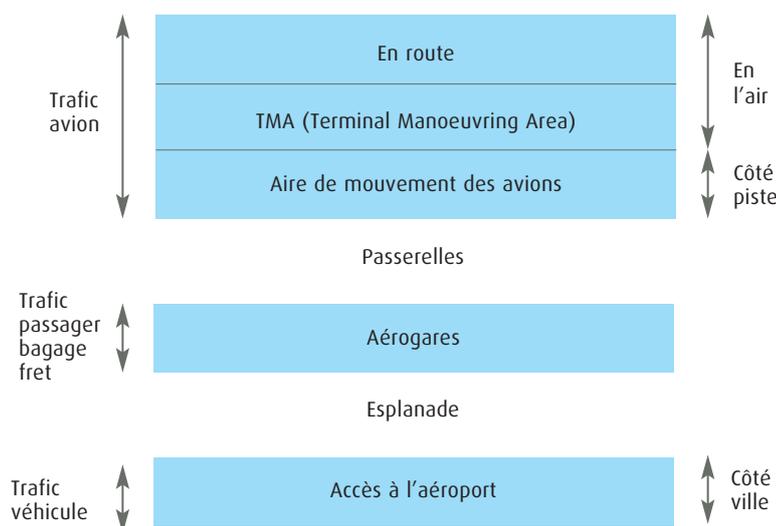
Ce paragraphe a pour but de présenter brièvement quelques concepts de capacité aéroportuaire, afin de faire apparaître les aspects environnementaux qui y sont les plus liés.

1.1.1 Présentation rapide de la capacité aéroportuaire

Définition générale de la capacité¹

La capacité aéroportuaire mesure la quantité de mouvements (les mouvements sont des départs ou des arrivées) qui peut être traitée par les installations d'un aéroport pendant une période de temps donnée. La capacité dépend donc de très nombreux facteurs allant du dimensionnement des installations à la qualité de service souhaitée.

Un aéroport se décompose en maillons (cf. Illustration 1). À chacun de ces maillons correspond une capacité, dépendant des installations utilisées et de la qualité de service souhaitée pour le traitement du flux (typiquement, le retard maximal admissible). La capacité globale d'un aéroport correspond naturellement à la capacité du maillon le moins performant.



La TMA est la portion de l'espace aérien où les avions réalisent leurs procédures d'approches et leurs procédures de départ.

Illustration 1: Principaux maillons d'un aéroport

¹ D'après Cateloy, Rodriguez [1, p. 16].

La capacité de l'aire de mouvement des avions (cf. Illustration 1), qui est souvent le maillon faible d'un aéroport, est celle qui fait l'objet des études de capacité auxquelles un bilan environnemental pourrait être intégré. L'aire de mouvement des avions comporte les pistes, les voies de circulation et les postes de stationnement.

Au sein d'un maillon, il existe différentes capacités qui peuvent être mesurées. Par exemple, les pistes possèdent en elles-mêmes une capacité. Celle-ci peut être très variable (cf. Illustration 2) selon qu'il s'agit d'un doublet de pistes dépendantes (c'est-à-dire deux pistes séparées de moins de 760 m), de pistes sécantes ou d'une piste unique, selon l'équipement de radionavigation dont les pistes sont équipées, selon la disposition des voies de circulation qui alimentent les pistes, ou encore selon les contraintes de séparations en vol entre les aéronefs (imposées par la technologie radar utilisée), les règles d'exploitation, le relief, etc.

Capacité technique, capacité déclarée, capacité de programmation²

Les études de capacité permettent de déterminer la capacité technique. Il s'agit du nombre maximal d'avions qu'il est possible de faire passer sur l'infrastructure, en fonction d'un retard maximal admissible (cf. Illustration 3), sachant que plus le retard admissible est important, plus le nombre de mouvements qu'il est possible de traiter est grand. Cette capacité est déterminée en fonction des caractéristiques des installations et des règles d'exploitations imposées par l'exploitant et la réglementation concernant le transport aérien (aussi bien les contraintes liées au bruit pour les riverains, que les règles de sécurité). Une capacité technique peut être calculée pour chaque maillon.

La capacité déclarée, quant à elle, est le nombre maximal de mouvements que les autorités gérant l'aéroport déclarent pouvoir accepter toute l'année. C'est une capacité intégrant l'ensemble des maillons. Elle est choisie à partir des capacités techniques possibles mais n'est pas forcément la capacité technique : il peut y avoir un retard admissible pour excéder cette capacité ou, au contraire, la capacité déclarée peut être inférieure à la capacité technique pour s'assurer qu'il n'y aura pas de retard.

La capacité de programmation, enfin, est la demande réelle, elle est définie à l'issue d'une concertation entre l'exploitant de l'aéroport et les compagnies aériennes. Il s'agit, au retard des vols près, de la capacité réellement réalisée par l'aéroport. Cette capacité peut être supérieure à la capacité déclarée pendant une certaine période de temps, auquel cas des créneaux horaires de la journée sont attribués aux compagnies, afin de modérer les retards en régulant le trafic. Ce processus s'appelle la coordination d'un aéroport. Des aéroports peuvent aussi être coordonnés même si leurs capacités de programmation ne rendent pas cela nécessaire.

Aéroport	Capacité de programmation	Nombre de pistes utilisées simultanément	Type de pistes disponibles
Toulouse	42 mouvements/heure	2	Un doublet
Nice	49 mouvements/heure	2	Un doublet
London-Gatwick	50 mouvements/heure	1	Piste unique
München	88 mouvements/heure	2	Deux pistes parallèles

Illustration 2 : Exemples de capacités de programmation pour divers aéroports européens (source : STAC)

² D'après Cateloy, Rodriguez [1, p. 19-21].

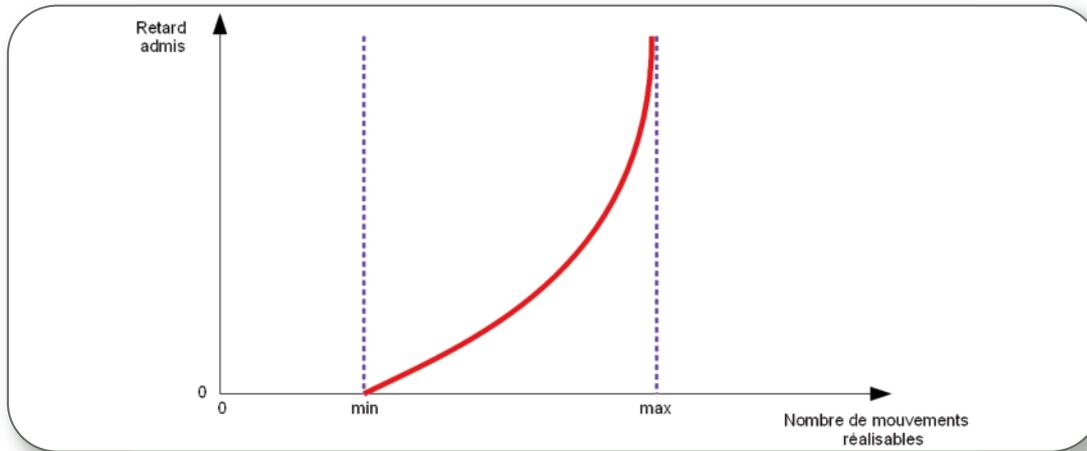


Illustration 3 : Relation entre le retard et le nombre de mouvements réalisables

Objectifs d'une étude de capacité

L'objectif principal d'une étude de capacité est d'évaluer le nombre maximal de mouvements qu'un aéroport peut traiter. Deux grands types d'études peuvent être commandés: des études à court ou moyen terme (environ 5 ans), qui ont souvent pour but d'avoir un aperçu de l'impact d'une modification de l'infrastructure ou des procédures sur la capacité des installations, et des études à long terme (de 15 à 20 ans), qui visent à prévoir, en fonction d'hypothèses d'évolution de trafic, la date à partir de laquelle un aéroport pourra être considéré comme saturé et les portions des installations qui en seront la cause.

Dans les deux cas, ces études de capacité peuvent aider les gestionnaires d'aéroports à fixer leurs capacités déclarées et de programmation et dans certains cas, également conduire à des propositions d'amélioration des infrastructures, ou au moins recentrer les priorités lors du développement d'un aéroport, afin d'en optimiser la capacité. Les études de capacité sont un outil d'aide à la décision.

1.1.2 Intérêt de la prise en compte de facteurs environnementaux

Plus-value apportée aux études de capacité par un bilan environnemental

Les études de capacité visent à évaluer la réponse d'un aéroport à un scénario. Un scénario peut correspondre à une modification du volume de trafic reçu par l'aéroport, de la structure du trafic reçu par l'aéroport (par exemple la répartition des types d'avions dans le trafic), de l'infrastructure, ou encore des règles d'exploitation de la plate-forme. Les études de capacité permettent ainsi de déterminer les gains ou pertes, sous forme de mouvements ou de retards, que divers scénarios pourraient engendrer. Elles contribuent ainsi à l'évaluation de l'opportunité de projets d'aménagement ou d'actions, ayant pour but d'améliorer ou de garantir la qualité de service sur un aéroport donné.

Associer un bilan environnemental au bilan trafic dans une étude de capacité permet d'appréhender les scénarios étudiés différemment, en fournissant des indicateurs rendus de plus en plus indispensables, par la prise en compte croissante du développement durable dans les actions menées. Mettre en perspective les gains ou pertes de capacité avec les impacts positifs ou négatifs sur l'environnement qui y correspondent, permet en effet de répondre aux préoccupations environnementales des autorités et des riverains des aéroports, ainsi qu'aux préoccupations économiques des compagnies aériennes, soucieuses de maîtriser leurs consommations de carburant.

Il devient ainsi par exemple possible de relativiser les avantages d'une mesure permettant de fluidifier le trafic des avions au sol en allongeant leurs parcours, au détriment de leur consommation de kérosène.

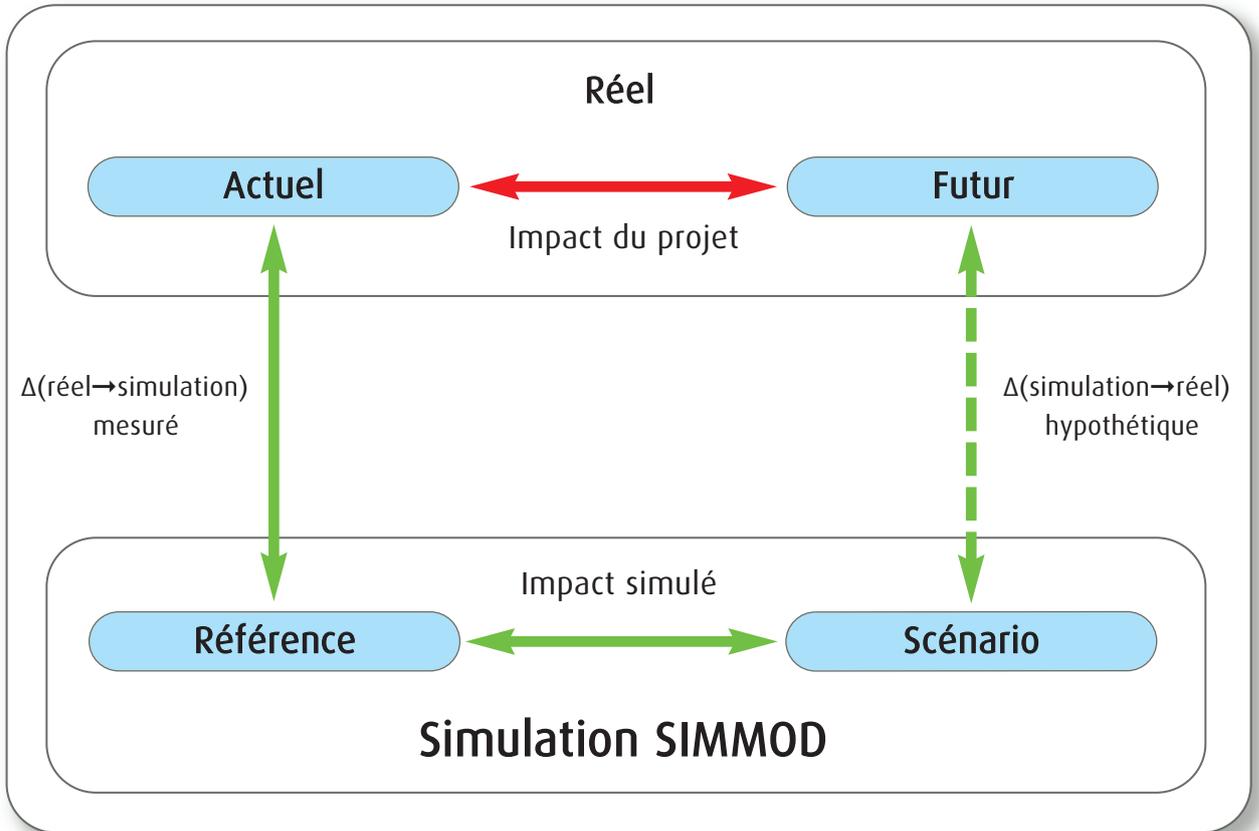


Illustration 4 : Évaluation d'un scénario via une simulation

Lien entre la capacité aéroportuaire et l'impact environnemental de la circulation des aéronefs

Une étude de capacité au moyen d'outils de simulation se décompose en quatre grandes phases :

- recueil des données auprès de l'exploitant : il s'agit principalement d'obtenir les plans des installations et les règles d'exploitations pratiquées ainsi qu'une feuille de vols représentant le trafic type reçu par l'aéroport. Il s'agit en général d'une journée, qui n'est ni la plus chargée ni la moins chargée mais qui comporte une répartition représentative des vols en termes de volume de trafic, de structure du trafic, de compagnies aériennes, de terminaux utilisés, ou encore de modèles d'aéronefs utilisés.
- modélisation des installations et des règles d'exploitation à l'aide d'un outil informatique de modélisation et de simulation. Deux modèles sont toujours créés : un modèle de référence, qui cherche à représenter la situation actuelle, et un modèle représentant l'aéroport avec les modifications que l'on souhaite étudier (infrastructure modifiée, structure du trafic modifiée ou règles d'exploitation modifiées). Les différences entre le modèle de référence et l'aéroport réel permettent d'évaluer la pertinence de la modélisation, le degré d'erreur entre réalité et simulation. Une étude ne compare donc pas directement une situation modifiée simulée à la situation actuelle réelle, les indicateurs d'impact exposés dans les rapports d'étude (évolution des retards, du nombre de mouvements réalisés, points sensibles de l'infrastructure, etc.) sont toujours calculés entre la situation modifiée simulée et la situation actuelle simulée (cf. Illustration 4).
- exploitation des résultats fournis par les outils de simulation pour produire les indicateurs de capacité pertinents : les outils de modélisation produisent des données de sorties à partir desquelles les indicateurs souhaités doivent être calculés à l'aide d'outils de traitement de données divers.
- exploitation des indicateurs calculés et conclusions : une fois les indicateurs calculés, il reste à déterminer quelles sont les conclusions qui peuvent en être tirées, afin d'orienter les décisions vers un développement plus optimal de l'aéroport étudié.

Trois grands types d'impacts environnementaux sont fortement liés à la capacité aéroportuaire :

- le bruit, à savoir principalement le bruit des moteurs des avions en phase de décollage et le bruit aérodynamique lié à la traînée engendrée par les dispositifs hypersustentateurs et les trains sortis des avions en phase d'approche finale. Il dépend directement du nombre de mouvements réalisés par les divers types d'aéronefs.
- la pollution atmosphérique générée localement par les aéronefs au voisinage d'un aéroport. Elle dépend des modèles de moteurs et des temps passés par ceux-ci dans les divers régimes de poussée nécessaires aux quatre phases du passage des avions sur l'infrastructure de l'aéroport étudié (phase d'approche finale, de roulage, de décollage et de montée).
- la consommation de carburant par les aéronefs, à la fois l'épuisement d'une ressource non renouvelable et un enjeu économique. Elle est également liée aux modèles de moteurs et à leurs durées de fonctionnement.

Les données nécessaires à l'élaboration d'un bilan environnemental sur ces trois aspects sont en effet en grande partie produites au cours d'une étude de capacité, puisqu'aussi bien le nombre de mouvements que les durées des différentes phases sont calculées pour estimer la capacité d'un aéroport et les retards subis par les vols.

Abstraction faite de la plus-value apportée aux études de capacité par la prise en compte de paramètres environnementaux, il est donc également particulièrement opportun de coupler, lors de l'exploitation des résultats d'une simulation, un calcul environnemental avec un calcul de capacité, car cela permet d'appuyer l'estimation des trois impacts environnementaux précédemment cités sur des données précises et détaillées utiles aux deux types de calculs, sans qu'il soit nécessaire de recalculer ces données lors de la réalisation d'un bilan environnemental seul.

En ce qui concerne les autres impacts environnementaux des transports aériens (dangers pour la faune, pollution des eaux et sols, emprise au sol, etc.), ils ne sont pas aussi directement liés à la capacité aéroportuaire que les émissions et consommations des aéronefs. Par conséquent, l'utilisation des données de simulations pour leurs estimations ne présente pas d'intérêt réel. Réciproquement, une variation de capacité ayant un effet beaucoup plus fort sur les émissions et consommations des aéronefs que sur les impacts environnementaux qui y sont moins sensibles, un bilan sur ces derniers n'est pas pertinent en complément d'une étude de capacité aéroportuaire.

1.2 Aperçu du cadre réglementaire concernant l'environnement

Du fait du caractère fortement international de l'activité de transport aérien, ses impacts environnementaux sont réglementés à trois niveaux : au niveau mondial par l'OACI, au niveau européen et au niveau national. La réglementation porte surtout sur les émissions sonores et gazeuses des aéronefs.

1.2.1 Réglementation des émissions sonores

Les émissions sonores des aéronefs sont normées dans l'annexe 16 de l'OACI (volume I). L'OACI définit une méthode de mesure de la nuisance sonore lors des phases où les aéronefs sont amenés à passer au voisinage du sol. L'OACI impose également des valeurs maximales à ne pas dépasser pour obtenir la certification des aéronefs.

Au niveau européen, la directive 2002/30 stipule que, dans le cas où une restriction d'exploitation serait la mesure d'atténuation des nuisances sonores ayant le meilleur bilan coût avantage, les aéroports des États membres seraient autorisés à restreindre l'exploitation des aéronefs certifiés avec le moins de marge par rapport aux valeurs seuil réglementaires, sauf si ces aéronefs ne sont utilisés que de façon exceptionnelle et rare, ou s'ils font partie de flottes appartenant à des pays en voie de développement³. En outre, d'après la méthode d'évaluation du bruit des aéronefs préconisée par l'OACI, une base de données appelée ANP (*Aircraft Noise and Performance*) a été créée au niveau européen. Cette base de données classe les différents aéronefs en quatre catégories, suivant leurs émissions sonores, de la catégorie 1 comprenant les aéronefs les plus bruyants à la catégorie 4, recensant les aéronefs les plus silencieux.

En pratique, des arrêtés restreignent l'exploitation des aéronefs appartenant aux catégories 1 et 2 sur les aéroports européens aux seuls cas exceptionnels prévus dans la directive 2002/30.

Outre la transcription en droit français de la directive 2002/30 via le décret 2004-1051 du 28 septembre 2004, le bruit aérien est également réglementé au niveau national par le code de l'urbanisme (introduisant les plans d'exposition au bruit), le code des impôts et le code de l'environnement (pour les plans de gêne sonore) et la circulaire 1870/SBA/6 du 8 mai 1979 (instaurant les études de gêne sonore) : ⁴

Les plans d'exposition au bruit (PEB) sont des outils de maîtrise de l'urbanisme limitant les constructions dans les zones les plus touchées par la nuisance sonore. Ils s'appuient sur une carte des zones de bruit, délimitées à partir des valeurs de l'indice L_{den} (moyenne logarithmique pondérée des niveaux énergétiques équivalents LA_{eq} (6h-18h) pondéré 1, LA_{eq} (18h-22h) pondéré 3 et LA_{eq} (22h-6h) pondéré 10) estimées à court, moyen et long terme. Les PEB concernent les aéroports de classe A, B et C du code de l'aviation civile français, c'est-à-dire des aéroports les plus importants aux aéroports destinés seulement aux services à courtes distances. Mais tout aérodrome est susceptible d'être ajouté à la liste des plates-formes concernées par les PEB par arrêté ministériel. Moyennant l'ajout d'indicateurs dans le rapport de présentation, l'existence des PEB en France répond également aux exigences de la directive européenne 2002/49 concernant la création de cartes stratégiques de bruit (CSB) pour les grandes villes et les aéroports importants.

Les plans de gêne sonore (PGS) quant à eux définissent les zones dans lesquelles les logements et les bâtiments publics sensibles font l'objet d'aides financières à l'insonorisation. L'indice utilisé est également le L_{den} . Les aéroports concernés sont définis à l'article 1709 quater viciés A du code général des impôts.

Enfin, les études de gêne sonore (EGS) sont obligatoires dans l'étude environnementale imposée pour tout avant-projet de plan-masse, dont les projets d'aménagements aéroportuaires.

Il faut également noter que la France dispose d'une autorité administrative indépendante, l'ACNUSA (Autorité de Contrôle des Nuisances Sonores Aéroportuaires) dont le rôle est d'émettre des avis sur les mesures envisagées pour atténuer l'impact du bruit aéroportuaire et d'assurer la communication envers le public. Cette autorité indépendante dispose en outre d'un pouvoir de sanction lui permettant ainsi de pénaliser financièrement les compagnies aériennes qui ne respecteraient pas les dispositions spécifiques pouvant être arrêtées par le ministre chargé des transports pour certains aéroports sensibles.

³ Cf. Parlement européen [3, p. 42-43].

⁴ Cf. STAC [2, p. 11-12].

1.2.2 Réglementation des émissions de polluants

Le texte de référence en matière d'émissions gazeuses des aéronefs est l'annexe 16 volume II de l'OACI. En dehors de ce texte, les seules mesures touchant les émissions des aéronefs proviennent des dispositions relatives à la politique générale de lutte contre le changement climatique ou de protection de l'environnement (accords de Kyoto, Grenelle de l'environnement, loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie). L'annexe 16 de l'OACI demeure donc le seul texte réglementaire portant spécifiquement sur les émissions des avions. L'évaluation des émissions repose sur la notion de cycle LTO (*Landing Take-Off*). Ce dernier est défini par l'OACI de la façon suivante : ⁵

Phase	Durée	Régime de poussée (par rapport à la poussée nominale des moteurs)
Approche	4 minutes	30 %
Roulage (arrivée + départ)	26 minutes	7 %
Décollage	0,7 minute	100 %
Montée	2,2 minutes	85 %

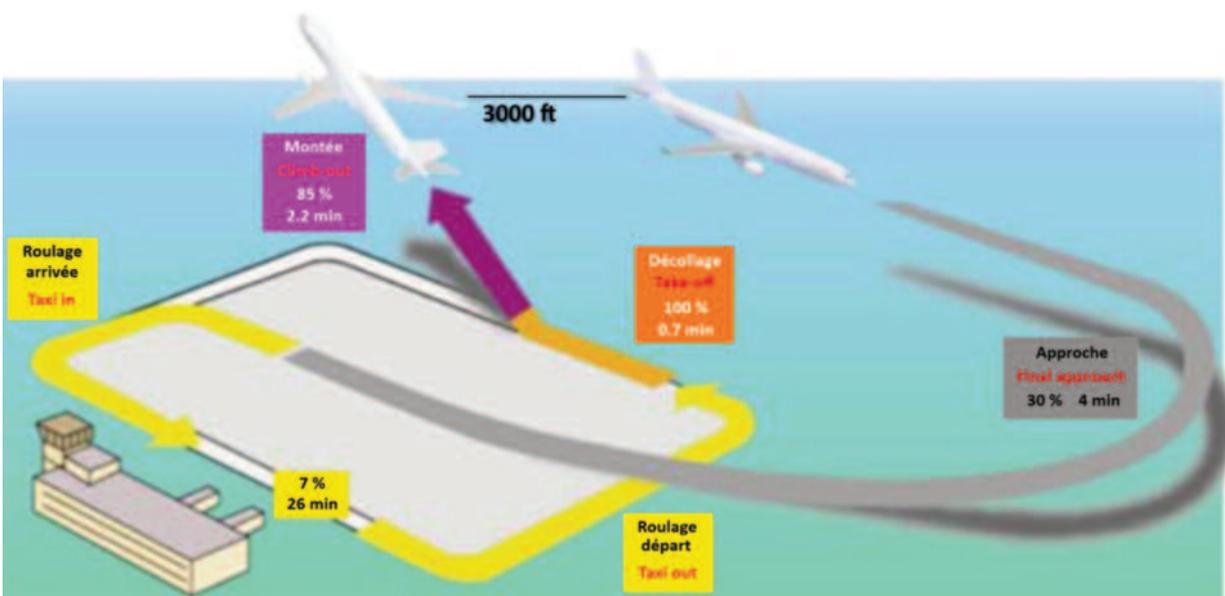


Illustration 5 : Les quatre phases du cycle LTO standard de l'OACI (source : DGAC)

⁵ Cf. OACI [4, p. 30].

L'OACI définit également des protocoles de mesure et des seuils minimaux pour l'obtention de la certification des moteurs, mais la réalisation des tests des moteurs sur banc d'essai et la communication des résultats à l'OACI est généralement déléguée aux motoristes⁶. Ceux-ci sont cependant tenus d'appliquer les méthodes définies à l'annexe 16 et de préciser le mode opératoire ainsi que les valeurs intermédiaires obtenues lors de la détermination des émissions. Les émissions réglementées sont peu nombreuses.

Ce sont :

- les composés hydrocarbonés imbrûlés, exprimés en tant qu'équivalent méthane,
- le monoxyde de carbone (CO),
- les oxydes d'azote (NO_x),
- les fumées (qui correspondent aux particules fines).

Il est également nécessaire de remarquer que les méthodes de mesure préconisées dans l'annexe 16 ne sont pas forcément les méthodes les plus performantes en ce qui concerne l'estimation des hydrocarbures imbrûlés et des particules fines. En effet, l'OACI impose que les hydrocarbures imbrûlés soient mesurés à l'aide d'un détecteur à ionisation de flamme, appareil qui a tendance à ne pas prendre en compte la totalité de la masse des espèces carbonées comportant de l'oxygène.⁷ Concernant les fumées, l'intérêt principal de leur mesure est de permettre d'évaluer la quantité de particules fines rejetées. Compte tenu des hautes températures et vitesses des gaz d'échappement des moteurs d'aviation, il n'existe pas encore de dispositifs de filtres suffisamment performants permettant de recueillir toutes les particules fines émises par les turboréacteurs et les turbopropulseurs. La méthode préconisée par l'OACI, entre autres, ne permet de prendre en compte que les suies (particules fines non volatiles).⁸

Dans l'ensemble, la réglementation sur les émissions polluantes des aéronefs reste donc bien moins développée que la réglementation concernant les émissions sonores. En effet, le peu de polluants atmosphériques réglementés et le fait que les certificats soient délivrés en s'appuyant sur la bonne foi des motoristes, sont sans comparaison avec les exigences et le contrôle qui sont réalisés pour la maîtrise de la nuisance sonore. Néanmoins, aux vues des valeurs figurant dans la base de données constituée par l'OACI à partir des données de certification des moteurs, il faut également remarquer que les exigences actuelles des compagnies aériennes en matière d'efficacité des moteurs et d'économies de carburant, conduisent les motoristes à proposer aujourd'hui des moteurs bien plus « propres » que cela ne leur est imposé réglementairement.

⁶ Cf. OACI [5, p. 1].

⁷ Cf. Iovinelli, Gupta, Ma et al. [6, p. 9].

⁸ Cf. Wayson, Fleming, Iovinelli [7, p. 2].

1.3 Objectifs du projet d'intégration de données environnementales dans les études de capacité aéroportuaire

Il existe déjà un certain nombre d'outils dont le but est de quantifier et de qualifier les impacts environnementaux des aéronefs au voisinage des aéroports. Les ambitions du projet dont fait l'objet ce rapport ainsi que ses différences par rapport aux outils existants vont à présent être détaillées.

1.3.1 Outils existants de calcul d'impact environnemental utilisés et parti pris pour ce projet

Estimation du bruit des avions

La nuisance sonore étant celle qui est la plus ressentie par les riverains, sa prise en compte est d'ores et déjà bien développée. Le logiciel utilisé par la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) pour l'élaboration des PEB, PGS, EGS, CSB et tout autre type de cartes de niveaux de pression acoustique, est le logiciel INM (*Integrated Noise Model*) développé par l'administration américaine de l'aviation civile (FAA). Ce logiciel est compatible avec les sorties du logiciel utilisé pour les études de capacité (*SIMMOD*, *SIMulation MODel*), lequel est également un logiciel originellement développé par la FAA.

Par conséquent, il existe déjà un couplage performant entre les études de capacité et le volet bruit des impacts environnementaux du trafic aérien sur un aéroport alors qu'un tel couplage n'existe pas encore en ce qui concerne les volets émissions et consommations. Compte tenu de l'interopérabilité de *SIMMOD* et *INM*, la suite de ce rapport ne s'attachera donc qu'à la définition d'un modèle et d'une méthode permettant, parallèlement à une étude de capacité, d'évaluer et de quantifier les impacts sur les volets émissions et consommations que génèrent les divers scénarios étudiés en capacité.

Estimations des émissions de polluants

À l'instar des réglementations associées, malgré l'importance croissante des enjeux environnementaux dans les politiques de développement des transports, l'évaluation des consommations et émissions des avions, pour une plate-forme aéroportuaire donnée, reste très peu précise.

Ceci peut s'expliquer par le fait que ces deux volets ne causent pas de nuisances fortes directement ressenties par les riverains. Au contraire du bruit, les émissions et consommations des aéronefs ne font donc pas l'objet d'estimations très poussées. À l'heure actuelle, les modèles d'émissions en fonction de la consommation de carburant sont encore peu aboutis et, les exigences de certification de l'OACI étant peu nombreuses, les données disponibles sur les émissions des moteurs ne sont pas aussi complètes et détaillées qu'elles pourraient l'être avec les moyens de mesure actuels.

La DGAC a mis au point et utilise un logiciel d'estimation des émissions des avions baptisé OCEAN (Outil de Calcul des Émissions Annuelles des aéroNefs). Cet outil met en œuvre une modélisation simple des émissions (cf. annexe B pour le comparatif entre le modèle simple utilisé par OCEAN et le modèle proposé dans ce rapport) s'appuyant sur une base de données de consommations et de facteurs d'émissions pour tous les modèles de moteurs d'avion et pour les quatre phases du cycle LTO décrites dans l'annexe 16 de l'OACI. Les émissions sont ensuite estimées à partir :

- de valeurs de durées des quatre phases du cycle LTO sur mesure pour chaque aéroport (au lieu d'utiliser les durées de phases standards de l'OACI),
- d'une feuille de trafic recensant, au cours d'une année, les nombres d'avions de chaque modèle qui ont fait escale à l'aéroport étudié.

En ce qui concerne les émissions des autres sources que les aéronefs, le CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Études sur la Pollution Atmosphérique) a réalisé à la demande de la DGAC un guide⁹ détaillant une méthode permettant d'évaluer précisément les émissions des activités sol (hors aéronefs) d'un aéroport.

⁹ Guide intitulé : *Guide méthodologique pour la détermination des émissions dans l'atmosphère d'une zone aéroportuaire à l'exception des aéronefs*. Paris : CITEPA, mai 2008.

Objectifs du modèle proposé dans ce rapport

L'intérêt de l'intégration de données environnementales dans les études de capacité est en premier lieu d'offrir une perspective supplémentaire dans l'évaluation des gains et pertes générés par les divers scénarios envisagés dans ces études. La vocation première de ce projet est donc de permettre de calculer des variations d'émissions entre deux scénarios relativement proches, et non d'évaluer les émissions d'une plate-forme aéroportuaire dans l'absolu. D'autre part, les études de capacité sont généralement réalisées sur une base de 24 heures de trafic représentatif, appelées journée de référence, alors que l'année serait une base de temps plus pertinente pour l'évaluation, dans l'absolu, des émissions globales d'un aéroport.

Le modèle utilisé par OCEAN et le modèle qui sera décrit dans la deuxième partie de ce rapport diffèrent donc principalement dans la précision de la modélisation de l'impact des conditions de roulage sur les émissions. En effet, la consommation des avions pendant leur passage sur un aéroport ne dépend pas seulement du temps qu'ils y passent mais également de la façon dont ils circulent. À temps équivalents et pour un même modèle d'aéronef, un roulage ne nécessitera pas la même quantité de carburant suivant le nombre de moteurs utilisés pour le roulage, la masse de l'appareil, ou encore le nombre d'arrêts qu'il est contraint d'effectuer. Les études de capacité peuvent porter sur des scénarios modifiant sensiblement les conditions de roulage sans pour autant impacter aussi sensiblement les temps moyens de roulage des avions. Le bilan des émissions de chaque scénario doit être en mesure d'en rendre compte.

Concernant les émissions prises en compte pour le bilan de chaque scénario, il semble pertinent de ne s'intéresser qu'aux émissions des aéronefs. Ce choix se justifie par le fait que les données produites lors d'une étude de capacité ne s'intéressent qu'aux aéronefs et que de plus, la façon dont roulent les avions n'impacte pas vraiment ni le reste des véhicules aéroportuaires (tracteurs de chariots à bagage, véhicules d'avitaillement, véhicules de sécurité, etc.), ni les sources fixes d'émissions présentes sur un aéroport. Dans une optique de comparaison de deux scénarios, la prise en compte des émissions des autres sources que les avions ne sont donc pas justifiées.

1.3.2 Indicateurs environnementaux retenus

Quantifier les émissions générées par les aéronefs sur un aéroport a surtout une pertinence au niveau local et régional. Les risques pour la santé liée aux émissions de polluants locaux par les avions concernent en effet surtout les riverains et le personnel des zones aéroportuaires, où les polluants s'accumulent. Les polluants locaux émis pendant la croisière sont par contre trop dilués pour avoir un impact sensible.

C'est en revanche le contraire concernant la contribution de l'aviation à l'effet de serre, laquelle est majoritairement due au CO₂ émis pendant la phase de croisière (phase généralement la plus longue des vols). Il est néanmoins intéressant d'évaluer la quantité de gaz à effet de serre rejetés par les avions dans une zone aéroportuaire dans la mesure où l'objectif des études est de faire la différence des indicateurs entre deux situations dont on peut supposer que les différences qui les caractérisent ne portent pas sur les conditions de vol en dehors de la zone aéroportuaire étudiée.

Les indicateurs d'impacts aux conséquences globales

- CO₂ : sa longue durée de vie, de l'ordre du siècle, lui permet de s'accumuler dans l'atmosphère et lui confère ainsi un fort pouvoir de réchauffement par effet de serre. Il s'agit d'un produit de toute réaction de combustion d'un produit hydrocarboné et plus la réaction de combustion est idéale, plus la quantité de CO₂ rejetée est importante.

Seule la vapeur d'eau a une contribution à l'effet de serre global supérieure à celle du CO₂, mais la production anthropique de vapeur d'eau, et a fortiori celle des transports aériens, est négligeable devant la production de vapeur d'eau d'origine naturelle.

Le méthane, le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote sont également des gaz à effet de serre mais leur contribution est négligeable devant celle du CO₂. Ces polluants seront cependant intégrés aux indicateurs en raison de leurs impacts locaux.

- Carburant consommé: il exprime entre autres l'épuisement d'une ressource non renouvelable. L'intérêt de cet indicateur est en fait surtout d'ordre économique, car il s'interprète aisément sous forme de gains ou pertes financières. Dans une optique d'évaluation de divers scénarios de capacité, cet indicateur offre donc une indication très précieuse, en complément des indicateurs portant sur les retards et conflits de priorité générés dans le domaine strict de la capacité aéroportuaire.

Il faut également noter que les émissions de polluant sont toutes plus ou moins directement liées à la quantité de carburant brûlé. Le carburant consommé constitue donc aussi un assez bon indicateur de l'ensemble des émissions de polluants.

Les indicateurs d'impacts aux conséquences locales et régionales

- HC: hydrocarbures imbrûlés, résultats de la combustion incomplète du kérosène. Ils sont surtout produits lorsque les moteurs tournent à des régimes bas. Une grande variété d'espèces chimiques entre dans cette catégorie, certaines pouvant être irritantes pour les voies respiratoires et les yeux, ou même être cancérogènes. La nuisance que celles-ci génèrent pour les riverains et le personnel travaillant sur la zone aéroportuaire varie donc d'un simple inconfort olfactif à des risques majeurs pour la santé.

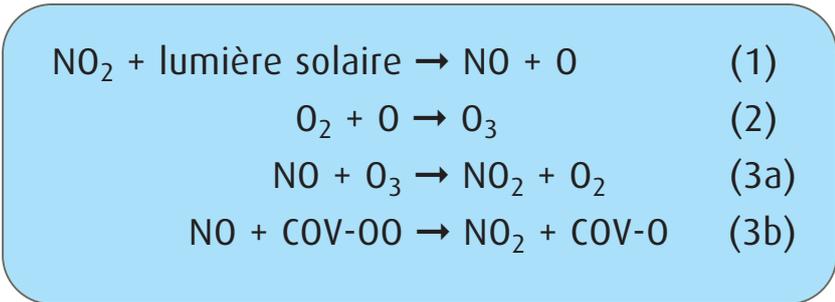
- COV: composés organiques volatils. Ils font partie des hydrocarbures imbrûlés. Outre les risques qu'ils présentent pour la santé en tant qu'hydrocarbures, ils ont également la particularité de réagir avec l'oxygène et les oxydes d'azote dans le processus photochimique complexe de formation de l'ozone dans la basse atmosphère (cf. Illustration 6).

- NO_x: oxydes d'azote (NO et NO₂), ils sont principalement rejetés quand les moteurs fonctionnent à des régimes hauts (décollage et montée)¹⁰. Outre leur participation au processus de formation de l'ozone, ces gaz contribuent à rendre les milieux aqueux acides (acide nitreux). Ils sont donc irritants, notamment pour les voies respiratoires, et participent aux phénomènes de pluies acides.

- SO₂: Dioxyde de soufre, son taux de rejet est indépendant du régime moteur et ne dépend que de la teneur en soufre du carburant et de la quantité qui en est consommé¹⁰. Tout comme les NO_x, ce gaz rend les milieux aqueux acides (acide sulfurique) et contribue aux phénomènes de pluies acides.

- CO: produit de la combustion incomplète du kérosène, donc surtout généré aux régimes moteur bas. Outre sa participation à la formation d'ozone, il est dangereux à haute dose pour la santé car il prend la place de l'oxygène dans le sang.

- PM_{2,5}: Particules fines de diamètre inférieur à 2,5 µm. Elles sont suffisamment petites pour pénétrer dans le système respiratoire et l'endommager. Elles peuvent également être cancérogènes. Enfin, elles se déposent sur les bâtiments et les installations, générant ainsi des salissures et des risques de dysfonctionnement en l'absence de nettoyage.



En présence de COV, les réactions (3a) et (3b) sont en compétition pour la régénération du NO₂ à partir du NO. Les COV empêchent donc la destruction de l'ozone dans la basse atmosphère en permettant au NO₂ d'être régénéré sans consommer d'ozone. OO est le groupe peroxyde.

Illustration 6 : Cycle de l'ozone (source: Joel Schwartz)

¹⁰ DGAC [8, p. 30].

Remarques et développement ultérieurs possibles

Les indicateurs retenus ne concernent que les polluants initiaux qui ne dépendent que du fonctionnement des moteurs d'aéronefs. Un certain nombre de réactions secondaires ont ensuite lieu durant les heures suivant l'émission des polluants initiaux. Ces réactions secondaires concernent principalement la formation de l'ozone qui a déjà été évoquée, et la formation d'une grande quantité de particules fines secondaires au cours de réactions complexes dont les NO_x et le SO_2 sont des réactifs.¹¹ La prise en compte des réactions secondaires permettrait une évaluation plus pertinente des nuisances réelles auxquelles les riverains et le personnel de la zone aéroportuaire sont soumis.

Cependant, une estimation des polluants secondaires nécessite la prise en compte de données météo (ensoleillement, vent, température, etc) et dépasse donc les possibilités offertes par les seules données de simulation de capacité. Néanmoins, l'utilisation de ces dernières permettant une détermination précise des émissions de chaque vol, il est possible de connaître, heure par heure, les émissions des aéronefs et leur localisation sur la zone aéroportuaire. Ainsi, lors d'un développement ultérieur, à l'aide d'un modèle météo plus ou moins simple, il devrait être possible d'estimer la pollution secondaire à partir des quantités de polluants primaires rejetés. Accessoirement, un modèle météo prenant en compte les vents moyens et les températures des masses d'air pourrait également permettre d'évaluer les concentrations et la dispersion des polluants, au lieu de se limiter à la seule quantification de ceux-ci.

Ce rapport ne présentera donc qu'une modélisation des émissions primaires, qui sont directement affectées par les conditions de roulage des aéronefs. Ces émissions seront évaluées en masses de polluants rejetés sur l'ensemble de la zone aéroportuaire.

¹¹ Cf. OACI [9, p. 3].

2. Modélisation de la consommation de carburant et des émissions des moteurs d'avions

Cette partie du rapport s'intéresse aux hypothèses retenues pour modéliser le roulage à partir des données de capacité, ainsi qu'aux modèles retenus pour quantifier les émissions des polluants retenus comme indicateurs dans la partie précédente.

2.1. Modélisation des divers régimes moteurs usuels des avions sur les aéroports

Au cours de leur passage sur un aéroport, les avions utilisent leurs moteurs à divers régimes suivant les conditions de roulage. Le régime moteur étant directement lié à la consommation, il est important de pouvoir définir précisément les régimes utilisés, afin de pouvoir calculer les consommations et émissions des aéronefs.

2.1.1. Hypothèses générales sur l'utilisation des moteurs pendant les phases du cycle LTO

En s'appuyant sur des observations des opérations des aéronefs au sein des zones aéroportuaires, sur des renseignements fournis par Airbus et Air France et sur des informations collectées sur des forums techniques où participent des pilotes professionnels (forums d'Airliners.net et de PPRuNe.org), les hypothèses suivantes ont été retenues pour modéliser l'opération des moteurs entre le moment où les avions entament leur approche et le moment où ils achèvent leur montée initiale :

- les phases d'accélération suivant un arrêt peuvent nécessiter une poussée plus élevée que le reste du roulage, en raison de l'inertie des avions. Cette poussée sera désormais appelée "poussée de démarrage".
- si une poussée de démarrage plus élevée est nécessaire pour mettre l'avion en mouvement, celle-ci n'est appliquée que pendant environ 5 secondes pour vaincre l'inertie de l'avion. La poussée de roulage est rétablie dès lors que l'avion est en mouvement.
- une fois en mouvement, les avions roulent avec un régime de poussée constant, proche du ralenti voire égal au ralenti (manette des gaz en position IDLE ou légèrement au-dessus de cette position). La vitesse est ensuite régulée par l'utilisation des freins.
- les forces de frottement dans les roulements et entre les pneus et le sol dépendent du poids des avions. Le régime de poussée utilisé pour le roulage dépend donc de la masse de l'avion et les avions au départ (généralement ayant le plein de carburant) ont donc en général besoin de plus de poussée pour rouler que les avions à l'arrivée. Ceci est valable aussi bien pour la poussée de démarrage que pour la poussée nécessaire au maintien en mouvement.
- lorsque les avions ne roulent pas avec la totalité de leurs moteurs en fonctionnement, une poussée plus forte que la poussée normale de roulage peut être nécessaire.
- les avions allument tous leurs moteurs au moins 5 minutes avant de décoller. En effet, pour éviter les chocs thermiques, les moteurs à turbines ne peuvent être lancés à pleine puissance qu'après avoir tourné à bas régime pendant une durée variant entre 4 et 5 minutes selon les modèles de moteurs.
- lors du décollage, la poussée maximale (ou poussée nominale), manette des gaz en position TO/GA, n'est utilisée que jusqu'à ce que l'avion ait quitté le sol.
- lors de l'atterrissage, les inverseurs de poussée participent au freinage de l'avion. Ce sont des systèmes mécaniques qui dévient vers les côtés et l'avant, tout ou partie du flux d'air généré par les réacteurs (cf. Illustration 7). Il est donc possible de les utiliser à différents régimes de poussée. Selon les consignes des compagnies et les longueurs de pistes disponibles, le régime appliqué avec les inverseurs de poussée peut être aussi faible que le régime IDLE ou aussi fort que le régime TO/GA. On va donc considérer que la poussée d'approche est conservée pendant toute la phase d'approche et d'atterrissage (comme cela est également considéré dans le cycle LTO standard de l'OACI cf. Illustration 5).

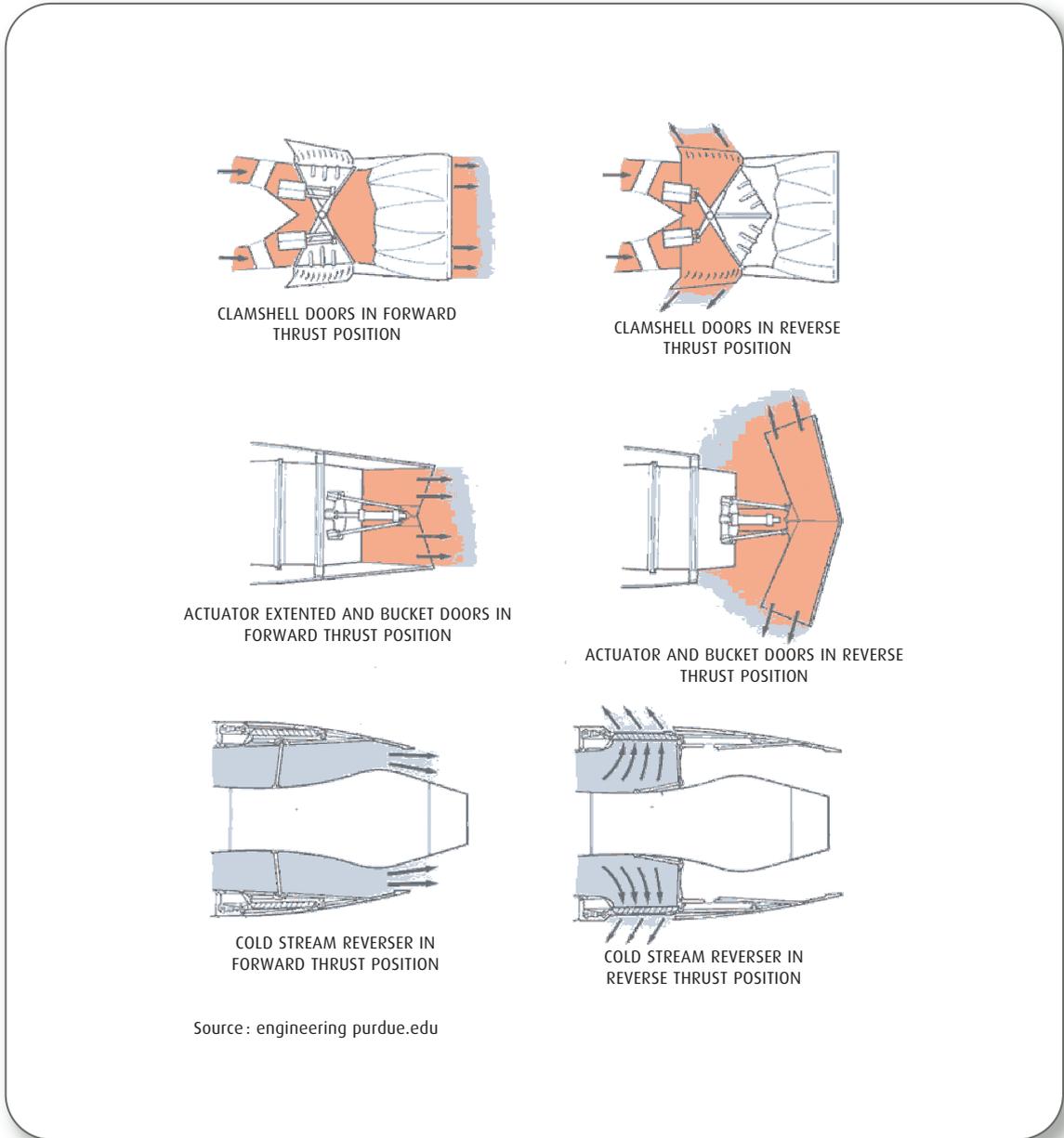


Illustration 7 : Fonctionnement des différents types d'inverseurs de poussée

2.1.2. Hypothèses concernant l'utilisation des APU

Les APU (*Auxiliary Power Unit*) sont des turbines auxiliaires embarquées destinées à alimenter les avions en électricité et en air comprimé lorsque les moteurs ne tournent pas. Par le biais de pompes électriques, les APU sont également en mesure de fournir de la pression hydraulique. Les APU sont en fait de petits réacteurs dont la rotation des étages sert à produire de l'air comprimé et de l'électricité, à la différence des moteurs principaux de l'avion, dont la vocation première est de produire de la poussée.

Le débit carburant d'une APU peut être de l'ordre du tiers, voire de la moitié de la consommation de ralenti d'un des moteurs principaux de l'avion. Par conséquent, lors du calcul d'un bilan des consommations et émissions des avions, il n'est pas possible de négliger le carburant consommé par les APU, ni les émissions qui en résultent.

Utilisation de l'APU au poste de stationnement

Les APU sont généralement nécessaires au démarrage des turboréacteurs car ceux-ci ne peuvent être démarrés que par le circuit pneumatique qui fournit les grandes quantités d'air requises pour amener les étages des réacteurs à la vitesse de rotation de démarrage. Les réacteurs d'un avion peuvent toutefois être démarrés par un générateur d'air comprimé au sol (*GPU, Ground Power Unit*), si un tel équipement est disponible et s'il peut être utilisé à un endroit suffisamment dégagé pour permettre aux réacteurs de l'avion d'y fonctionner sans mettre en danger le personnel et les équipements au sol. Certains avions équipés de turbopropulseurs peuvent démarrer leurs moteurs à l'aide de démarreurs électriques à partir des batteries, mais la plupart des avions à turbopropulseurs ont, eux aussi, besoin de leur APU pour fournir l'énergie nécessaire au démarrage des moteurs principaux. D'une manière générale, quel que soit le type d'aéronef, les batteries ne sont pas conçues pour fournir de l'électricité à l'avion pendant de longues durées et leur rôle principal est de permettre le démarrage autonome de l'APU après une période de stationnement tous systèmes éteints. Dans la très grande majorité des cas les avions utilisent leur APU pour démarrer leurs moteurs principaux.

Lors d'un départ, un certain nombre d'opérations doivent être réalisées lorsque l'avion est immobile. Le calage de l'avionique et notamment des IRS (*Inertial Reference System*), le réglage des radios et de l'ordinateur de vol se font alors que l'avion est encore à son poste de stationnement, et nécessitent que le poste de pilotage soit alimenté en électricité sans risque de perte de stabilité de l'alimentation. Pour cette raison, même si un avion dispose d'un poste de stationnement équipé d'une alimentation 400 Hz venant de l'aérogare, l'APU est démarrée environ 10 minutes avant l'allumage des moteurs principaux, permettant ainsi de réaliser l'initialisation de l'avionique uniquement avec l'alimentation embarquée, sans prendre le risque de perdre les données au moment où la source d'alimentation électrique basculerait de l'alimentation sol vers l'alimentation embarquée. Lors d'une arrivée, il ne s'agit par contre que d'assurer la continuité entre l'alimentation assurée par les génératrices des réacteurs, et l'alimentation qui sera utilisée une fois les moteurs éteints (sol ou APU). L'utilisation de l'APU peut donc être réduite à 1 minute lors des arrivées, si le poste de stationnement dispose d'une alimentation 400 Hz¹².

Utilisation de l'APU pendant le roulage

Trois types de systèmes et de circuits vitaux sont utilisés à bord des avions : les systèmes électriques, les systèmes hydrauliques et les systèmes pneumatiques. Les systèmes électriques comprennent notamment l'avionique, l'éclairage, les radios de communication et pour certains modèles d'avions, également les commandes de vol. Les systèmes hydrauliques servent principalement pour actionner les freins, les hypersustentateurs et les surfaces de contrôle. Les circuits pneumatiques servent au démarrage des moteurs, à la climatisation de l'air, ou encore au dégivrage des ailes sur certains avions. Un avion comporte plusieurs circuits de chaque type, pour des raisons de sécurité entre autres.

¹² *Energy and environmental analysis, inc. [10, p. 29].*

L'APU est capable d'alimenter directement ou indirectement ces trois types de systèmes, ce qui n'est pas forcément le cas des moteurs principaux. En effet, la plupart des avions disposant de plusieurs moteurs, la charge de faire fonctionner les systèmes hydrauliques, électriques et pneumatiques, est généralement répartie entre les différents moteurs. Ainsi, pour la procédure de roulage à un seul moteur sur A320, Airbus spécifie que le moteur à utiliser est le moteur 1 (celui de gauche) car il fournit la pression du circuit hydraulique vert (qui alimente entre autres les freins, une partie des surfaces de contrôle et le système de direction du train avant). L'APU doit néanmoins être utilisée afin d'alimenter le circuit hydraulique jaune (freins de secours, volets, reste des surfaces de contrôle). Ce circuit est alimenté, en théorie, par le moteur 2 ou une pompe électrique fonctionnant sur le circuit électrique dépendant du moteur 2. L'APU permet de faire fonctionner cette pompe électrique et donc le circuit hydraulique jaune, sans que le moteur 2 soit en marche. Même quand au moins un moteur est en marche, l'APU peut donc rester nécessaire pour alimenter les systèmes vitaux d'un avion.

Hypothèses concernant l'utilisation des APU

D'après les informations précédemment citées, l'utilisation de l'APU est obligatoire dans les situations suivantes :

- lorsque l'avion est à un poste de stationnement non équipé d'une alimentation 400 Hz et qu'il doit être alimenté (pour l'embarquement et le débarquement de passagers, l'initialisation de l'avionique et les premières communications radio),
- lorsque l'avion est à un poste de stationnement équipé d'une alimentation 400 Hz, l'APU doit être utilisée pendant environ 1 minute pour les arrivées et 10 minutes pour les départs,
- lorsque l'avion est en roulage avec au moins un moteur chargé d'alimenter des systèmes vitaux n'étant pas en fonction.

2.1.3. Modélisation pratique de ces hypothèses et valeurs retenues

La modélisation des hypothèses de fonctionnement des APU et des moteurs dépend en grande partie des données disponibles.

Type de données disponibles

La réglementation des émissions portant uniquement sur le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote, les hydrocarbures imbrûlés et les fumées, les données produites et disponibles ne concernent généralement que ces polluants. D'autre part, hormis pour les fumées qui sont caractérisées par un indice sans dimension, la méthode de calcul préconisée par l'OACI décompose le taux d'émission d'un polluant en le produit de la consommation des moteurs par un facteur d'émission. Les données servant à la certification OACI permettent donc de connaître pour chaque modèle de moteur, les débits carburant correspondant aux quatre régimes des quatre phases du cycle LTO standard (cf. Illustration 5), ainsi que les facteurs d'émissions des polluants associés à ces régimes.

Les données de type certification, OACI ont pu être obtenues et exploitées pour les turboréacteurs et les turbopropulseurs équipant la plupart des aéronefs rencontrés sur les aéroports français faisant l'objet d'études de capacité. En ce qui concerne les APU, à l'instar des moteurs, elles peuvent fonctionner à divers régimes dépendant de la charge de travail à fournir. Cependant, les données les concernant n'étant pas assez précises, seul un régime moyen a pu être modélisé.

Les sources de données sont les suivantes en ce qui concerne les consommations et facteurs d'émissions des moteurs d'aéronefs :

- base de données de l'OACI regroupant les données pour les turboréacteurs. Cette base de données est publique (cf. bibliographie [13]).
- base de données FOI (*Totalförsvarets forskningsinstitut*: agence suédoise de recherche pour la défense) donnant les données de type certification OACI pour les turbopropulseurs, ces derniers n'étant cependant pas certifiés à l'aide de ce type de données. Cette base de données est confidentielle mais a été obtenue par la DGAC lors de la création de l'outil OCEAN.
- les documents *Technical data to support FAA's advisory circular on reducing emissions from commercial aviation*¹³ et Guide méthodologique pour la détermination des émissions dans l'atmosphère des APU¹⁴ fournissent les données concernant les consommations et émissions des APU. Les deux études fournissent des résultats assez différents. L'étude française ne prend en compte que deux catégories d'APU, une pour les court-courriers et les moyen-courriers et une autre pour les long-courriers, les APU des long-courriers offrant une combustion nettement plus complète que celles des avions plus petits. L'étude américaine donne par contre des valeurs pour chaque modèle d'APU, ce qui permet entre autre de faire la différence entre les APU des 747, connues pour leurs fortes consommations, et les APU des autres long-courriers. Les valeurs fournies par l'étude américaine ont été privilégiées pour le calcul des émissions et consommation des APU.

À partir de ces bases de données, deux bases de données spécifiquement adaptées au modèle proposé dans ce rapport ont été constituées. La première concerne les émissions des moteurs principaux et la seconde concerne les APU.

Données à fournir en plus de la base de données consommations et émission et de la simulation SIMMOD

Concernant les durées d'utilisation des moteurs à divers régimes et les durées d'utilisation des APU, elles peuvent être déterminées très précisément par l'exploitation des simulations SIMMOD, à condition de fournir « manuellement », au préalable, un certain nombre de données qui ne peuvent être déduites à partir des seules données de SIMMOD. Il faut noter que « manuellement » ne signifie pas que les données doivent être entrées une par une, mais qu'il n'est pas possible de les déterminer automatiquement à partir de ce qui a été modélisé dans SIMMOD.

¹³ *Energy and environmental analysis, inc.* [10, p. 34-39].

¹⁴ *Serveau* [11, p. 2].

Ces données à fournir « manuellement » sont pour chaque vol simulé :

- les vols qui appliquent une procédure de roulage avec certains moteurs éteints : comme cela n'a généralement pas d'influence sur les vitesses de roulage des avions, cela n'a pas non plus d'impact sur la capacité et n'est donc pas modélisé ni spécifié lors de la programmation d'une modélisation SIMMOD.
- la durée d'utilisation de l'APU au poste de stationnement : elle dépend de la disponibilité de prises 400 Hz sur les postes de stationnement utilisés et des consignes des compagnies aériennes. Aucune de ces deux informations n'est modélisée dans SIMMOD.
- la nécessité d'utilisation de l'APU pendant le roulage avec certains moteurs éteints : elle dépend des modèles d'aéronefs (informations disponibles dans SIMMOD) mais aussi des consignes de sécurité des compagnies aériennes (non disponible dans SIMMOD).
- la nécessité d'utilisation de l'APU pendant le roulage avec tous les moteurs en fonction : en théorie, elle n'est pas nécessaire sauf consignes spécifiques des compagnies aériennes.

Modélisation d'un cycle LTO détaillé pour chaque vol à partir des ces données

Les possibilités offertes par les données disponibles permettent de modéliser les hypothèses formulées aux paragraphes précédents en prévoyant treize types de couples configuration/régime moteur. Deux configurations sont prévues pour les roulages (tous moteurs en fonction ou certains moteurs éteints) et huit régimes sont envisagés, cinq d'entre eux étant des régimes utilisés en roulage. Les durées passées par les moteurs dans ces divers couples de configurations et régimes peuvent être déterminées très précisément à partir de l'historique d'une simulation SIMMOD et des données fournies manuellement.

- Approche : 30 % de la poussée nominale, la durée est calculée pour les mouvements d'arrivée en additionnant le temps passé en vol par l'avion pendant l'approche finale, au temps qu'il a passé sur la piste.
- Roulage à l'arrivée : correspond au régime nécessaire pour maintenir un avion en mouvement lors d'un roulage à l'arrivée, une fois sorti de la piste, tous les moteurs étant en fonction. Ce régime est pour la plupart des modèles d'aéronefs inférieur aux 7 % de poussée de la phase de roulage standard de l'OACI, et le simple ralenti complet (IDLE) suffit généralement (le ralenti complet correspond à environ 4 % de la poussée TO/GA). Le temps passé dans ce couple configuration/régime est déterminé à partir de la simulation SIMMOD.
- Roulage à l'arrivée en configuration économique (certains moteurs éteints) : correspond au régime nécessaire pour maintenir un avion en mouvement lors d'un roulage à l'arrivée avec seulement une partie des moteurs en fonction. Le régime IDLE devrait également suffire dans la plupart des cas. La différence avec le roulage à l'arrivée ci-dessus est que seule une partie des moteurs consomme du carburant et émet des polluants. Le temps passé dans ce couple configuration/régime est déterminé à partir de la simulation SIMMOD.
- Poussée de démarrage pour un roulage à l'arrivée : poussée à appliquer pour mettre l'avion en mouvement après un arrêt, tous les moteurs étant en marche, lors d'un roulage à l'arrivée. Le régime IDLE devrait également suffire dans la plupart des cas (ce qui signifie que le maintien à l'arrêt nécessite généralement l'application des freins quand l'avion est en roulage à l'arrivée). La durée est fixée dans le modèle à 5 secondes par démarrage.
- Poussée de démarrage pour un roulage à l'arrivée en configuration économique : poussée à appliquer pour mettre l'avion en mouvement après un arrêt, tous les moteurs n'étant pas utilisés, lors d'un roulage à l'arrivée. Le régime IDLE devrait également suffire dans la plupart des cas. La durée est fixée dans le modèle à 5 secondes par démarrage.
- Ralenti complet (IDLE) : temps pendant lequel l'avion est arrêté ou est en train de ralentir en vue d'un arrêt complet, alors qu'il roule en configuration tous moteurs. Le régime de poussée correspondant avoisine les 4 % de la poussée nominale. Le temps passé dans ce couple configuration/régime est déterminé à partir de la simulation SIMMOD.
- Ralenti complet en configuration économique : temps pendant lequel l'avion est arrêté ou est en train de ralentir en vue d'un arrêt complet, alors qu'il roule en configuration économique. Le temps passé dans ce couple configuration/régime est déterminé à partir de la simulation SIMMOD.

- Roulage au départ: correspond au régime nécessaire pour maintenir un avion en mouvement lors d'un roulage au départ, tous les moteurs étant en fonction. Le régime de ralenti complet ne devrait pas suffire pour la plupart des avions, en particulier les long-courriers, qui emportent une part importante de leur masse totale en carburant, lors d'un départ. La poussée nécessaire varie selon les types d'avions entre 6 % et 7 % de la poussée de décollage. Le temps passé dans ce couple configuration/régime est déterminé à partir de la simulation SIMMOD.
- Roulage au départ en configuration économique: correspond au régime nécessaire pour maintenir un avion en mouvement lors d'un roulage au départ, certains moteurs étant éteints. Le régime de ralenti complet ne devrait pas suffire pour la plupart des avions. Il faut remarquer que ce type de roulage est peu pratiqué par les compagnies car il peut nécessiter des régimes de poussée consommateurs en carburant et dangereux pour le personnel et les véhicules présents sur la zone aéroportuaire (*jetblast*), la poussée nécessaire variant entre environ 6 % pour les avions les plus mobiles et 15 % pour certains gros-porteurs. Pour des raisons de sécurité, certains long-courriers ne peuvent donc pas pratiquer ce type de roulage. Le temps passé dans ce couple configuration/régime est déterminé à partir de la simulation SIMMOD.
- Poussée de démarrage pour un roulage au départ: poussée à appliquer pour mettre l'avion en mouvement après un arrêt, tous les moteurs étant en marche, lors d'un roulage au départ. Le ralenti devrait rarement suffire, en particulier pour les long-courriers. La poussée requise varierait entre 6 % et 20 %, selon les modèles d'avions. La durée est fixée dans le modèle à 5 secondes par démarrage.
- Poussée de démarrage pour un roulage au départ en configuration économique: poussée à appliquer pour mettre l'avion en mouvement après un arrêt, certains moteurs étant éteints, lors d'un roulage au départ. Le ralenti devrait très rarement suffire, même pour les court-courriers. Entre 6 % et 30 % de la poussée de décollage pourraient être nécessaires, suivant les modèles d'avions. La durée est fixée dans le modèle à 5 secondes par démarrage.
- Poussée de décollage: 100 % de la poussée nominale. Le régime TO/GA est maintenu jusqu'à ce que l'avion ait quitté le sol.
- Poussée de montée: 85 % de la poussée nominale. Ce régime (aussi appelé régime CLIMB) est maintenu pendant tout le temps passé en l'air par un vol au départ, jusqu'à ce qu'il soit sorti du volume pris en compte dans le cycle LTO.

Remarques importantes:

- un mouvement, c'est-à-dire un départ ou une arrivée, utilise au plus huit de ces types de couple configuration/régime (c'est le cas d'un départ en configuration économique) et ne peut les utiliser tous.
- pour la phase de roulage, les données de type certification OACI ne donnent des valeurs de consommation et de facteurs d'émission que pour un régime moteur correspondant à 7 % de poussée. Or ce régime de poussée standard ne correspond à pratiquement aucun des régimes prévus dans la modélisation proposée dans ce rapport. Il a donc été considéré que les facteurs d'émission restaient suffisamment constants pour les bas régimes moteurs, pour pouvoir considérer que seule la consommation de carburant était impactée par les différences de poussée requises pour faire rouler les avions, à différentes configurations de nombre de moteurs utilisés et de masse. Des coefficients de redressement ont donc été proposés (annexe C) pour évaluer les consommations correspondant aux divers types de couple configuration/régime envisagés. Ces coefficients sont à appliquer aux valeurs des consommations correspondant aux 7 % standards de poussée.
- Afin de pouvoir évaluer les consommations et émissions des aéronefs pendant les phases de roulage ne correspondant à aucun régime standard du cycle LTO, une modélisation des facteurs d'émission et du débit de carburant en fonction du pourcentage de poussée délivrée par les moteurs a été proposée. Cette modélisation repose sur le polynôme interpolateur de Lagrange correspondant aux 4 points de fonctionnement connus dans les données de certification des moteurs publiées par l'OACI. Le polynôme de Lagrange est utilisé directement pour modéliser le débit de carburant ainsi que les facteurs d'émission de NO_x et de $\text{PM}_{2,5}$ non volatiles (indice de fumée). Pour les facteurs d'émission d'hydrocarbures imbrûlés et de monoxyde de carbone, le polynôme de Lagrange est calculé sur une échelle logarithmique afin d'atténuer les oscillations de l'approximation polynomiale et respecter la tendance asymptotique de ces émissions pour les régimes moteur élevés. Les résultats obtenus pour un A340 sont présentés dans l'illustration 8.

- quelle que soit la configuration de roulage choisie pour un vol, l'avion doit allumer tous ses moteurs un certain temps avant le décollage, pour respecter le minimum de 4 ou 5 minutes de préchauffage. La valeur préconisée serait de 6 minutes, au vu des informations disponibles. Le démarrage des moteurs pouvant prendre un certain temps, ces 6 minutes permettent de prendre en compte le fait que les pilotes auraient tendance à prendre une certaine marge de sécurité pour ne pas se retrouver dans une situation où ils seraient autorisés à décoller avant que les moteurs ne leur en offrent la possibilité technique.
- de même, dans le modèle, l'avion est supposé conserver tous ses moteurs allumés pendant un certain temps après l'atterrissage, afin de laisser les moteurs refroidir lentement avant leur extinction (ce qui peut être plus ou moins nécessaire suivant la poussée qui a été utilisée pour le freinage via les inverseurs de poussée). Ce temps a aussi pour but de permettre à l'avion de traverser l'éventuelle piste de décollage (les traversées de pistes nécessitent tous les moteurs pour des raisons de sécurité) qui peut le séparer de la zone des terminaux, comme cela est souvent le cas sur les grands aéroports français. La valeur recommandée au vu des données disponibles est de 2 minutes, soit le temps moyen qui sépare le moment où un avion quitte la piste d'atterrissage et le moment où il finit de traverser la piste de décollage, lors d'un roulage à l'arrivée sur un aéroport disposant d'un doublet de pistes parallèles.

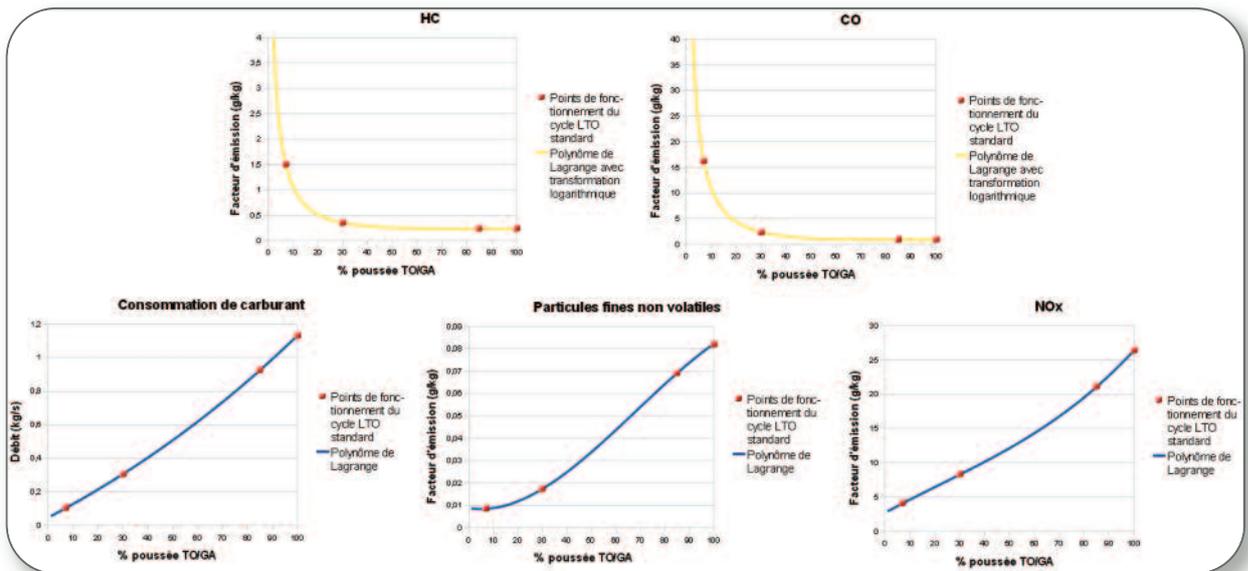


Illustration 8 : Modélisation des facteurs d'émission et de la consommation de carburant en fonction de la poussée délivrée

2.2 Modélisation des émissions de polluants

Diverses études ont été utilisées comme base pour la création d'un modèle d'émissions des divers polluants, à partir des régimes moteurs et du débit de carburant consommé. Les formules de calcul retenues vont être présentées dans ce paragraphe.

2.2.1. Émissions de CO et de NO_x

Parmi les indicateurs retenus au 1.3.2 (p. 22), le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote sont les seuls à être exactement des polluants réglementés au sens de l'annexe 16 de l'OACI. Le calcul de leurs taux d'émission respectifs utilisera donc directement les données de certification OACI et se fera selon la formule suivante :

$$\text{taux d'émission (gls)} = \text{débit de carburant (gls)} \times \text{facteur d'émission (g}_{\text{polluant émis}}/\text{g}_{\text{carburant consommé}})$$

Les débits de carburant et les facteurs d'émissions sont fournis par les bases de données OACI et FOI évoquées au début du paragraphe 2.1.3 (p. 29).

2.2.2 Émissions d'hydrocarbures imbrûlés et de composés organiques volatils

Concernant les hydrocarbures imbrûlés, comme cela a été évoqué au 1.2.2 (p. 19), la méthode préconisée par l'OACI pour la quantification des émissions d'hydrocarbures imbrûlés omet une certaine quantité de composés organique comportant des atomes d'oxygène. Par conséquent, contrairement aux émissions de CO et NO_x, il n'est pas possible d'estimer la quantité totale d'hydrocarbures rejetée en utilisant simplement les facteurs d'émissions relatifs aux HC fournis dans les bases de données OACI et FOI.

D'après une étude réalisée pour le compte de la FAA ainsi que pour l'agence américaine de protection de l'environnement (EPA), il est cependant possible d'évaluer simplement, à l'aide d'un coefficient de redressement, la quantité totale d'espèces organiques rejetées par les moteurs d'aéronefs, en s'appuyant sur les quantités de HC en équivalent méthane, que les données de certification OACI permettent d'obtenir. De même, un autre coefficient de redressement permet d'évaluer les quantités de COV rejetées, à partir des quantités de HC fournies par les données de type certification OACI.¹⁵

Les émissions de HC et de COV seront donc estimées par les formules suivantes :

$$\text{taux d'émission}_{\text{HC}} = 1,16 \times \text{débit de carburant} \times \text{facteur d'émission}_{\text{HC}}$$

$$\text{taux d'émission}_{\text{COV}} = 1,15 \times \text{débit de carburant} \times \text{facteur d'émission}_{\text{HC}}$$

Il est intéressant de constater que d'après cette modélisation des émissions d'espèces organiques, les COV représentent plus de 99 % de la masse totale des espèces hydrocarbonées rejetées par les avions.

2.2.3 Émissions de SO₂

Le kérosène destiné aux moteurs à turbine contient une faible concentration de soufre. La réglementation sur les carburants d'aviation impose que la fraction de soufre contenue dans le kérosène soit inférieure à 0,3 % de la masse totale de carburant. Il n'y a pas d'autre réglementation concernant le soufre dans l'aviation car, celui-ci ne se fixant pas dans les moteurs, ces derniers rejettent exactement autant de soufre qu'il en est introduit par le carburant.

¹⁵ Cf. Iovinelli, Gupta, Ma et al. [6, p. 9-11].

Les procédés de raffinage actuels du pétrole conduisent à une désulfuration presque totale de celui-ci. Les compagnies pétrolières fournissent donc généralement des kérosènes contenant une fraction massique de soufre de l'ordre de 0,05 %¹⁶, donc bien inférieure à la norme.

Les deux kérosènes principaux utilisés par les moteurs à turbine des avions commerciaux sont le Jet A, utilisé aux États-Unis, et le Jet A1, utilisé dans pratiquement tout le reste du monde, hormis aux endroits où les trop basses températures nécessitent des compositions de kérosène spécifiques. Les aéroports nous intéressant étant les aéroports français, la valeur de la fraction de soufre que nous allons utiliser est 0,046 %, soit la valeur moyenne pour le Jet A¹⁶, puisque seuls les avions à l'arrivée en provenance des États-Unis sont susceptibles de consommer un autre type de carburant.

D'après la méthode d'estimation des émissions de particules fines appelée FOA3.0 (troisième version de la méthode « *First Order Approximation* » d'estimation des particules fines), le soufre en solution dans le carburant a une masse moléculaire de 32 et contient un atome de soufre par molécule. D'autre part, 96,7 % de la quantité stœchiométrique de ce soufre est rejetée sous forme de SO₂ (le reste étant rejeté sous une forme plus oxydée).¹⁶ D'après les masses atomiques de l'oxygène et du soufre (respectivement 32 et 16), la masse moléculaire du SO₂ est 64. Comme les molécules de SO₂ contiennent un seul atome de soufre par molécule, il est donc possible d'en déduire que le taux d'émission massique de SO₂ peut être modélisé par la formule suivante :

$$\text{taux d'émission}_{\text{SO}_2} = 0,967 \times \frac{0,00046 \times \text{débit de carburant}}{32} \times 64$$

$$\text{taux d'émission}_{\text{SO}_2} = 0,00088964 \times \text{débit de carburant}$$

2.2.4. Émissions de PM_{2,5}

Les particules fines émises par les moteurs à turbines sont de très petites dimensions, la distribution de leurs diamètres connaît deux pics à respectivement 30 nm et 100 nm.¹⁷ On peut donc considérer que toutes les particules fines émises par les avions sont des PM_{2,5}.

Deux types de particules fines sont émis par les moteurs : les particules fines non volatiles (ou suies) qui sont principalement constituées de carbone, et les particules fines volatiles qui sont en fait des agglomérats et des gouttelettes d'hydrocarbures, de composés soufrés, voire d'acide sulfurique.

Les suies

Les suies sont de couleur noire et absorbent donc la lumière. Elles sont responsables des fumées visées par l'indice de fumée réglementaire de l'OACI. D'après la méthode FOA3.0, les émissions de suies peuvent être estimées à partir des indices de fumées grâce aux formules suivantes :¹⁸

Si l'indice de fumée OACI (sans dimension) est inférieur à 30, la concentration des suies dans les gaz d'échappement est :

$$\text{concentration}_{\text{suies}} \text{ (mg/m}^3\text{)} = 0,0012 \times \text{indice de fumée}^2 + 0,1312 \times \text{indice de fumée} + 0,2255$$

Si l'indice de fumée OACI est supérieur à 30, la concentration des suies dans les gaz d'échappement est :

$$\text{concentration}_{\text{suies}} \text{ (mg/m}^3\text{)} = 0,0297 \times \text{indice de fumée}^2 - 1,802 \times \text{indice de fumée} + 31,94$$

¹⁶ Cf. Wayson, Fleming, Iovinelli [7, p. 94].

¹⁷ Cf. Wayson, Fleming, Iovinelli [7, p. 91].

¹⁸ Cf. Wayson, Fleming, Iovinelli [7, p. 97].

Si l'avion est en roulage (régime avoisinant les 7 % de la poussée TO/GA), le volume des gaz d'échappement généré par unité de carburant est :

$$\text{volume d'air (m}^3\text{/kg}_{\text{carburant}}) = 82,256 \times (1 + \text{BPR}) + 0,877$$

Si l'avion est en approche (30 % de la poussée TO/GA), le volume des gaz d'échappement généré par unité de carburant est :

$$\text{volume d'air (m}^3\text{/kg}_{\text{carburant}}) = 64,408 \times (1 + \text{BPR}) + 0,877$$

Si l'avion est en montée (régime CLIMB), le volume des gaz d'échappement généré par unité de carburant est :

$$\text{volume d'air (m}^3\text{/kg}_{\text{carburant}}) = 39,576 \times (1 + \text{BPR}) + 0,877$$

Si l'avion est en décollage (régime TO/GA), le volume des gaz d'échappement généré par unité de carburant est :

$$\text{volume d'air (m}^3\text{/kg}_{\text{carburant}}) = 34,92 \times (1 + \text{BPR}) + 0,877$$

BPR est le ratio de by-pass pris en compte lors de la mesure de l'indice de fumée. Dans un turboréacteur tel qu'en sont équipés les avions de ligne à réaction récents, la poussée est produite par deux flux d'air. Le premier est celui qui passe par tous les étages du moteur, et le second est le flux périphérique qui ne passe que par la soufflante et rejoint le premier flux à l'arrière du moteur (cf. Illustration 9). Le ratio de by-pass est le rapport du flux d'air périphérique au flux d'air central. Si l'indice de fumée a été mesuré dans le flux central uniquement, BPR vaut 0 alors que si l'indice de fumée a été mesuré dans l'ensemble du flux d'air généré par le moteur, BPR prend la valeur du ratio de by-pass nominal du moteur. Les ratios de by-pass et les flux pris en compte lors des tests des moteurs sont fournis avec les données de certification OACI. Pour les turbopropulseurs, le BPR est toujours nul car ces types de moteurs n'ont pas l'utilité d'un double flux (dans le cas des turbopropulseurs, les turbines ne servent pas directement à souffler de l'air, mais à faire tourner une hélice, qui elle, assure la propulsion).

Le taux d'émission des suies est donc donné par la formule suivante :

$$\text{taux d'émission}_{\text{suies}} = \text{concentration}_{\text{suies}} \times \text{volume d'air} \times \text{débit de carburant}$$

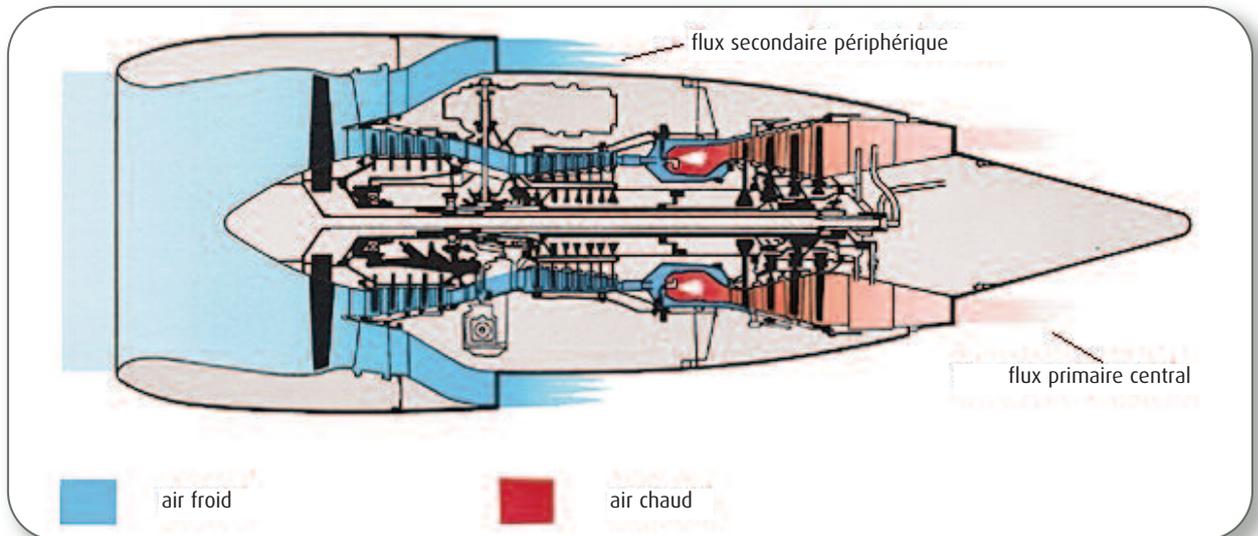


Illustration 9 : Coupe d'un réacteur à double flux (source : Larousse)

Particules fines volatiles soufrées

La fraction d'espèces soufrées contenue dans le carburant et qui n'est pas convertie en dioxyde de soufre va entamer une réaction en chaîne aboutissant à la formation de gouttelettes d'acide sulfurique. Les divers produits des étapes de cette réaction en chaîne peuvent s'agglomérer et se condenser pour former des solides ou des gouttelettes de diamètre suffisamment faible pour appartenir aux $PM_{2,5}$.

D'après la méthode FOA3.0, 3,3 % de la quantité stœchiométrique de soufre présent dans le carburant ne sont pas transformées en dioxyde de soufre lors de la combustion du kérosène. Ce sont eux qui réagissent avec les gaz présents dans le flux généré par le moteur pour constituer les particules fines volatiles soufrées.¹⁹ De la même façon que les émissions de SO_2 ont été évaluées, la méthode FOA3.0 permet donc d'obtenir une estimation des émissions des particules fines volatiles soufrées par la formule suivante :

$$\text{taux d'émission}_{PM \text{ volatiles soufrées}} = 0,033 \times \frac{0,00046 \times \text{débit de carburant}}{32} \times 96$$

$$\text{taux d'émission}_{PM \text{ volatiles soufrées}} = 0,00004554 \times \text{débit de carburant}$$

Particules fines volatiles d'origine organique

Certains vapeurs d'espèces hydrocarbonées sont émis en quantité suffisamment faible pour que leurs pressions partielles soient suffisamment basses pour permettre leur condensation, même à la température des gaz d'échappement d'un réacteur. Ces espèces hydrocarbonées forment alors des gouttelettes qui sont des $PM_{2,5}$.

La méthode FOA3.0 permet d'estimer la quantité de $PM_{2,5}$ d'origine organique à l'aide des facteurs d'émissions d'hydrocarbure en équivalent méthane de l'OACI. Le taux d'émission des $PM_{2,5}$ d'origine organique est donné par les formules suivantes :

¹⁹ Cf. Wayson, Fleming, Iovinelli [7, p. 94].

Si le moteur est en régime de roulage (régime voisin de 7 % de la poussée nominale) :

$$\text{taux d'émission PM organiques} = 6,17 \times \text{facteur d'émission OACI}_{\text{HC}} \times \text{début de carburateur}$$

Si le moteur est en régime d'approche (30 % de la poussée nominale) :

$$\text{taux d'émission PM organiques} = 56,25 \times \text{facteur d'émission OACI}_{\text{HC}} \times \text{début de carburateur}$$

Si le moteur est en régime de montée (CLIMB) :

$$\text{taux d'émission PM organiques} = 76 \times \text{facteur d'émission OACI}_{\text{HC}} \times \text{début de carburateur}$$

Si le moteur est en régime de décollage (TO/GA) :

$$\text{taux d'émission PM organiques} = 115 \times \text{facteur d'émission OACI}_{\text{HC}} \times \text{début de carburateur}$$

Il faut noter que la fraction organique des particules fines sera donc comptée deux fois dans les indicateurs proposés, d'une part en tant qu'hydrocarbures imbrûlés et d'autre part en tant que particules fines.

PM_{2,5}

Le taux d'émission de PM_{2,5} est la somme des taux d'émission des suies, des particules fines d'origine organique et des particules fines d'origine soufrée.

2.2.5 Émissions de CO₂

D'après la définition des hydrocarbures imbrûlés retenue au 1.3.2 (p. 22), c'est-à-dire la même que celle utilisée par l'étude américaine évoquée au paragraphe précédent et non celle de l'OACI, les seules émissions des aéronefs qui contiennent du carbone et qui ne sont pas comptées dans les hydrocarbures imbrûlés sont le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone et les suies. Les quantités de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures imbrûlés étant connues, pour connaître la quantité de CO₂ rejetée, il reste donc à déterminer la quantité totale de carbone qui a été introduite par le carburant et la quantité de carbone qui a été rejetée sous forme de suies. Ainsi, la quantité de carbone rejetée sous forme de dioxyde de carbone sera donnée par la différence entre la quantité de carbone apportée par le carburant et la somme des quantités de carbone rejetées sous forme de suies, d'hydrocarbures imbrûlés et de monoxyde de carbone.

Quantité de carbone contenue dans le carburant

Notre objectif étant de quantifier le carbone contenu dans les chaînes hydrocarbonées qui constituent le kérosène, nous allons modéliser le carburant Jet A1 par la formule moyenne C₁₁H₂₁ comme le préconise l'article de Tim Edwards sur la composition des kérosènes.²⁰ Cette formule moyenne conduit à un ratio d'hydrogène par atome de carbone (H/C) de 1,91 qui correspond à l'ordre de grandeur des ratios H/C notés dans les données de certification OACI.²¹ D'après cette formule moyenne du carburant, 86,275 % de la masse du carburant est du carbone.

²⁰ Cf. Edwards [12, p. 3].

²¹ Cf. OACI [13, onglet « ICAO databank » colonne BZ].

Quantité de carbone contenue dans le monoxyde de carbone

D'après les numéros atomiques du carbone et de l'oxygène, 42,857 % de la masse du monoxyde de carbone est du carbone.

Quantité de carbone contenue dans les hydrocarbures imbrûlés

Les hydrocarbures imbrûlés regroupent une vaste variété de chaînes hydrocarbonées, certaines comportant également des atomes d'oxygène.

D'après une étude américaine sur la composition des espèces organiques rejetées par les moteurs à turbines des avions,²² les composés organiques contiennent en moyenne 5,45086 atomes de carbone par molécule, lesquelles ont une masse moléculaire moyenne de 82,74558. Les hydrocarbures imbrûlés sont donc des molécules dont la masse est composée, en moyenne, à 79,050 % de carbone.

Quantité de carbone contenue dans les suies

Les suies sont très majoritairement composées de carbone, mais peuvent également contenir quelques groupes méthyle (CH) et au plus 5 % d'atomes d'oxygène (groupes COH ou CO).²³ Dans la mesure où le numéro atomique de l'hydrogène est 1, nous allons négliger les quelques atomes d'hydrogène présents dans les groupes méthyle, et considérer que les suies sont constituées de 96 % d'atomes de carbone et 4 % d'atomes d'oxygène.

La fraction massique de carbone dans les suies sera donc estimée à 94,737 %.

Calcul du taux d'émission de CO₂

Les numéros atomiques du carbone et de l'oxygène étant respectivement 12 et 16, la masse moléculaire du CO₂ est 44. D'après les fractions de carbone précédemment déterminées, nous pouvons donc approximer le taux d'émission de carbone par la formule suivante :

$$TE_{CO_2} = \frac{0,86275 \times DC - 0,42857 \times TE_{CO} - 0,7905 \times TE_{HC} - 0,94737 \times TE_{suies}}{12} \times 44$$

$$TE_{CO_2} = 3,163 \times DC - 1,571 \times TE_{CO} - 2,899 \times TE_{HC} - 3,474 \times TE_{suies}$$

où TE signifie taux d'émission et DC, débit de carburant.

2.3. Limites de la modélisation

Les principales limites de la modélisation qui a été présentée dans les paragraphes précédents proviennent de la faible quantité de données disponibles, autant pour la modélisation des émissions des moteurs que pour la modélisation des régimes utilisés pendant un cycle LTO réel.

2.3.1. Les aspects environnementaux : des aspects encore peu précisément évalués

Encore peu de bases de données environnementales créées

En dehors de la base de données OACI des données de certification pour les turboréacteurs, de la base de données confidentielle de la FOI portant sur les turbopropulseurs, et de quelques bases de données similaires créées par l'administration américaine (EPA), il n'existe pas encore d'autres sources de données fiables et exhaustives sur les émissions des moteurs d'aéronefs commerciaux.

En outre, les bases de données disponibles ne portent actuellement que sur les polluants réglementés.

²² Cf. Knighton, Herndon, Miake-Lye [14, p. 21-22] et Iovinelli, Gupta, Ma et al. [6, p. 6].

²³ Cf Popovitcheva, Persiantseva, Trukhin et al. [15, p. 4423].

Ceci impose donc de modéliser les émissions des polluants non réglementés par des méthodes analytiques. La modélisation des $PM_{2,5}$ ne peut actuellement se faire que par une méthode comme la méthode FOA3.0, qui repose sur des hypothèses formulées à partir de corrélations vérifiées uniquement sur quelques moteurs, mais généralisées à tous. Dans l'attente d'une campagne exhaustive de mesure des particules fines émises par tous les modèles de moteurs d'aéronefs, la méthode FOA3.0 reste la méthode de référence approuvée par l'OACI.²⁴

Niveau de détail et de fiabilité des données disponibles

Le fait que les données de certification ne soient pas toutes déterminées dans les mêmes conditions introduit une incertitude quant à la fiabilité de ces données. La tâche de produire les données de certification d'un moteur est généralement réalisée par une division de la compagnie qui a manufacturé le moteur. Chaque motoriste dispose de ses bancs d'essai et de ses instruments de mesure. Il n'y a donc pas d'uniformité dans les données produites et il n'est pas rare de constater des différences de précision dans les données fournies, selon le banc d'essai où les tests ont eu lieu.

Il existe également de grandes différences suivant l'année à laquelle les données de certification ont été produites. Ces différences proviennent des améliorations apportées aux appareils de mesure au fil du temps. Ainsi, les données concernant les moteurs les plus anciens sont généralement moins précises et fiables que celles portant sur les moteurs plus récents, car les motoristes ne réévaluent pas toujours les émissions de leurs moteurs les plus anciens.²⁵

Enfin, les données de certification OACI peuvent être incomplètes voire absentes pour certains modèles de moteurs qui ont bien été certifiés, mais dont les valeurs des données de certification n'ont pas toutes été entrées dans la base de données.²⁵ Pour pallier ce problème, les valeurs manquantes ont été complétées par les valeurs correspondant à un moteur jugé équivalent, sur des critères de génération (âge du moteur), de type de moteur, de poussée nominale et, si toutes les données n'étaient pas manquantes, de concordance avec les facteurs d'émissions connus.

2.3.2. Les imprécisions principales de la modélisation

Hétérogénéités dans le niveau de détail apporté à la modélisation

Aussi bien dans la modélisation du cycle LTO détaillé que dans la modélisation des émissions, tous les aspects du modèle ne sont pas aussi détaillés.

Les phases de roulage sont beaucoup plus détaillées que les autres phases, et en particulier de la phase d'approche et d'atterrissage. Ceci se justifie en partie dans la mesure où les scénarios étudiés en capacité influent surtout sur les phases de roulage. Il est donc surtout intéressant de déterminer les différences d'émissions et de consommations entre le scénario de référence et le scénario modifié, pendant les phases de roulage.

Néanmoins, certaines études peuvent comparer deux situations où le nombre de mouvements peut varier, ou dans lesquelles les durées des approches finales, des atterrissages et des décollages, peuvent être impactées par les changements étudiés. Pour ces cas, l'amélioration de la modélisation des autres phases que le roulage pourrait être un développement ultérieur du modèle pertinent.

Un point particulier à développer serait la modélisation des divers régimes utilisés avec les inverseurs de poussée pour le freinage à l'atterrissage. En effet, à l'heure actuelle, si les avions déploient généralement systématiquement leurs inverseurs de poussée pour ralentir, ils n'utilisent pas tous la même poussée pour freiner. La décélération lors de l'atterrissage peut donc être aussi bien très économique (freinage avec freins et inversion de poussée au ralenti), que très consommatrice (freinage avec inversion de poussée à la poussée de décollage et freins).

²⁴ Cf. Wayson, Fleming, Iovinelli [7, p. 93].

²⁵ Cf. OACI [5, p. 2].

Il faut cependant remarquer que la précision de la modélisation est limitée de façon incontournable par le fait que :

- les consommations des aéronefs varient également selon les pilotes, lesquels n'accélèrent et ne freinent pas toujours de la même façon.
- les consommations et émissions des avions dépendent de données physiques telles que la température, la pression atmosphérique et l'humidité. Selon les conditions météorologiques et l'altitude des aéroports étudiées, les facteurs d'émissions et les consommations des moteurs peuvent ne pas correspondre à ceux inscrits dans les bases de données, lesquelles recensent des données en atmosphère standard ISA au niveau de la mer.
- selon la provenance des avions, ceux-ci brûlent des kérosènes différents, fournis par des compagnies pétrolières différentes. Les additifs et les rapports du nombre d'atomes d'hydrogène par atome de carbone varient donc beaucoup selon les vols. Entre autres pour ces raisons, la modélisation des émissions de métaux n'a pas été jugée pertinente, car selon les additifs utilisés par les compagnies pétrolières (la composition des additifs est d'ailleurs soumise au secret industriel), ce ne sont pas les mêmes métaux qui sont rejetés par les avions.

Du fait de ces incertitudes, une erreur sensible sera nécessairement commise lors de l'estimation des données environnementale, quelle que soit la précision du modèle de consommation et d'émissions mis en œuvre. En conséquence, il existe une limite dans la précision des estimations qu'il est possible de gagner par raffinement du modèle.

Incertitudes liées aux divers usages des compagnies aériennes

L'inconvénient majeur de la modélisation actuelle est que ses hypothèses, et notamment les coefficients de redressement appliqués pour estimer la consommation de roulage « réelle » et non standard, dépendent des données obtenues sur un échantillon d'avions seulement. En effet les données utilisées ne proviennent pour le moment que d'Air France, et ne sont disponibles que pour une partie de la flotte de cette compagnie. Le même problème est rencontré pour l'estimation du pourcentage des vols qui pratiquent une procédure de roulage avec certains moteurs éteints.

En l'attente d'autres données fournies par d'autres compagnies, les estimations obtenues avec le modèle proposé sont donc à prendre avec des réserves et il sera très probablement nécessaire de réviser le modèle de consommation des avions, au fur et à mesure que les données opérationnelles seront obtenues, auprès des compagnies.

Actuellement, les données qui ont été requises auprès des responsables d'exploitation d'Air France sont les suivantes :

- valeurs des débits carburant pendant l'impulsion de démarrage, lors d'un roulage au départ, pour tous les modèles d'avions de leur flotte,
- valeurs des débits carburant pendant le maintien en roulage, lors d'un roulage au départ, pour tous les modèles d'avions de leur flotte,
- valeurs des débits carburant au régime IDLE, pour tous les modèles d'avions de leur flotte,
- consommations et temps totaux pour un roulage à l'arrivée, pour tous les modèles d'avions de leur flotte,

statistiques sur la pratique du roulage en configuration certains moteurs éteints.

Les trois derniers types de données de la liste ci-dessus ont déjà été communiqués par Air France pour une partie des modèles d'avions de leur flotte et ces mêmes données devraient être disponibles sous peu pour le reste de la flotte. Airbus a par ailleurs également fourni des ordres de grandeur de consommation pour le régime IDLE de ses avions.

Concernant les deux premiers types de données de la liste ci-dessus, les seules données disponibles actuellement sont des données très incomplètes provenant des forums d'Airliners.net et PPRuNe.org sur les usages des pilotes en matière de roulage. Il est difficile de juger de la fiabilité des renseignements obtenus par ce moyen, mais en ce qui concerne les régimes de ralenti et les consommations totales lors des roulages, les données recueillies sur les forums et celles fournies par Airbus et Air France étaient tout à fait similaires. Il s'agit en outre des seuls témoignages directs de pilotes de ligne qu'il est actuellement possible d'exploiter concernant l'opération des avions de ligne au sol et dans la mesure où les pilotes sont directement responsables de la façon dont les moteurs sont utilisés au cours du cycle LTO, les renseignements qu'ils fournissent sont appréciables.

3. Automatisation des calculs d'émissions et de consommations

Compte tenu de la relative complexité du modèle proposé dans la partie précédente, l'automatisation de sa mise en pratique via un outil informatique s'est avérée nécessaire. Les solutions techniques retenues pour informatiser le modèle vont être présentées dans cette partie.

3.1 Création d'un outil informatique de mise en œuvre du modèle

Le modèle proposé dans la partie II possède deux aspects distincts. D'une part la modélisation des émissions à partir des durées de fonctionnement des moteurs aux divers régimes, et d'autre part, la modélisation des durées de fonctionnement des moteurs à partir des données de simulation de capacité. Les données de simulation et les données environnementales se présentent sous des formes très différentes et nécessitent des traitements très différents qui vont être présentés dans ce paragraphe.

3.1.1 Données d'entrée

Données environnementales

La modélisation des consommations des avions ainsi que des émissions qui y sont liées, a été transcrite en une base de données qui, à l'aide des formules présentées au paragraphe 2.2 (p. 33), recense pour chaque couple configuration/régime et pour chaque modèle d'aéronef, les taux d'émissions des indicateurs retenus, ainsi que le débit de carburant consommé par l'avion.

Les modèles d'avions peuvent être équipés de plusieurs motorisations possibles. Le lien entre les modèles d'avions et les modèles de moteurs a été réalisé d'après la base de données d'Airliners.net détaillant les caractéristiques techniques (dont les moteurs utilisés) des différents modèles d'avions. Dans la base de données spécifiquement conçue pour la mise en œuvre du modèle proposé dans ce rapport, les émissions et consommations sont données par modèle d'avion (et non par modèle de moteur comme c'est le cas dans les bases de données OACI et FOI).

Pour un modèle d'avion donné, plusieurs consommations et plusieurs taux d'émissions des polluants choisis comme indicateurs, ont donc été calculés (un jeu de données par motorisation). En plus des émissions et consommations pour chaque motorisation disponible d'un modèle d'avion, un jeu d'émissions et une consommation a aussi été déterminé pour la motorisation « moyenne » d'un aéronef. Il s'agit en fait de la moyenne des consommations et émissions correspondant à chaque motorisation disponible pour le modèle d'aéronef donné. Ce jeu de valeur peut servir lorsque les données trafic spécifient les modèles d'aéronefs sans donner leur motorisation, ce qui est le cas dans les prévisions de trafic, notamment. Il faut néanmoins remarquer que la distribution des choix de motorisation par les compagnies aériennes peut ne pas être uniforme, et qu'un modèle spécifique de moteur peut être plus représentatif que la motorisation « moyenne » proposée. Dans ce cas, il serait plutôt recommandé d'utiliser le moteur le plus répandu comme moteur de référence et utiliser les valeurs de consommation et d'émissions associées à celui-ci par défaut pour tous les avions de ce modèle.

Données de trafic obtenues via SIMMOD

Les données de trafic proviennent en grande partie des simulations de SIMMOD, un logiciel de simulation en temps accéléré par événements discrets. SIMMOD permet de modéliser l'infrastructure d'un aéroport en tant que graphe composé de nœuds et de liens qui correspondent à la disposition réelle physique de l'infrastructure modélisée. Un plan ou une photo satellite sert généralement de calque pour dessiner le graphe de l'infrastructure.

Le moteur de SIMMOD fait circuler les avions définis par une feuille de vols sur l'infrastructure modélisée en déplaçant les avions de nœud en nœud (d'où les événements discrets) sur le graphe, suivant les règles de circulation paramétrées. Les déplacements dans l'espace se font donc par sauts discrets, mais ces sauts ne sont pas instantanés dans le temps, et la durée nécessaire à un avion pour sauter d'un nœud à un autre nœud le long d'un lien est le rapport de la longueur du lien (distance physique) à la vitesse que l'avion peut pratiquer sur ce lien.

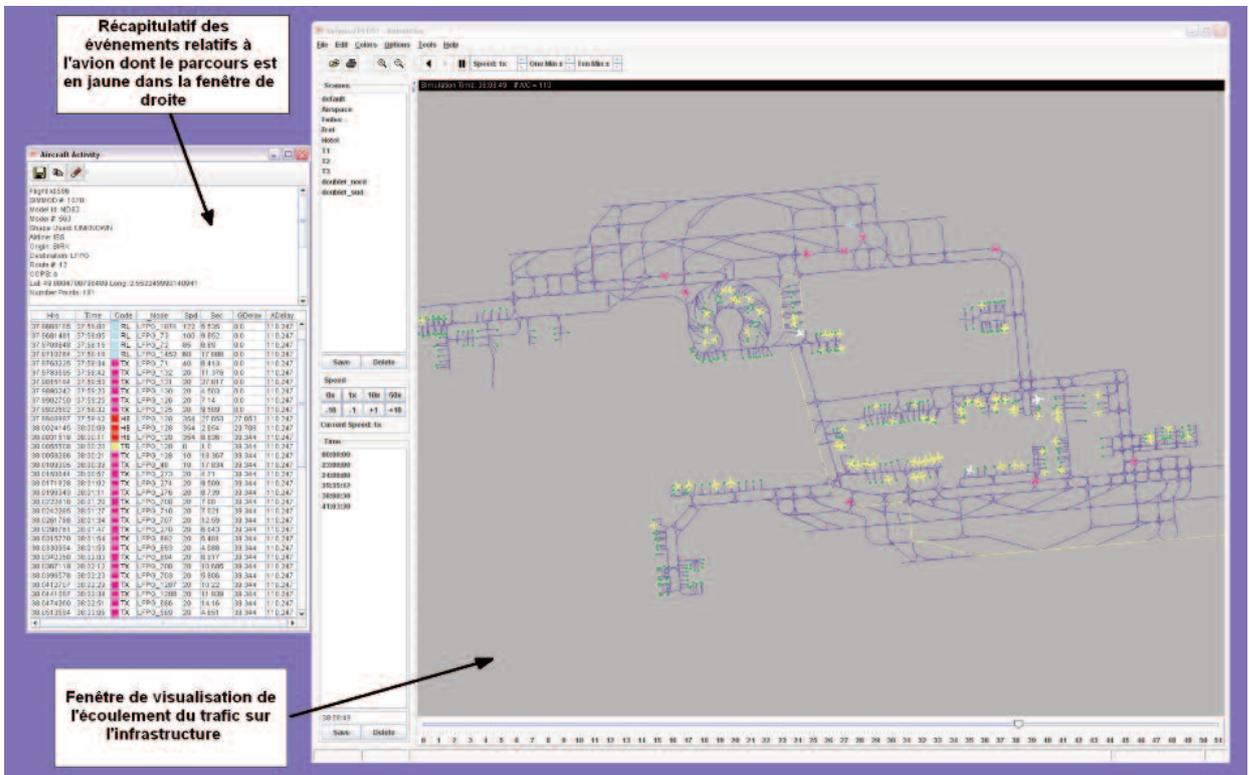


Illustration 10 : capture d'écran de SIMMOD

Les données de trafic nécessaire pour le calcul des consommations et émissions sont calculées à partir du rapport exhaustif de tous les événements qui ont été simulés, c'est-à-dire la liste de tous les déplacements de nœud en nœud simulés ainsi que la liste de tous les arrêts effectués à un nœud dans l'attente que le nœud suivant soit libre. Tous les événements sont référencés par numéro de vol et sont localisés dans l'espace (sur l'infrastructure) et dans le temps.

Il est donc possible de calculer, d'après la suite des événements relatifs à un vol donné, les durées que l'aéronef correspondant à ce vol a passées dans les différents couples configuration/régime envisagés au 2.1.3 (p. 29). Comme SIMMOD permet de simuler divers modèles d'aéronefs, les données SIMMOD fournissent donc également les modèles d'aéronefs associés aux numéros de vol.

Données de trafic complémentaires à fournir

Ces données regroupent les usages des compagnies qui n'ont pas d'impact sur la capacité, mais qui impactent les consommations de carburant. Elles ne sont donc pas modélisées par SIMMOD, qui ne s'intéresse qu'à la capacité, mais sont nécessaires pour calculer correctement les consommations et émissions des aéronefs.

Pour chaque vol, il faut donc fournir les données suivantes :

- durée d'utilisation de l'APU au poste de stationnement,
- utilisation de l'APU pendant le roulage,
- roulage en configuration tout moteur ou en configuration économique (certains moteurs éteints).

Enfin, les paramètres d'accélération et de décélération des divers modèles d'avions appartiennent également aux données complémentaires à fournir car SIMMOD ne modélise pas les accélérations et décélération pendant le roulage, alors qu'elles entrent en jeu dans le modèle proposé au 2.1.1 (p. 25).

3.1.2 Type d'outil créé pour le traitement de ces données

Caractéristiques requises et solution technique retenue

Compte tenu du fait que le modèle sera encore amené à évoluer au fur et à mesure que des études environnementales seront réalisées sur les moteurs d'aviation, l'outil informatique de mise en œuvre de la modélisation proposé doit être suffisamment flexible pour permettre une adaptation rapide dans le cas où des hypothèses de modélisation viendraient à être modifiées. En outre, SIMMOD est également un outil en constante évolution et il doit donc être possible de modifier l'outil informatique pour prendre en compte d'éventuelles modifications de la structure des données de sortie de SIMMOD.

L'outil doit donc être accessible et permettre une modification rapide des paramètres qui seront les plus probablement amenés à changer.

La solution technique retenue a donc été de créer un outil en deux parties.

La première permet de mettre en œuvre les hypothèses et formules proposées au 2.2 (p. 33) pour modéliser les émissions et consommation des avions. Cette première partie de l'outil se présente sous la forme d'un classeur de feuilles de calcul (une version Excel et une version OpenOffice ont été créées) comportant les données sources (OACI et FOI) pour les moteurs des avions utilisés, et qui utilise les formules explicitées dans le paragraphe 2.2 (p. 33), pour calculer automatiquement pour chaque modèle d'aéronef, les indicateurs retenus au 1.3.2 (p. 22).

La seconde partie de l'outil est un script visual basic qui traite les données de sortie de SIMMOD, les données complémentaires fournies par l'utilisateur (sous forme de fichiers texte CSV) et une version exportée sous forme de fichiers CSV de la base de données calculée par la première partie de l'outil. À partir de ces données le script calcule pour chaque vol la quantité de carburant consommée, ainsi que les émissions des polluants retenus comme indicateurs. Le résultat est écrit également sous la forme d'un fichier CSV, permettant ainsi d'exploiter le rapport des émissions et consommations de chaque vol, à l'aide d'un tableur ou d'un logiciel de traitement de base de données quelconque.

Avantages de la solution technique retenue

La solution technique proposée offre l'avantage de délimiter clairement la modélisation environnementale de la modélisation du trafic. Si les indicateurs retenus ne changent pas, il est donc possible de modifier la façon dont sont calculées les émissions sans avoir à travailler sur la partie de l'outil qui calcule les durées des différentes phases du cycle LTO détaillé.

Le choix d'un script visual basic pour l'interprétation et la manipulation des données de sortie de SIMMOD répond aux exigences de flexibilité et aux contraintes liées aux calculs à réaliser. Le langage de script visual basic est un langage de programmation simple et accessible, dont les scripts sont aisément modifiables, tout en offrant des capacités de calcul suffisantes pour les opérations à effectuer. Il s'agit également d'un langage interprété qui est traduit en code machine dans son intégralité au début de l'exécution, ce qui lui confère une vitesse d'exécution appréciable, certes inférieure à celle d'un langage compilé, mais nettement supérieure à celle d'un langage interprété ligne à ligne. Le traitement des quelques centaines de milliers d'événements que peut contenir un rapport de simulation de SIMMOD est de l'ordre de la minute et il est donc possible de considérer que le choix de ce langage est un très bon compromis entre facilité de modification et vitesse d'exécution.

Inconvénients de la solution technique retenue

L'inconvénient majeur de cette solution technique provient paradoxalement de la facilité de modification qu'elle propose. En effet tant au niveau de la base de données environnementale que de l'outil de calcul des durées de fonctionnement des moteurs, une modification apportée peut s'accompagner d'une modification accidentelle non désirée, qu'il sera difficile de déceler à la vue des résultats.

Une erreur de manipulation de la base de données lors de l'ajout ou la modification de données d'émissions ou de consommations (formule mal référencée, faute de frappe, mauvaise case modifiée, etc) n'aura en général que peu voire pas d'impact visible sur les indicateurs calculés pour un vol. L'impact risque cependant d'être sensible sur la somme des émissions ou la somme des consommations pour tous les vols, mais ne sera décelable que si les valeurs calculées avant la modification de la base de données sont connues.

Des problèmes similaires concernent la seconde partie de l'outil. Compte tenu de la complexité de la transformation du rapport de simulation SIMMOD en durées de fonctionnement des moteurs, l'algorithme n'a pas été validé par démonstration de sa justesse, mais par comparaison des résultats sur un échantillon de vol. Les résultats obtenus par l'outil informatique ont donc été comparés aux résultats obtenus par une application manuelle du modèle à certains vols, jugés représentatifs, d'une simulation, jugée elle aussi, représentative.

L'application manuelle du modèle à des vols simulés par SIMMOD est longue et fastidieuse (d'où la nécessité de l'outil informatique) ce qui rend la validation par comparaison des résultats sur un échantillon, très consommatrice en temps. Bien qu'en théorie il soit préférable de revalider l'algorithme de cette manière après chaque modification, en pratique, faute de temps, une modification minimale du code ne sera vérifiée que par démonstration de la justesse de la partie d'algorithme modifiée, négligeant ainsi le risque que la modification partielle ait impacté la justesse globale de l'algorithme.

Aussi bien dans la base de données que dans le script, l'introduction d'une erreur involontaire, lors d'une modification, peut entraîner des estimations erronées sans toutefois être nécessairement décelable, faute d'ordre de grandeur connu pour comparaison. La facilité de modification offerte ne doit donc pas occulter le fait que toute modification a des conséquences importantes et doit être effectuée avec prudence.

3.2 Calcul des durées des divers régimes moteur

Le lien entre les données de simulation de SIMMOD et les durées de fonctionnement des moteurs aux divers régimes étudiés nécessite un certain travail d'analyse des données car les données fournies par SIMMOD ne correspondent pas exactement aux données souhaitées pour calculer, de façon réaliste, les consommations et émissions des avions. Ce paragraphe va évoquer brièvement les principales difficultés rencontrées, ainsi que les solutions apportées pour le passage des données de simulations aux données exploitables pour le calcul environnemental.

3.2.1 Principe général de calcul

Les événements SIMMOD

Les événements qui nous intéressent dans le rapport de simulation de SIMMOD se répartissent en deux catégories :

Événements de déplacement qui correspondent à :

Le vol X entre en transit de type A du nœud i au nœud j en Y secondes à l'heure Z.

Il en existe quatre grands types : roulage, décollage, atterrissage et vol

Événements d'arrêt correspondant à :

Le vol X est arrêté au nœud i pendant Y secondes à l'heure Z pour la raison A.

La raison de l'arrêt peut être de type conflit de priorité ou non respect des distances de sécurité si le transit a lieu.

Détermination des régimes moteurs d'après la suite des événements

Les cas simples sont :

- Événements de déplacements successifs :
 - le régime correspondant au type de mouvement (roulage, atterrissage, décollage ou vol) est appliqué pendant la durée du déplacement pour chaque événement de déplacement.
- Événements d'arrêts successifs :
 - le régime de ralenti est appliqué pendant la durée de l'arrêt pour tous les événements d'arrêts.

Les cas plus complexes sont :

- Événement de roulage consécutif à un arrêt :
 - le régime de ralenti est appliqué pendant toute la durée de l'arrêt, puis la poussée de démarrage est appliquée pendant 5 secondes, puis le régime de roulage est maintenu pendant la durée du déplacement diminuée de 5 secondes.
- Événement d'arrêt consécutif à un événement de roulage :
 - le régime de roulage est appliqué pendant toute la durée du déplacement à laquelle la durée de la décélération est soustraite, puis le régime de ralenti est appliqué pendant toute la durée de l'arrêt, à laquelle la durée de la décélération est ajoutée (la décélération en vue d'un arrêt se fait au ralenti d'après nos hypothèses).

Remarque concernant les accélérations et décélérations : hormis pendant les phases de décollage et d'atterrissage, SIMMOD ne modélise pas les accélérations et les décélérations. Celles-ci ne sont donc calculées que pour le bilan environnemental. Dans la méthode de calcul général qui vient d'être décrite, il n'est pas tenu compte du fait qu'un avion qui accélère et décélère graduellement met plus de temps pour parcourir une distance donnée qu'un avion qui passe instantanément de l'arrêt à sa vitesse de roulage. Comme les temps SIMMOD sont ceux qui sont utilisés pour le calcul des indicateurs de capacité, l'outil informatique destiné au calcul environnemental calcule le retard généré par les accélérations et décélérations par rapport au temps SIMMOD, mais propose de ne pas les prendre en compte comme temps de régime de roulage pour conserver les mêmes temps entre le calcul de capacité et le bilan environnemental associé.

Détermination de la configuration moteur (économique ou tous moteurs)

Les vols qui effectuent leur roulage en configuration économique doivent être désignés par l'utilisateur (cf. 3.1.1 p. 41). La question de la détermination de la configuration moteur ne se pose que pour ces vols. Pour les autres vols, tous les moteurs sont allumés pendant la totalité du roulage. Deux procédures sont appliquées selon que le vol est une arrivée ou un départ, afin de déterminer quels événements sont effectués en configuration économique, et quels événements sont effectués en configuration tous moteurs, afin de respecter les durées minimales de fonctionnement des moteurs formulées comme hypothèses au 2.1.1 (p. 25) :

Pour les vols qui sont des départs : tous les événements ayant lieu plus de 6 minutes avant le premier déplacement de type décollage sont considérés comme effectués en configuration économique, le reste des événements est considéré comme effectués en configuration tous moteurs.

Pour les vols qui sont des arrivées, tous les événements qui ont lieu moins de 2 minutes après le premier déplacement de type roulage sont considérés comme effectués en configuration tous moteurs, le reste des événements est considéré comme effectué en configuration économique.

Remarque sur les seuils de décisions (6 et 2 minutes) : ils sont, dans la version actuelle de l'outil, imposés dans le code de l'algorithme. S'ils s'avèrent qu'ils ne conviennent pas pour tous les aéroports, il pourrait être judicieux d'en faire des paramètres complémentaires à demander à l'utilisateur.

3.2.2 Transformation des profils de vitesse « tout ou rien » en profils de vitesses variables

L'un des inconvénients majeur d'une simulation SIMMOD dans le calcul des consommations et émissions des avions est que SIMMOD surestime largement le nombre d'arrêts qu'auraient réellement subi les avions au cours de leur roulage. En effet, SIMMOD ne prévoit pas que pour éviter de subir un arrêt, un avion puisse rouler à une vitesse plus lente que sa vitesse nominale. Les contraintes que les avions génèrent les uns sur les autres engendrent donc des arrêts dans SIMMOD, là où dans la réalité, les pilotes auraient modéré la vitesse de leurs avions pour ne pas avoir à s'arrêter puis redémarrer.

Certains arrêts de SIMMOD doivent donc être interprétés comme de simples ralentissements dans le calcul des données environnementales, afin de produire une estimation correcte des consommations.

La difficulté de cette tâche n'est pas vraiment de transformer un arrêt en roulage à une vitesse plus lente (cf. Illustration 11), mais de déterminer quels arrêts sont légitimes et quels arrêts n'auraient pas eu lieu dans la réalité. Les arrêts qui correspondent à des ralentissements correspondent à deux cas de figure :

- les arrêts d'une durée inférieure à 5 secondes simulés par SIMMOD. Ils auraient pu être évités par le pilote par anticipation et ralentissement préventif. Repérer les arrêts d'une durée inférieure à 5 secondes à partir du rapport de simulation est aisé, puisque la durée des arrêts figure dans les événements correspondants.
- les arrêts dus au rattrapage d'un avion lent par un avion plus rapide. Ces arrêts n'ont pas lieu non plus dans la réalité car le pilote de l'avion le plus rapide modère sa vitesse et adopte celle de l'avion qu'il suit, si ce dernier est plus lent. L'algorithme pour déterminer, à partir du rapport de simulation, si un avion en suit un autre et est ralenti par celui-ci, est relativement complexe mais sa description est donnée à titre indicatif à l'annexe G.

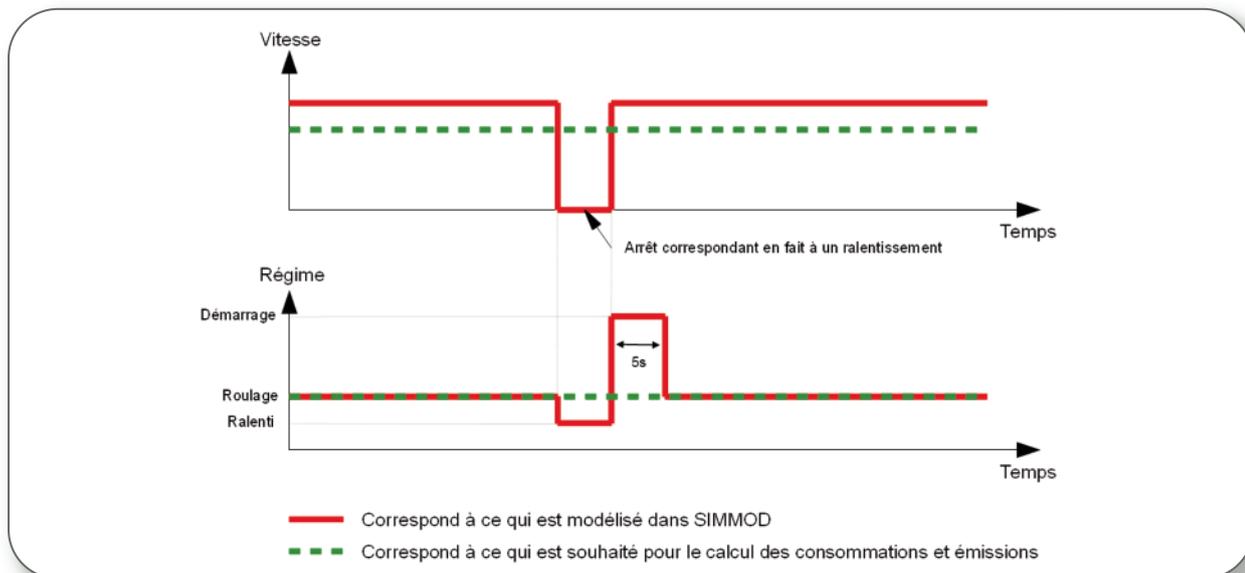


Illustration 11: Importance de la détermination des arrêts qui ne correspondent qu'à des ralentissements

3.2.3 Transformation des profils de vitesses rectangulaires en profils de vitesse trapézoïdaux

L'intérêt de prendre en compte les accélérations et les décélérations provient d'une part du fait que la consommation pendant la décélération au ralenti en vue d'un arrêt peut être moindre que la consommation pendant le reste du roulage, et d'autre part, du fait que les accélérations et décélérations non instantanées diminuent la vitesse moyenne des avions et donc augmentent le temps pendant lequel les avions consomment du carburant.

Économie de carburant liée au fait que les avions décèlent au ralenti avant un arrêt

Comme cela a déjà été évoqué dans les hypothèses concernant la modélisation du roulage des avions (cf. 2.1.3 p. 29), les avions fortement chargés vont généralement utiliser plus que la seule poussée de ralenti pour se déplacer au sol. Lorsque ces avions sont arrêtés ou s'apprêtent à s'arrêter, ils n'ont plus besoin d'une poussée supérieure au ralenti et le fait de ramener la manette des gaz au ralenti, dès la phase de décélération, leur fait économiser du carburant.

L'illustration 12 montre comment les régimes dépendent du profil de vitesse utilisé. Dans la mesure où l'accélération après un arrêt s'effectue par une impulsion de poussée dont la durée ne dépend pas de la vitesse à atteindre (l'impulsion sert juste à vaincre l'inertie de l'avion), c'est uniquement à cause de la décélération que la durée des régimes moteurs utilisés varie entre un profil de vitesse rectangulaire et un profil de vitesse trapézoïdal. La modélisation des accélérations peut cependant être intéressante pour les raisons qui seront développées ci-dessous.

Surconsommation de carburant liée au fait que les accélérations et décélérations ne sont pas instantanées

L'intégration de la surconsommation liée à la baisse des vitesses moyennes à cause des accélérations et décélérations est discutable. En effet, la prise en compte du temps supplémentaire qu'il aurait fallu aux avions pour effectuer leur roulage s'ils ne passaient pas instantanément de l'arrêt à leur vitesse nominale et de leur vitesse nominale à l'arrêt, conduit à raisonner sur des temps de roulage différents que ceux de SIMMOD. Si les temps SIMMOD sont considérés comme pertinents pour les indicateurs de capacité, il paraît judicieux de se tenir à ces temps également pour le calcul de durées de fonctionnement des moteurs. Cela revient à supposer que les avions ont une vitesse nominale de roulage plus élevée que celle modélisée dans SIMMOD, et que la vitesse nominale de roulage dans SIMMOD correspond à la vitesse moyenne de roulage, compte tenu des accélérations.

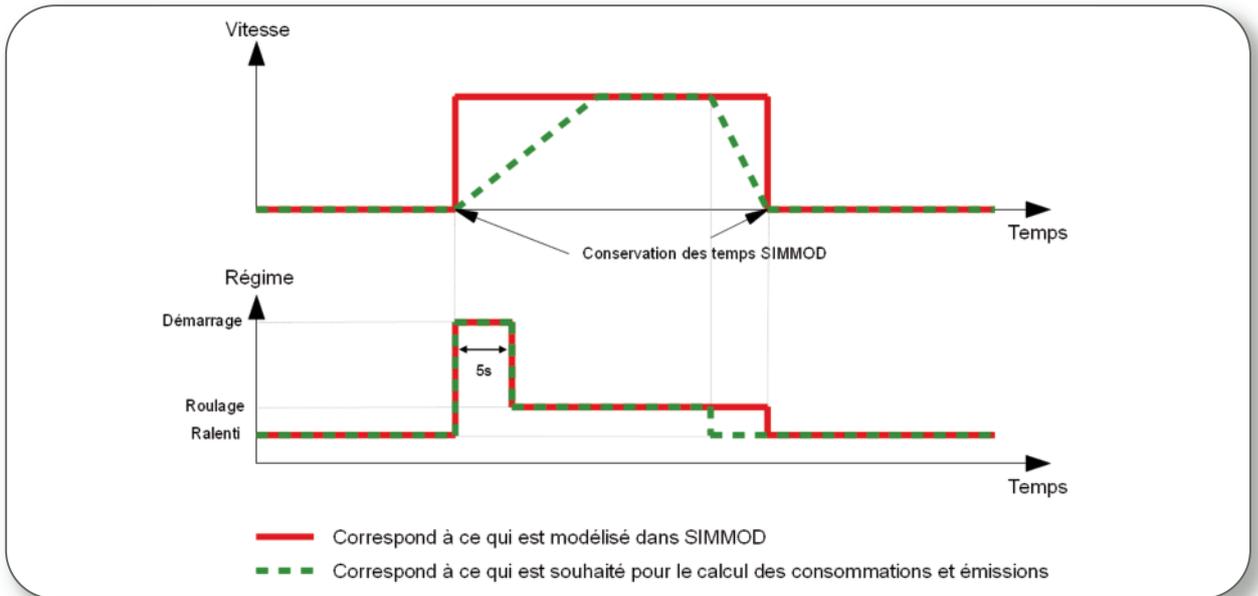


Illustration 12 : Modélisation des accélérations et décélérations conservant les temps SIMMOD

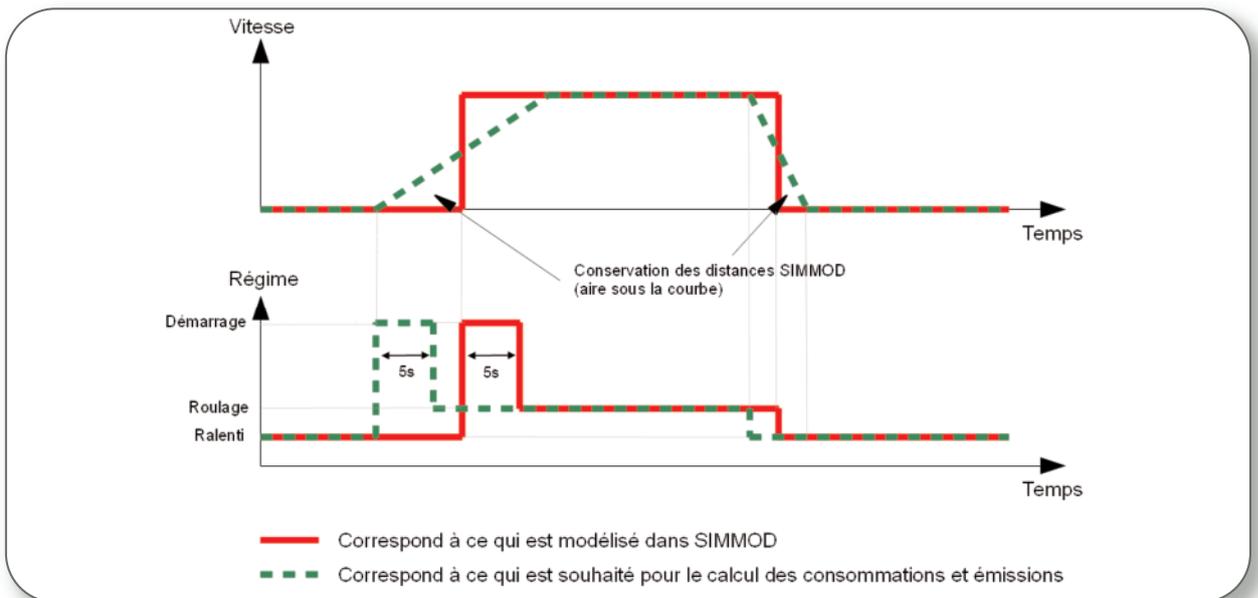


Illustration 13 : Modélisation des accélérations et décélérations conservant les distances SIMMOD

Néanmoins, dans certains cas, il peut être pertinent de faire ressortir les allongements des durées de roulage occasionnées par de multiples accélérations et décélérations. Dans la réalité, les avions sont effectivement pénalisés en temps et en consommation par de multiples arrêts, puisque, abstraction faite du temps de réaction du pilote pour remettre son avion en mouvement, le temps nécessaire pour réatteindre la vitesse de roulage allonge la durée du roulage et augmente donc la consommation des moteurs.

Selon les études il pourrait donc être préférable de s'affranchir de la concordance entre les temps de fonctionnement des moteurs et les temps SIMMOD, afin de pouvoir rendre compte de l'impact que génèrent des arrêts multiples, même s'ils ne rallongent pas les durées des roulages dans SIMMOD. Pour cette raison, le choix est donc proposé par l'outil d'intégrer ou non le retard par rapport aux temps SIMMOD que génèrent les accélérations et décélérations. Cela correspond donc au choix entre les deux schémas de modélisation présentés par l'illustration 12 et l'illustration 13, qui sont respectivement le modèle où le temps SIMMOD est conservé et le modèle où les distances SIMMOD sont conservées, les accélérations et les décélérations non instantanées allongeant les durées des roulages.

4. Application pratique sur un cas d'étude : étude ROUL

Afin de valider l'outil informatique créé et d'évaluer l'intérêt réel apporté par la prise en compte de données environnementales dans une étude de capacité, le modèle proposé dans ce rapport a été mis en œuvre sur un cas pratique. L'étude choisie pour cette mise en application, les résultats environnementaux obtenus ainsi que les conclusions concernant l'intérêt du modèle proposé vont être présentées dans cette partie.

4.1 Présentation des scénarios étudiés

Ce paragraphe va présenter l'objectif de l'étude ainsi que les hypothèses de capacité et les hypothèses d'exploitation ayant un impact sur le calcul des consommations et des émissions, qui ont été retenues.

4.1.1 Contexte et objectif de l'étude

L'étude ROUL a été réalisée en 2008-2009 par la division capacité et simulation du Service Technique de l'Aviation Civile (STAC), afin d'évaluer l'impact sur la capacité de la plate-forme de Paris CdG, qu'aurait l'équipement de la flotte des avions de la famille A320 avec des dispositifs permettant leur roulage moteurs éteints, mais à des vitesses inférieures à celle des autres avions. À titre indicatif, un plan de Paris CdG est fourni en annexe E.

Le scénario de référence représentait donc le trafic de la journée de référence de l'année de 2008, tous les avions roulant avec la même vitesse nominale, alors que le scénario modifié représentait ce même trafic avec pour seule différence, le fait que les avions de la famille A320, équipés du dispositif de roulage moteurs éteints, avaient des vitesses de roulage nominales inférieures à celle des autres avions.

L'intérêt de l'étude était principalement d'évaluer les retards éventuels subis par les avions non équipés de la technologie de roulage moteurs éteints, à cause de la vitesse plus lente des avions équipés. Une estimation des gains de consommation avait été donnée par comparaison du temps passé moteurs éteints par les avions équipés du dispositif, avec le temps supplémentaire passé en roulage par les autres avions.

Cette étude semblait donc particulièrement adaptée comme cas pratique pour l'application du modèle de consommations et d'émissions décrits dans la partie 2.

4.1.2 Hypothèses du domaine de la capacité

Plusieurs scénarios modifiés ont été envisagés suivant le pourcentage des avions de la flotte A320 équipés et les vitesses pratiquées. Le scénario modifié utilisé comme cas d'étude présente les caractéristiques suivantes :

- 100 % des avions de la famille A320 sont équipés d'un dispositif de roulage moteur éteint,
- leur vitesse est répartie suivant une loi normale centrée autour de 13,9 kts avec un écart type de 1,7, un minimum de 10,8 kts et un maximum de 16,9 kts,
- les autres avions roulent à 20 kts.

La feuille de vols comporte 1 704 mouvements (arrivées et départs confondus). 710 mouvements sont effectués par des avions de la famille des A320, 346 mouvements sont effectués par des gros-porteurs et les 648 mouvements restants sont effectués par des court-courriers et des moyen-courriers autres que les A320.

4.1.3 Hypothèses du domaine environnemental

Pour l'application du modèle, les hypothèses suivantes ont été formulées quant au roulage des avions :

- les avions équipés du dispositif de roulage moteurs éteints allument leurs moteurs 6 minutes avant le décollage et les éteignent 2 minutes après l'atterrissage (valeurs écrites directement dans le code de l'algorithme).
- tous les avions autres que les avions équipés du système de roulage moteurs éteints roulent toujours avec tous leurs moteurs allumés.

- le dispositif de roulage moteurs éteints est électrique (alimenté par des batteries ou par l'APU) et ne consomme donc pas de carburant ; par contre, l'APU doit être en fonction pendant toute la partie du roulage qui est effectuée moteurs éteints, ne serait-ce que pour alimenter les systèmes de l'avion (hydrauliques, électriques et pneumatiques).
- les avions équipés du dispositif de roulage moteurs éteints peuvent démarrer leurs réacteurs pendant que le dispositif continue à faire rouler l'avion. Le passage de la configuration tous moteurs éteints à la configuration tous moteurs en service n'impose donc pas d'arrêt.
- les avions roulant avec tous leurs moteurs en fonction n'utilisent pas l'APU pendant le roulage.
- tous les postes de stationnement utilisés disposent d'alimentation 400 Hz et l'usage de l'APU au poste se limite pour tous les avions à 10 minutes pour les départs et 1 minute pour les arrivées, comme cela est évoqué au 2.1.2 (p. 27).
- les gros-porteurs accélèrent à $0,412 \text{ m/s}^2$ (données Airbus) et freinent à 1 m/s^2 .
- les moyens et petits porteurs accélèrent à $0,514 \text{ m/s}^2$ (données Airbus) et freinent à 1 m/s^2 .

Les feuilles de vols sont exactement les mêmes entre le scénario de référence et le scénario modifié et seules les performances de roulage des modèles d'aéronefs sont différentes entre les deux scénarios. Par conséquent, en dehors des phases de roulage, les aéronefs passent exactement le même temps aux divers régimes moteurs envisagés. Il ne paraît donc pas pertinent d'intégrer les autres phases (décollage, montée, approche finale et atterrissage) dans le bilan environnemental, puisqu'elles ne contribuent pas à différencier les deux scénarios. Les résultats présentés dans le paragraphe suivant ne porteront donc que sur les consommations et émissions dues au roulage des avions.

D'autre part, il ne paraît pas pertinent de prendre en compte les retards par rapport au temps SIMMOD générés par les accélérations non instantanées du modèle environnemental, car le scénario modifié n'entraîne qu'une baisse des vitesses et non une augmentation du nombre d'arrêts (nombre d'arrêts s'entendent comme excluant les arrêts correspondant à de simples ralentissements dans SIMMOD).

4.2 Résultats obtenus

Les résultats obtenus d'après les hypothèses présentées ci-dessus vont être présentés, d'abord de façon globale, puis certains détails seront apportés, afin de fournir des éléments d'interprétation de ces résultats globaux.

4.2.1 Résultats globaux

Résultats des émissions et consommations des moteurs et APU des avions pendant leur roulage et leur temps passé au poste de stationnement

Les résultats obtenus pour l'ensemble des vols de la journée de référence sont les suivants :

	Consommation	CO	CO ₂	HC	COV	NO _x	SO ₂	PM _{2,5}
	(t)	(t)	(t)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
Référence	235,703	5,785	726,502	662,774	657,081	1 158,808	209,691	78,473
Scénario	212,896	4,845	656,213	554,087	549,311	1 137,940	189,401	66,286

D'après le modèle proposé pour les émissions et la consommation des aéronefs en roulage, l'équipement des avions de la famille des A320 par un dispositif leur permettant de rouler moteurs éteints, permettrait donc de diminuer sensiblement les consommations et émissions de tous les avions :

	Carburant	CO	CO ₂	HC	COV	NO _x	SO ₂	PM _{2,5}
Variation absolue	22,807 t	-0,940 t	-70,289 t	-108,707 kg	-107,770 kg	-20,868 kg	-20,290 kg	-12,188 kg
Variation relative	-9,68 %	-16,25 %	-9,67 %	-16,40 %	-16,40 %	-1,80 %	-9,68 %	-15,53 %

Ces résultats sont surprenants pour deux raisons principales. D'une part, il aurait été possible de s'attendre à des gains bien supérieurs étant donné que 41,67 % des mouvements sont réalisés par des avions de la famille A320. D'autre part, une variation relative des divers polluants proches de celle du carburant consommé aurait été attendue puisque, pendant les phases de roulage, pour un modèle d'aéronef donné, il n'y a qu'un seul jeu de facteurs d'émissions, et par conséquent les variations d'émissions sont proportionnelles à la variation de consommation pour ce modèle d'aéronef.

Cette différence peut néanmoins s'expliquer par le fait que tous les aéronefs n'ont pas les mêmes facteurs d'émission (certains types d'avions sont plus « propres » que d'autres) et que leurs consommations ne sont pas impactées de la même façon par les changements apportés dans le scénario modifié (en particulier, les A320 consomment beaucoup moins dans le scénario modifié, que dans le scénario de référence). D'autre part, les APU ont des facteurs d'émission très différents de ceux des moteurs principaux, et les APU des avions de la famille des A320 sont utilisées beaucoup plus longtemps dans le scénario modifié que dans le scénario de référence, alors que c'est le contraire en ce qui concerne leurs moteurs.

Importance de la prise en compte des APU

Afin de quantifier la consommation due aux APU et l'impact de celle-ci sur les émissions globales de polluants, les calculs environnementaux ont également été effectués sans prendre en compte le fonctionnement des APU. Les résultats suivants ont été obtenus pour l'ensemble des vols :

	Carburant	CO	CO ₂	HC	COV	NO _x	SO ₂	PM _{2,5}
Scénario de référence	211,575 t	5,699 t	650,339 t	653,582 kg	647,948 kg	905,443 kg	188,226 kg	76,218 kg
Scénario modifié	177,722 t	4,736 t	545,148 t	542,312 kg	537,637 kg	773,005 kg	158,108 kg	63,161 kg
Variation absolue	-33,854 t	-0,963 t	-105,190 t	-111,270 kg	-110,311 kg	-132,438 kg	-30,118 kg	-13,056 kg
Variation relative	-16,00 %	-16,90 %	-16,17 %	-17,02 %	-17,02 %	-14,63 %	-16,00 %	-17,13 %

La première conclusion qui s'impose est que la consommation des APU est loin d'être négligeable. Dans le scénario de référence, même en posant l'hypothèse que l'APU n'est en fonction que pendant 11 minutes par stationnement d'un avion, les APU sont néanmoins responsables de 10 % du carburant consommé pendant la phase de roulage.

La seconde conclusion concerne les quantités de polluants émis par les APU. On observe cette fois-ci des variations relatives des émissions de polluant proche de la variation relative de la consommation de carburant. La conclusion qui s'impose est donc que les APU sont responsables de la forte décorrélation observée entre la variation du carburant consommé et les émissions de certains polluants. En effet, le modèle utilisé suppose que la combustion du kérosène dans l'APU est bien plus complète que dans les moteurs au ralenti, ce qui explique que dans le cas où le fonctionnement de l'APU entre en jeu dans le calcul des émissions, la variation relative des émissions de polluants caractéristiques de la combustion incomplète du carburant est bien supérieure à la variation relative de la consommation. En effet, dans le modèle utilisé, le roulage avec l'APU en fonction au lieu des moteurs se traduit par le fait que l'on remplace du carburant « mal brûlé » par les moteurs par du carburant « mieux brûlé » par les APU.

Cette conclusion est toutefois à prendre avec beaucoup de réserves dans la mesure où le modèle d'émission des APU est très incertain. Le modèle d'émission proposé par le CITEPA donne des consommations d'APU moins élevées que celles du modèle américain, mais une décorrélation des variations relatives d'émissions par rapport à la variation relative de carburant consommé du même ordre est également observée. Dans la mesure où des campagnes exhaustives de mesure des émissions des APU n'ont pas été menées, il n'est pas encore possible de valider un modèle ou un autre avec certitude.

4.2.2 Conclusions des résultats détaillés

Le tableau récapitulatif des résultats détaillés obtenus sur les émissions et consommations des aéronefs pour l'étude ROUL a été joint en annexe D. Il est possible d'en tirer les conclusions suivantes :

Résultats pour la flotte des avions de la famille des A320

Le bilan est clairement positif pour les avions de la famille A320. Ils économisent plus de 30 % du carburant qui leur était nécessaire pour le roulage dans le scénario de référence et la partie du carburant qui est brûlée par l'APU à la place des moteurs est de moins grand quantité et « mieux brûlée ».

Il faut remarquer que près des trois quarts des gains est réalisé sur les roulages d'arrivée, ce qui s'explique par le fait que les moteurs fonctionnent pendant au moins 6 minutes pour les roulages de départ alors qu'ils ne fonctionnent obligatoirement que pendant 2 minutes pour les arrivées. Même si la durée des roulages d'arrivée est généralement plus courte que celle des roulages de départ (absence de queue en entrée de la piste de décollage notamment), les économies réalisées sont plus grandes pendant les roulages d'arrivée.

Résultats pour les autres avions

Les autres avions sont quant à eux pénalisés du fait de la vitesse plus lente des avions équipés du dispositif de roulage moteurs éteints. Parmi ces avions, ce sont les moyens et petits porteurs qui semblent le plus pénalisés. Ceci laisse supposer que, toutes proportions conservées, les gros-porteurs sont moins souvent gênés par les avions de la famille A320 que les avions de même catégorie que les A320.

Cependant, par le fait que les gros-porteurs consomment beaucoup plus que les avions plus petits, en dépit du fait qu'ils ne représentent que 35 % des mouvements assurés par les avions non modifiés et qu'ils sont moins pénalisés par les avions modifiés que le reste des avions, en valeur absolue, les gros-porteurs sont néanmoins responsables de plus de la moitié de l'augmentation de la consommation et des émissions subies par les avions non modifiés. Il apparaît en outre que, au régime de ralenti, la combustion du kérosène est moins complète dans les moteurs des gros-porteurs que dans ceux des moyens et petits porteurs. À quantité égale de carburant consommé, les moteurs des gros-porteurs rejettent en effet plus de polluants caractéristiques d'une combustion incomplète, que les moteurs des moyens et petits porteurs.

Il faut également remarquer que les avions roulant avec leurs moteurs sont globalement plus pénalisés pendant leur roulage d'arrivée que pendant leur roulage de départ. Ceci semble provenir du fait qu'une grande partie des roulages de départ comporte une phase d'attente en queue à la piste de décollage et pendant cette phase d'attente, tous les avions étant arrêtés dans la queue, les performances de roulage des avions n'ont pas d'importance.

4.3 Discussion des résultats

4.3.1 Remarques concernant les hypothèses initiales

Coefficients de redressement des consommations pendant les phases de roulage

Une grande partie de l'incertitude quant aux résultats fournis par le modèle proposé, provient du fait qu'il n'existe pas encore suffisamment de données pour étayer avec certitude les coefficients de redressement adoptés afin d'évaluer la consommation pendant le roulage, de façon plus réaliste que ne le fait le cycle LTO standard de l'OACI.

Ces coefficients ne sont donc que des valeurs estimées à partir d'un assez faible nombre de modèles d'aéronefs pour lesquels les données ont déjà été communiquées. En outre, ces données portent sur la consommation de ralenti complet et pas sur la consommation au régime de démarrage. Les valeurs pour cette dernière ont donc été estimées en fonction d'une régression linéaire entre la consommation des moteurs et leur poussée, sachant que la poussée de démarrage peut atteindre une poussée similaire à la poussée d'approche pour les avions les plus lourds.

Ceci pose également la question des facteurs d'émissions utilisés pour la phase de roulage. En effet, le modèle présenté utilise les mêmes facteurs d'émission pour le ralenti, la poussée de roulage et la poussée de démarrage. Or si la poussée de démarrage peut être du même ordre que la poussée d'approche, il est légitime de se demander si les facteurs d'émissions devraient, eux aussi, être de l'ordre de ceux de la poussée d'approche. Il a été décidé, en l'absence de données concernant les phases de mise en mouvement des avions, d'utiliser quand même les facteurs d'émissions du régime de roulage pour la phase de mise en mouvement, en supposant que l'impulsion de poussée est trop courte, pour que les paramètres du moteur se stabilisent en température et en vitesse du flux d'air, à des valeurs qui correspondraient aux facteurs d'émissions du régime d'approche.

Les données qui ont déjà été obtenues semblent valider les ordres de grandeur des coefficients proposés, mais plus de données sont encore attendues, notamment des données de consommation en provenance d'Air France, pour permettre de considérer que les coefficients proposés permettent d'obtenir une estimation réaliste des consommations opérationnelles, à partir d'une simulation SIMMOD. Dans l'attente de données suffisantes pour étalonner les prévisions calculées à l'aide de consommations réelles, il est d'autant plus difficile d'estimer l'erreur commise à cause des incertitudes portant sur les coefficients de redressement des consommations, que les consommations dépendent fortement des spécificités des scénarios modélisés en capacité.

Roulage en configuration économique

Une autre incertitude provient des usages des compagnies concernant le roulage en configuration économique. Toutes les données n'étant pas disponibles sur les pratiques des compagnies à Paris CdG, en matière de roulage certains moteurs éteints, l'hypothèse a été faite que, hormis les avions modifiés pour pouvoir rouler sans moteur, tous les avions roulaient en configuration tous moteurs en fonctionnement, aussi bien pour les départs que pour les arrivées. Les données incomplètes disponibles permettent cependant de savoir qu'à titre indicatif, ce type de roulage est surtout pratiqué sur les roulages d'arrivée par les moyens et petits porteurs. Il se trouve que ce sont précisément les moyens et petits porteurs qui sont les plus pénalisés par la diminution de vitesse de A320, et ce, pendant leur roulage à l'arrivée.

Il faut cependant remarquer que les avions de la famille A320 sont eux-mêmes des moyens, voire petits porteurs et que la prise en compte des roulages en configuration « un moteur éteint » diminuerait donc également les gains qui sont réalisés en les faisant rouler les deux moteurs éteints. Dans ces conditions, les gains de consommation seraient la différence entre la consommation d'un moteur et de l'APU et la consommation de la seule APU. Alors que dans la situation où l'on considère que tous les moteurs sont allumés pendant le roulage, les gains de consommation sont donnés par la différence entre la consommation des deux moteurs et la consommation de la seule APU.

La prise en compte du fait que, dans la situation réelle, certains avions rouleraient sans utiliser tous leurs moteurs, en particulier à l'arrivée, conduirait donc aux modifications suivantes dans les résultats :

- les gains des avions de la famille A320 et les surconsommations des autres avions devraient être sensiblement les mêmes pour les départs (les avions roulent presque tous avec tous leurs moteurs en vue d'un départ).
- pour les roulages d'arrivée, les gains des avions de type A320 et les surconsommations des autres moyens et petits porteurs devraient tous être réduits puisqu'il ne s'agit que des gains et des surconsommations d'un moteur au lieu de deux.
- les gros-porteurs en roulage à l'arrivée devraient engendrer légèrement moins de surconsommation puisque la proportion de gros-porteur qui pratique le roulage en configuration économique, est moindre que la proportion de moyens et petits porteurs qui le font.

4.3.2 Comparaison des résultats par rapport aux conclusions tirées en capacité

Lien entre les durées des roulages (toutes phases confondues) et les conclusions du calcul de consommation

En se basant uniquement sur les temps de roulage, il a été déterminé que, grâce au dispositif de roulage moteurs éteints, les avions de la famille A320 économisent 2 637 minutes de fonctionnement moteur, soit en moyenne 3 minutes et 43 secondes par mouvement. Les autres avions, en contrepartie, ne subissent une augmentation de leur durée de fonctionnement moteur que de 771 minutes, soit en moyenne, 47 secondes par mouvement.

Du reste, les mêmes conclusions que celles qui ont été formulées sur la base des consommations peuvent être tirées directement des temps de roulage : les gains sont plus importants sur les roulages d'arrivées que sur les roulages de départ et les avions pénalisés sont également plus pénalisés sur les roulages d'arrivée que sur les roulages de départ.

Avec un rapport de plus de 3 en faveur des gains, même si plus de 30 % des avions impactés négativement sont des gros-porteurs, un bilan plus positif que les 8,88 % d'économies réalisées, était attendu concernant la consommation de carburant pour le roulage.

Le paramètre qui semble amoindrir majoritairement les bénéfices du dispositif de roulage moteurs éteints est la consommation des APU. En effet, les avions de la famille A320 utilisent leurs APU pendant 5 394 minutes de plus pour alimenter leurs systèmes, ce qui représente, en moyenne, une augmentation de la durée d'utilisation de l'APU de 7 minutes et 36 secondes par avion.

Mise en perspective des résultats environnementaux avec les conclusions du domaine strict de la capacité

Les conclusions principales de l'étude ROUL avaient été que la présence d'avions roulant légèrement plus lentement que les autres dans le trafic augmentait, certes, le temps de roulage de tous les avions, mais contribuait également à fluidifier le trafic. Dans l'ensemble, il ressortait donc que les gains en économie de carburant (estimés à partir des seuls temps de roulage et sans prendre en compte les APU) des avions de la famille A320 compensaient largement les légères surconsommations subies par les autres avions, et que les légers allongements de temps de roulage étaient tout à fait acceptables dans la mesure où cela permettait de fluidifier le trafic et de réaliser des économies de carburant.

Le calcul des consommations permis par le modèle présenté dans ce rapport relativise ainsi les gains présentés dans l'étude. Le carburant économisé représenterait finalement une assez faible part du carburant total consommé. Mais il faut également noter que les proportions de polluants émis tendraient à varier pour donner des émissions plus faibles des polluants les plus nocifs pour la santé (produit de la combustion incomplète du kérosène).

Les résultats sur les consommations et les émissions montrent donc que finalement, les économies de carburant ne sont pas nécessairement aussi prédominantes dans les bénéfices du scénario étudié que l'on aurait pu l'imaginer.

4.3.3 Sensibilité des résultats et conclusions sur la modélisation proposée

Afin d'évaluer les importances des divers paramètres pris en compte, plusieurs calculs ont été réalisés avec divers paramètres d'entrée.

Importance de la différenciation de consommation entre les arrivées et les départs

Afin d'évaluer l'intérêt d'une différenciation entre les arrivées et les départs, la situation de référence de l'étude ROUL a été analysée, d'une part avec des données de consommations et d'émissions identiques pour les arrivées et pour les départs (moteurs toujours au ralenti complet, pour les arrivées comme pour les départs, que ce soit en phase de mise en mouvement, en phase de roulage ou en phase d'arrêt), d'autre part avec des données de consommations et d'émissions différentes pour les arrivées et les départs, mais indépendantes des phases de roulage (ralenti pour les arrivées, quelles que soient les phases du roulage, et valeurs correspondant à la poussée de maintien en mouvement pour les départs, quelles que soient les phases).

Seule la consommation des moteurs a été évaluée puisque la consommation de l'APU ne dépend pas du type de mouvement (arrivée ou départ). Les résultats suivants ont été obtenus :

- consommation totale de carburant en l'absence de différence de consommation entre arrivées et départs: 202,582 t
- consommation totale de carburant avec une différence de consommation entre arrivées et départs: 211,575 t

Il y a donc une forte variation de la consommation totale de carburant selon que l'on prend ou non en compte le fait que les avions au départ ont tendance à consommer plus que les avions à l'arrivée, la masse de carburant embarquée augmentant les forces de friction au niveau des trains d'atterrissage.

Cette variation représente 4 % du carburant total consommé par les moteurs pour le roulage au cours de la journée de référence, ce qui est de l'ordre de grandeur de la moitié des économies réalisées par l'installation de dispositifs de roulage moteurs éteints sur tous les avions de la famille A320 (10 % cf. 4.2.1 p. 37 si on ne prend en compte que la consommation des moteurs). Ce paramètre n'est donc pas négligeable.

Importance de la modélisation de la poussée de démarrage et de la décélération au ralenti

L'influence des différentes poussées appliquées pour les accélérations suivant un arrêt et les décélérations en vue d'un arrêt, a été évaluée en réalisant d'une part le calcul environnemental avec des données de consommation et d'émissions tenant compte de la différence entre les arrivées et les départs, mais pas de la différence entre les phases de mise en mouvement, de maintien en mouvement et d'arrêt, et d'autre part avec des données tenant compte des différences de poussées appliquées suivant les différentes phases de roulage, seulement pour les roulages de départ (les coefficients de redressement sont ceux proposés en annexe C, il est supposé que pour les arrivées, le ralenti suffit toujours pour toutes les phases de roulage).

Une fois encore, seule la consommation des moteurs a été évaluée et les résultats obtenus sont :

- consommation totale de carburant en l'absence de différence de consommation entre les phases de roulage: 190,835 t
- consommation totale de carburant avec des différences de consommation entre les phases de roulage: 192,158 t

La variation engendrée par les accélérations à un régime plus élevé est donc supérieure à la diminution de la consommation permise par les freinages au ralenti précédant un arrêt. Dans l'ensemble, l'impact de la modélisation de régimes différents pour les accélérations et les décélérations, ne vaut que 0,7 % du carburant total consommé par les moteurs et est donc tout à fait négligeable s'il s'agit d'estimer les consommations des avions dans l'absolu. En revanche, cette variation représente néanmoins 17 % de la variation des consommations de carburant entre les deux scénarios comparés (consommation des APU comprises). Cela signifie que l'ordre de grandeur de l'erreur commise en négligeant les variations de consommations liées aux différentes phases de roulage n'est pas totalement négligeable à l'échelle des gains ou pertes calculées entre deux scénarios. Il est donc judicieux de conserver ce niveau de précision car il peut influencer sur le bilan total des gains, en particulier s'il s'avère que certains types d'avions doivent également ajouter de la puissance pour vaincre leur inertie lors de roulages d'arrivée.

Les autres phases du cycle LTO

Un calcul des consommations a également été effectué en prenant en compte l'ensemble du cycle LTO. Les valeurs déterminées permettent d'évaluer l'importance de la phase de roulage au sein du cycle LTO.

La phase de roulage représente, par rapport au cycle LTO global, pour l'ensemble des vols :

Consommation	CO	CO ₂	HC	COV	NO _x	SO ₂	PM _{2,5}
22,18 %	83,93 %	21,93 %	82,43 %	82,43 %	6,41 %	22,18 %	44,57 %

Plus des trois quarts de la consommation de carburant du cycle LTO sont dus aux autres phases que le roulage. Les polluants qui dépendent directement de la quantité de carburant brûlé (CO₂, SO₂), sont donc principalement rejetés pendant les phases en vol et de décollage du cycle LTO.

Les polluants liés à la combustion incomplète du kérosène sont quant à eux très majoritairement rejetés pendant la phase de roulage, phase où les moteurs tournent aux régimes les plus bas et aux températures les plus basses.

Les NO_x sont quant à eux rejetés presque uniquement pendant le décollage et la phase de montée, car ils sont caractéristiques des régimes moteurs élevés.

Les particules fines comportent à la fois des composés rejetés aux régimes moteurs bas (particules fines volatiles d'origine organique) et des composés rejetés principalement aux régimes moteurs hauts (les suies), ce qui explique que les émissions de PM_{2,5} soient plus uniformément réparties sur les différentes phases du cycle LTO que celles des autres polluants.

Impact des retards supplémentaires dus aux accélérations et décélérations

En utilisant le modèle conservant les distances SIMMOD et non les temps SIMMOD, le temps de roulage global cumulé sur tous les mouvements du scénario de référence augmente de 4,9 % et la consommation pour le scénario de référence monte à 246,200 t. Ceci signifie que les allongements des temps de roulage, dus au fait que les accélérations et décélérations ne sont pas instantanées dans le modèle de consommation et d'émissions, induisent 10,497 t supplémentaires de kérosène consommé pour le roulage des avions (APU comprises) dans le scénario de référence.

Prendre en compte les temps supplémentaires engendrés par le fait de conserver les distances parcourues plutôt que les temps de parcours de la simulation SIMMOD est un choix qu'il faut réaliser avec précaution, puisqu'il s'accompagne d'une augmentation très sensible de la consommation. Il est recommandé de n'utiliser le modèle conservant les distances que dans les cas où les temps de roulage des différents avions simulés n'ont que peu d'influence les uns sur les autres (simulation avec peu de trafic), ou bien si les retards engendrés par les accélérations et les décélérations ont également été modélisés dans SIMMOD, en tant qu'arrêts plus longs, par exemple.

Conclusion

Compte tenu des possibilités offertes par les données produites pour les études de capacité, ainsi que des outils déjà existants en matière de prise en compte environnementale, les émissions des aéronefs se sont démarquées comme étant les impacts les moins précisément évalués, mais également ceux pour lesquels l'utilisation des données de capacité, pouvait permettre d'en améliorer le plus la prise en compte.

Un modèle d'émissions et de consommations a donc été créé, dans l'optique d'offrir une intégration automatisée du calcul des consommations et émissions des aéronefs lors des calculs des temps de circulation et des retards de ces mêmes aéronefs, à partir des données de simulation produites par le logiciel SIMMOD. Même si les données sur les émissions et consommations des aéronefs sont encore trop incomplètes pour affirmer avec certitude que le modèle proposé est correctement calibré, les ordres de grandeur des données qu'il produit sont cohérents avec les échantillons de valeurs opérationnelles réelles recueillies.

D'autre part, l'application du modèle sur un cas pratique a montré que la démarche proposée permet effectivement d'aboutir à des conclusions pouvant influencer sur l'estimation générale des gains et pertes engendrées par les projets étudiés. Le cas d'étude a également permis d'affirmer que les paramètres modélisés avaient une importance non négligeable dans le calcul des émissions et des consommations des aéronefs.

Dans l'ensemble, même si le modèle proposé peut encore gagner à être développé et détaillé davantage, il permet d'ores et déjà de fournir, ne serait-ce qu'à titre indicatif, une estimation intéressante de certains impacts environnementaux des transports aériens et permet ainsi d'apporter une perspective nouvelle aux études de capacité en contribuant à renforcer la dimension développement durable de l'évaluation des scénarios envisagés.

Bibliographie

- 1. CATELOY, Olivier, RODRIGUEZ, Jérôme. Détermination de la capacité d'un aéroport. Bonneuil-sur-Marne : Ateliers de reprographie du STAC, 2005, 132 p. ISBN 2-11-094291-6.
- 2. STAC, département Aménagement Capacité Environnement, division Environnement. Élaboration des cartes de bruit aérien [en ligne]. Toulouse : STAC, septembre 2007, 43 p. Format PDF. Disponible sur : < http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/publications/documents/guidmet_bruitv2_2.pdf > (Consulté le 01.04.2010).
- 3. EUROPE. Parlement européen et conseil de l'union européenne. Directive 2002/30/CE relative à l'établissement de règles et procédures concernant l'introduction de restrictions d'exploitation liées au bruit dans les aéroports de la Communauté. Journal officiel de Communautés européennes [en ligne], mars 2002, p. 40-46. Format PDF. ISSN 1725-2563. Disponible sur : < http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Directive_2002-30.pdf > (Consulté le 08.04.2010).
- 4. OACI. Annexe 16 à la convention relative à l'aviation civile internationale, volume II, émissions des moteurs d'aviation. OACI, juillet 2008, 110 p.
- 5. OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale). *Background information for the ICAO aircraft engine emissions databank* [en ligne]. OACI, 2009, 7 p. Format PDF. Disponible sur : < <http://www.caa.co.uk/default.aspx?catid=702>>. (Consulté le 01.04.2010).
- 6. IOVINELLI, Ralph, GUPTA, Mohan, MA, Carl, et al. *Recommended best practice for quantifying speciated organic gas emissions from aircraft equipped with turbofan, turbojet, and turboprop engines* [en ligne]. Washington : FAA, EPA, mai 2009, 19 p. Format PDF. Disponible sur : < [http://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/media/FAA-EPA_RBP_Speciated % 2000G_Aircraft_052709.pdf](http://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/media/FAA-EPA_RBP_Speciated%2000G_Aircraft_052709.pdf) > (Consulté le 08.04.2010).
- 7. WAYSON, Roger L., FLEMING, Gregg G., IOVINELLI, Ralph. *Methodology to estimate particulate matter emissions from certified commercial aircraft engines. Journal of the air & waste management association* [en ligne], janvier 2009, vol. 59, p. 91-100. Format PDF. ISSN 1047-3289. Disponible sur : < <http://www.volpe.dot.gov/air/docs/awma-foa.pdf>>. (Consulté le 22.04.2010).
- 8. DGAC. Pollution atmosphérique et aviation, aide-mémoire [en ligne]. Paris : DGAC, 2002, 57 p. Format PDF. Disponible sur : < http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Aide_Memoire_DGAC.pdf > (Consulté le 01.04.2010).
- 9. OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale). Avantages supplémentaires des carburants d'aviation alternatifs durables pour la qualité de l'air locale [en ligne]. Rio de Janeiro : OACI, 2009, 4 p. Note de travail CAAF/09-WP/05 de la conférence sur l'aviation et les carburants de remplacement. Format PDF. Disponible sur : < http://www.icao.int/CAAF2009/Docs/CAAF-09_WP005_fr.pdf > (Consulté le 20.04.2010).
- 10. *Energy and environmental analysis, inc. Technical data to support FAA's advisory circular on reducing emissions from commercial aviation* [en ligne]. Draft version. Ann Arbor : U.S. Environmental protection agency motor vehicle and fuel emissions laboratory, septembre 1995, 66 p. Format PDF. Disponible sur : < <http://www.epa.gov/oms/regs/nonroad/aviation/faa-ac.pdf>>. (Consulté le 22.04.2010).
- 11. SERVEAU, Laëtitia. Guide méthodologique pour la détermination des émissions dans l'atmosphère des APU [en ligne]. Paris : CITEPA, DGAC, juillet 2007, 5 p. Format PDF. Disponible sur : < [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Guide_CITEPA_ % 2520APU_180707.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Guide_CITEPA_%2520APU_180707.pdf) > (Consulté le 22.04.2010).
- 12. EDWARDS, Tim. « Kerosene » *fuels for aerospace propulsion – composition and properties* [en ligne]. Indianapolis : American Institute of Aeronautics and Astronautics, juillet 2002, 11 p. Rapport AIAA 2002-3874. Format PDF. Disponible sur : < [http://rocket.itsc.uah.edu/u/education/files/00_PRC_Area/00_Huynh/InBox/Brown_SP/Reference % 20Material/AIAA % 20Papers/2002_3874 % 20- % 20Kerosene % 20Fuels % 20for % 20Aerospace % 20Propulsion % 20- % 20Compo.pdf](http://rocket.itsc.uah.edu/u/education/files/00_PRC_Area/00_Huynh/InBox/Brown_SP/Reference%20Material/AIAA%20Papers/2002_3874%20-%20Kerosene%20Fuels%20for%20Aerospace%20Propulsion%20-%20Compo.pdf) > (Consulté le

15.04.2010).

- 13. OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale). ICAO *Aircraft engine emissions databank* [en ligne]. OACI, 1995. Mise à jour du 05.02.2009. Format XLS. Disponible sur : < <http://www.caa.co.uk/default.aspx?catid=702>>. (Consulté le 01.04.2010).
- 14. KNIGHTON, W. B., HERNDON, S. C., MIAKE-LYE, R. C. *Aircraft engine speciated organic gases: speciation of unburned organic gases in aircraft exhaust* [en ligne]. Washington: FAA, EPA, mai 2009, 25 p. Format PDF. Disponible sur : < <http://www.epa.gov/nonroad/aviation/420r09902.pdf>>. (Consulté le 08.04.2010).
- 15. POPOVITCHEVA, O. B., PERSIANTSEVA, N. M., TRUKHIN, M. E. et al. *Experimental characterization of aircraft combustor soot: microstructure, surface area, porosity and water adsorption. Physical chemistry chemical physics* [en ligne], 2000, vol. 2, p. 4421-4426. Format pdf. ISSN 1463-9084. Disponible sur : < http://www.rsc.org/delivery/_ArticleLinking/DisplayArticleForFree.cfm?doi=b0043451&JournalCode=CP> (Consulté le 06.05.2010).

Annexes

Annexe A: liste des abréviations, sigles et acronymes utilisés

ANP	Aircraft Noise and Performance
ACNUSA	Autorité de Contrôle des Nuisances Sonores Aéroportuaires
APU	Auxiliary Power Unit
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Etude sur la Pollution Atmosphérique
COV	Composés Organiques Volatils
CSB	Carte Stratégique Bruit
DGAC	Direction Générale de l'Aviation Civile
EGS	Etude de Gêne Sonore
EPA	Environmental Protection Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FOI	Totalförsvarets forskningsinstitut
GPU	Ground Power Unit
HC	Hydrocarbures
INM	Integrated Noise Model
ISA	International Standard Atmosphere
kt	noeud (vitesse en nautiques par heure), pluriel kts
LAeq	Niveau de pression acoustique moyen équivalent pondéré A
Lden	Niveau de pression acoustique moyen Day (6h-18h) Evening (18h-22h) Night (22h-6h)
LTO	Landing and Take-Off
NOx	oxydes d'azote
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
OCEAN	Outil de Calcul des Emissions Annuelles des aéroNefs
Paris CdG	Aéroport de Paris Charles de Gaulle
PEB	Plan d'Exposition au Bruit
PGS	Plan de Gêne Sonore
PM2,5	Particulate Matter less than 2,5 µm in diameter
SIMMOD	SIMulation MODeL
STAC	Service Technique de l'Aviation Civile
TO/GA	Take-Off/Go Around poussée pour le décollage ou une remise de gaz

Annexe B: comparaison modèle simple OCEAN/modèle détaillé proposé

	Modèle OCEAN	Modèle proposé en partie 2
Objectif premier	Évaluation dans l'absolu	Évaluation des variations entre deux scénarios
Ordres de grandeurs des consommations de carburant traitées	105 t	102 t
Ordres de grandeur des nombres de mouvements traités	105 mouvements	103 mouvements
Base de temps	Année	Base de temps des simulations de capacité (journée en général)
Aéronefs pris en compte dans la base de données	Avions à réaction, à turbopropulseurs, à moteurs à pistons, hélicoptères	Avions et réaction, avions à turbopropulseurs
Nombre de régimes moteurs modélisés	4 (régimes standards OACI)	6
Différenciation des consommations des roulages d'arrivée et de départ	Non	Oui
Durées des phases du cycle LTO calculées	Les durées sont calculées par aéroport et par type d'aéronef.	Les durées sont calculées au cas par cas pour chaque vol.
Prise en compte des APU	Non	Oui
Prise en compte de la possibilité de rouler certains moteurs éteints	Non	Oui
Logiciels requis pour fonctionner	Microsoft Access	OpenOffice et SIMMOD

Annexe C : coefficients de redressement actuellement retenus

	taxi in				taxi out				idle
	all eng config		econ config		all eng config		econ config		
	breakaway	taxi	breakaway	taxi	breakaway	taxi	breakaway	taxi	
a	0,9	0,9	0,9	0,9	1	0,9	1,5	1	0,9
b	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
c	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
d	0,9	0,9	0,9	0,9	1,1	0,9	2	1	0,9
e	0,9	0,9	0,9	0,9	1,1	0,9	2	1	0,9
f	0,9	0,9	0,9	0,9	1,2	0,95	2	1	0,9
g	0,75	0,75	0,75	0,75	1,5	1	2	1,05	0,75
h	0,85	0,85	0,85	0,85	1,5	1	2	1,1	0,85
i	0,85	0,85	0,85	0,85	2	1	3	1,5	0,85
j	0,75	0,75	0,75	0,75	1,2	1	2	1	0,75
k	0,75	0,75	0,75	0,75	2	1	3	1,5	0,75

breakaway : mise en mouvement

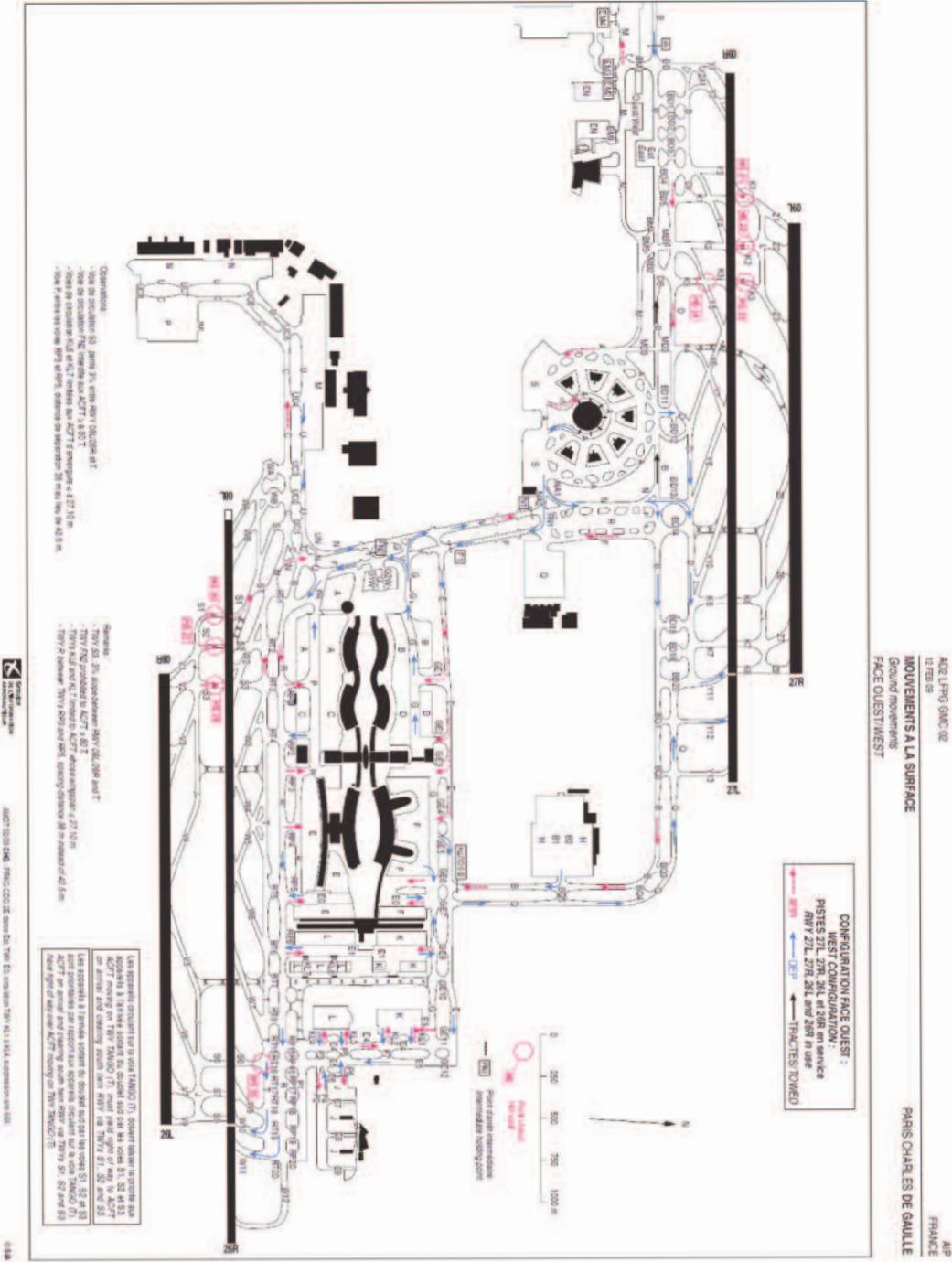
a/c type	description	eng use	
		taxi in econ	taxi out econ
a	turboprop	1	1
b	2 rear-mounted eng small	1	1
c	3 rear-mounted eng small	2	2
d	2 wing-mounted eng small	1	1
e	4 eng small	2	2
f	2 rear-mounted eng large	1	1
g	3 rear-mounted eng large	2	2
h	2 wing-mounted eng large	1	1
i	2 wing-mounted eng heavy	1	1
j	3 eng heavy	2	2
k	4 eng heavy	2	2

Catégories small, large et heavy sont déterminées en fonction de la forme des avions et de leur emport de passagers.

Annexe D : résultats détaillés pour le cas d'étude ROUL

		Carburant (t)	CO (kg)	CO2 (kg)	HC (kg)	COV (kg)	Nox (kg)	SO2 (kg)	PM 2,5 (kg)
Familie A320	Départs	référence	950,468	143 325,876	102,455	101,572	238,549	40,812	12,935
		variation	-312,722	-22482,623	-43,919	-43,540	3,039	-6,501	-4,762
		variation relative	-33,85 %	-15,69 %	-42,87 %	-42,87 %	1,27 %	-15,93 %	-36,81 %
Familie A320	Arrivées	référence	973,098	11 2924,562	101,482	100,607	150,300	32,272	12,286
		variation	-723,066	-59706,275	-79,750	-79,062	-34,976	-17,176 %	-9,109
		variation relative	-74,31 %	-52,87 %	-78,59 %	-78,59 %	-23,27 %	-53,22 %	-74,14 %
Familie A320	Total	référence	1 923,565	256 250,438	203,937	202,179	388,849	73,084	25,221
		variation	-1 044,788	-82 188,897	-123,669	-122,602	-38,015	-23,677	-13,871
		variation relative	-54,32 %	-32,07 %	-60,64 %	-60,64 %	-9,78 %	-32,40 %	-55,00 %
Gros porteurs	Départs	référence	1 056,850	164 053,924	146,240	144,979	313,745	48,383	17,190
		variation	41,890	5460,603	7,159	7,097	8,551	1,560	0,796
		variation relative	3,96 %	3,33 %	4,90 %	4,90 %	2,73 %	3,22 %	4,63 %
Gros porteurs	Arrivées	référence	1 081,934	461052	151,517	150,211	179,305	35,749	16,979
		variation	15,796	1080,092	3,288	3,259	2,789	0,500	0,352
		variation relative	1,46 %	1,47 %	2,17 %	2,17 %	1,56 %	1,40 %	2,07 %
Gros porteurs	Total	référence	2 138,785	286 830,384	297,757	295,190	493,050	84,132	34,169
		variation	57,686	7268,695	10,447	10,357	11,341	2,060	1,148
		variation relative	2,70 %	2,53 %	3,51 %	3,51 %	2,30 %	2,45 %	3,36 %
Moyens et petits porteurs autres que la famille A320	Départs	référence	840,244	104 423,765	76,313	75,655	175,176	29,805	9,323
		variation	7,661	798,082	1,536	1,523	1,060	0,229	0,172
		variation relative	0,90 %	0,76 %	2,01 %	2,01 %	0,60 %	0,77 %	1,85 %
Moyens et petits porteurs autres que la famille A320	Arrivées	référence	872,371	78 997,103	84,788	84,057	101,732	22,671	9,759
		variation	39,295	3833,249	2,979	2,953	4,747	1,098	0,363
		variation relative	4,50 %	4,85 %	3,51 %	3,51 %	4,67 %	4,84 %	3,72 %
Moyens et petits porteurs autres que la famille A320	Total	référence	1 712,615	183 420,689	161,101	159,712	276,909	52,476	19,083
		variation	46,956	4631,330	4,515	4,476	5,806	1,327	0,535
		variation relative	2,73 %	2,52 %	2,80 %	2,80 %	2,10 %	2,53 %	2,80 %
Avions autres que la famille A320	Départs	référence	1 907,094	268 477,689	222,553	220,634	488,921	78,188	26,513
		variation	49,551	6258,685	8,695	8,620	9,611	1,789	0,968
		variation relative	2,60 %	2,33 %	3,91 %	3,91 %	1,97 %	2,29 %	3,65 %
Avions autres que la famille A320	Arrivées	référence	1 954,305	201 773,564	236,305	234,268	281,038	58,419	26,739
		variation	55,092	5641,341	6,266	6,212	7,536	1,598	0,715
		variation relative	2,82 %	10,8672,80 %	2,65 %	2,65 %	2,68 %	2,74 %	2,67 %
Avions autres que la famille A320	Total	référence	3 861,399	470 251,253	458,858	454,902	769,959	136,608	53,252
		variation	104,642	11 900,026	14,962	14,833	17,147	3,387	1,683
		variation relative	2,71 %	2,53 %	3,26 %	3,26 %	2,23 %	2,48 %	3,16 %

Annexe E: plan de Paris CdG



Annexe F: tableau synthétique des difficultés rencontrées et des solutions proposées

Difficulté	Solution proposée
Données de certification OACI incomplètes	Utilisation des données FOI pour les turbopropulseurs. Remplacement des valeurs manquantes par des valeurs correspondant à des moteurs similaires de par leur puissance, leur génération et leur type.
Valeurs de consommations et d'émissions au roulage uniquement disponibles pour 7 % de la poussée nominale	Proposition de coefficients de redressement sur la base de régressions linéaires entre les débits carburant et la poussée produite par les moteurs.
Absence de la prise en compte des PM, du SO ₂ et du CO ₂ dans les données de certification OACI	Implémentation de la méthode FOA3.0 pour la détermination des émissions de PM et de SO ₂ . Détermination de la quantité de carbone apporté par le carburant et évaluation des émissions de CO ₂ par conservation de la quantité stœchiométrique de carbone.
Absence de lien entre les moteurs des bases de données OACI et FOI et les avions des feuilles de vols SIMMOD	Recherche des motorisations disponibles pour chaque modèle d'avion. Création d'une base de données donnant les émissions et consommations par modèle d'avion.
La motorisation n'est pas précisée dans les feuilles de vols. Seul le modèle d'aéronef est précisé.	Création d'une motorisation moyenne pour chaque modèle d'avion.
Manque de données concernant les consommations réelles opérationnelles des avions au sol	Sollicitation d'Air France pour l'obtention de données de roulage opérationnelles.
Nombre d'arrêts surestimés par SIMMOD	Création d'un algorithme identifiant l'avion qui cause l'arrêt d'un autre avion, afin de pouvoir déterminer si le premier ralentit le second ou si l'arrêt est justifié.
Absence de modélisation des accélérations et décélérations dans SIMMOD	Création d'un algorithme reconstituant le parcours de chaque avion à partir du rapport exhaustif de la simulation SIMMOD. Création d'un algorithme calculant les accélérations et décélérations pour chaque vol à partir des parcours reconstitués pour chaque vol.

Annexe G: extrait de la documentation des outils créés (en cours de rédaction) traitant de la façon dont sont déterminés les arrêts « légitimes » de SIMMOD

1. Principe de calcul des durées utilisées pour le calcul des données environnementales

1.1 Détermination des successions d'événements de chaque vol à partir du SIMU26

1.1.1 Objectif

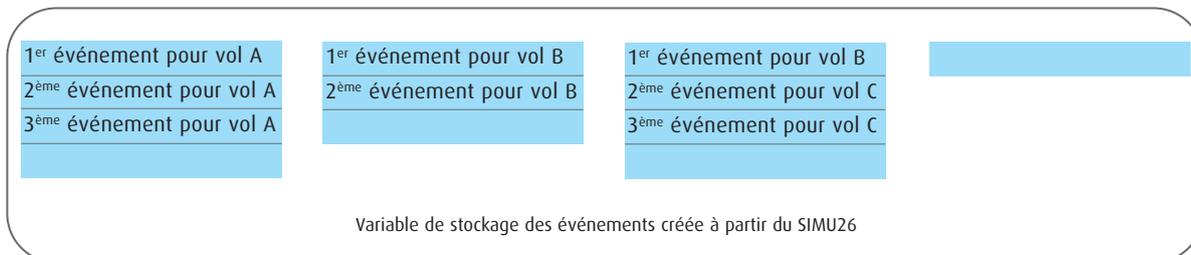
Il n'est pas possible d'utiliser les temps SIMMOD directement pour calculer le bilan des consommations pour deux raisons. D'une part, SIMMOD ne modélise pas, pour le roulage, les accélérations et décélérations, qui sont cependant nécessaires au calcul des durées passées par les moteurs dans les divers régimes, et d'autre part, SIMMOD surestime le nombre d'arrêts car il ne modélise pas le fait que des avions puissent ralentir pour éviter des conflits.

Afin de pouvoir déterminer les temps d'accélération et de décélération de chaque vol, il est donc nécessaire de reconstituer l'historique des événements de chaque vol. L'objectif de l'algorithme de détermination des successions d'événements de chaque vol est donc de constituer, lors de la lecture du SIMU26, un historique des événements (similaire à ce qu'il est possible d'obtenir en cliquant sur un avion dans l'animateur de SIMMOD) par vol.

1.1.2 Principe de l'algorithme

Les événements étant enregistrés par ordre chronologique dans le SIMMU26, le principe de l'algorithme est extrêmement simple. Le script parcourt le SIMU26 ligne à ligne, et à chaque ligne, lit le numéro du vol concerné par l'événement décrit par la ligne, puis ajoute l'événement à l'historique du vol concerné par l'événement.

Typiquement :



1.1.3 Types d'événements enregistrés

Les événements sont également remaniés par rapport aux événements du SIMU26. Seuls sept types sont enregistrés (contre 68 dans le SIMU26), dont cinq sont des types d'événements « définitifs » et deux types d'événements d'arrêt « temporaires » qui sont utilisés dans l'historique jusqu'à ce que l'événement suivant puisse être ajouté à l'historique pour permettre de décider si l'arrêt était justifié ou non :

Événements définitifs :

- Taxi : événement de roulage, les paramètres d'heure, de durée et de vitesse sont enregistrés, ainsi que les numéros des nœuds de départ et d'arrivée.
- TO : événement de course de décollage, seule la durée est enregistrée.
- CLIMB : événement de déplacement en l'air pour un départ, seule la durée est enregistrée.
- APP : événement de déplacement en l'air pour une arrivée ou course sur piste d'atterrissage.
- STOP : Arrêt justifié (code autre que H3 ou H5, code H3 et H5 > 5 secondes non causés par un avion plus lent).

Événements temporaires :

- SHORTSTOP : code H3 ou H5 < 5 s. Deviennent des « ? », s'ils sont suivis par un autre « SHORTSTOP », sont intégrés au temps de roulage (et donc diminuent virtuellement la vitesse de roulage puisque la même distance est parcourue en plus de temps) s'ils sont suivis d'un « TAXI », sont intégrés au temps d'arrêt s'ils précèdent un « STOP ».
- ? : code H3 ou H5 > 5 s. Restent « ? » s'ils sont suivis d'un autre « ? », sont intégrés au temps de roulage (et donc diminuent virtuellement la vitesse de roulage puisque la même distance est parcourue en plus de temps) s'ils précèdent un « TAXI », sont intégrés au temps d'arrêt s'ils précèdent un « STOP ».

2. Détermination des durées passées par les moteurs aux divers régimes à partir des successions d'événements de chaque vol

2.1 Cas simples

Dans les cas simples, il suffit d'ajouter les durées des événements aux durées de régime moteur correspondantes. Ces cas simples sont :

- STOP → STOP
- TAXI → TAXI
- TAXI → TO
- STOP → TO
- APP → TAXI
- APP → STOP

2.2 Cas nécessitant une analyse des données

Taxi → STOP : la durée de la décélération compte comme temps de régime IDLE et non comme temps de régime de maintien en mouvement. La moitié du temps de décélération compte comme temps de retard par rapport aux temps SIMMOD (temps qui serait éventuellement rajouté au temps de régime de maintien en mouvement, si l'utilisateur le choisit).

STOP → TAXI : la moitié du temps d'accélération est comptée comme temps de retard par rapport aux temps SIMMOD (temps qui serait éventuellement rajouté au temps de régime de maintien en mouvement, si l'utilisateur le choisit). Les cinq premières secondes de la durée du TAXI compte comme temps en régime « *breakaway* » et non comme temps de régime de maintien en mouvement.

3 Méthode de détermination des arrêts correspondant à de simples ralentissements

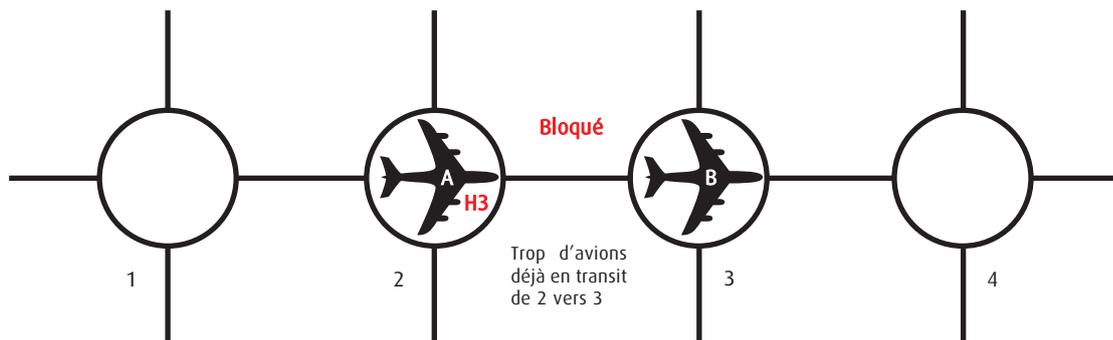
Remarque préalable : le test présenté dans ce paragraphe vise à repérer les arrêts dus au phénomène de rattrapage d'avions lents par des avions plus rapides. Lorsque qu'un avion A rapide effectue des arrêts parce qu'il rattrape régulièrement un avion B plus lent, la vitesse de l'avion A est corrigée par le programme de manière à ce qu'il roule moins vite (mais sans s'arrêter) dans la variable de stockage utilisée pour le calcul environnemental que dans le SIMU26. La vitesse enregistrée n'est donc pas forcément la vitesse indiquée dans le SIMU26.

3.1 Cas des arrêts pour cause de capacité maximale d'un lien atteinte (code H3)

L'avion A vient du nœud 1 et est bloqué au nœud 2 en code H3 (capacité maximale du lien atteinte) alors qu'il veut transiter vers le nœud 3.

L'algorithme recherche parmi tous les événements déjà enregistrés à partir de la lecture du SIMU26 (c'est-à-dire pour tous les avions) l'événement de mouvement d'un avion B qui met fin à l'immobilisation de l'avion A en code H3. Cet événement doit donc remplir les conditions suivantes :

- Il s'agit d'un mouvement qui a eu lieu à l'heure exacte de fin de l'arrêt de l'avion A en H3.
- Ce mouvement fait quitter le lien 2 → 3 à l'avion B (c'est-à-dire que l'avion B a effectué juste avant le mouvement en question un déplacement de 2 vers 3).



En outre, l'avion B ne doit être la cause de l'arrêt de l'avion A que parce qu'il est plus lent que celui-ci. L'avion B doit donc satisfaire les conditions suivantes :

- Soit l'avion B a parcouru le lien 2 → 3 en roulant moins vite (vitesse enregistrée par le programme) que l'avion A ne roulait sur le lien 1 → 2 (vitesse enregistrée), soit la vitesse de l'avion B (vitesse enregistrée) sur le lien 2 → 3 est inférieure à la vitesse originale du SIMU26 pour l'avion A sur ce même lien.
- L'avion B ne s'est pas arrêté au nœud 3 car sinon, l'arrêt de l'avion A est dû à une file d'attente et il est justifié.
- L'avion B a également parcouru le lien 1 → 2 car sinon, l'avion A ne suit pas l'avion B et l'arrêt de l'avion A est justifié puisque dû à un conflit de priorité.

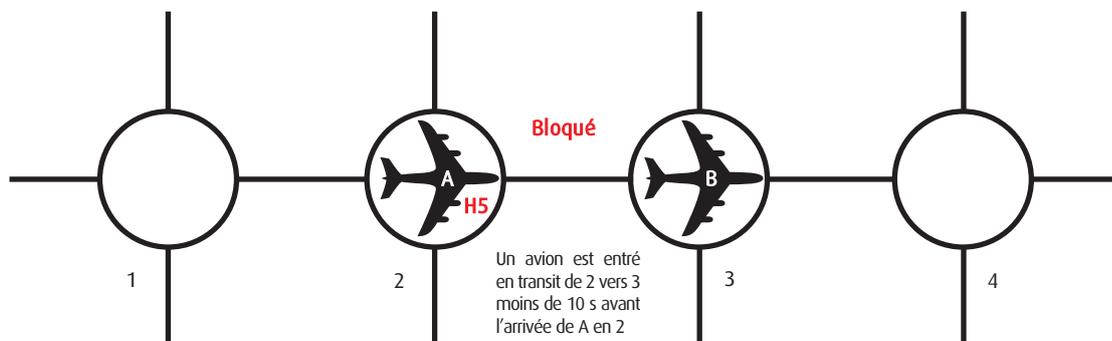
Si un tel avion B est trouvé, alors l'arrêt de code H3 de l'avion A n'est pas justifié ; L'arrêt de l'avion A sera donc intégré à son temps de roulage sur le lien 2 → 3 et sa vitesse de roulage sur ce lien sera diminuée en conséquence par rapport à la vitesse de SIMMOD.

3.2 Cas des arrêts pour cause de séparation temporelle entre deux avions non respectés (code H5)

L'avion A est bloqué en code H5 (l'avion A en suit un autre qui est passé moins de 10 s avant lui) au nœud 2, alors qu'il veut se rendre au nœud 3 et qu'il vient du nœud 1.

L'algorithme recherche parmi tous les événements déjà enregistrés à partir de la lecture du SIMU26 (c'est-à-dire pour tous les avions) l'événement de roulage entre le nœud 2 et le nœud 3 qui est la cause de l'arrêt en H5 de l'avion A. Il s'agit donc d'un événement de mouvement d'un avion B qui vérifie les conditions suivantes :

- Le mouvement a lieu exactement 10 s avant la fin de l'arrêt en H5 de l'avion A.
- Le mouvement est du nœud 2 vers le nœud 3.



En outre, l'avion B ne doit être la cause de l'arrêt de l'avion A que parce qu'il est plus lent que celui-ci. L'avion B doit donc satisfaire les conditions suivantes :

- L'avion B parcourt le lien 2 → 3 moins vite (vitesses enregistrées) que l'avion A ne le fait dans la simulation SIMMOD (vitesse originale du SIMU26).
- L'avion B ne s'est pas arrêté au nœud 2 car sinon, l'arrêt de l'avion A est dû à une file d'attente et il est justifié.
- L'avion B a également parcouru le lien 1 → 2 car sinon, l'avion A ne suit pas l'avion B et l'arrêt de l'avion A est justifié puisque dû à un conflit de priorité.

Si un tel avion B est trouvé, l'arrêt de l'avion A n'est pas considéré comme justifié et le temps d'arrêt en H5 sera intégré au temps de roulage de l'avion A sur le lien 2 → 3.

3.3 Cas des arrêts de durée inférieure à 5 secondes

Un arrêt de type H3 ou H5 durant moins de 5 secondes est systématiquement considéré comme injustifié et sa durée est intégrée au temps de roulage de l'événement de mouvement suivant.

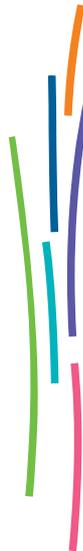
Conception: STAC/SINA groupe Documentation et diffusion des connaissances (DDC)

Photo de Couverture: © Air France/Philippe DELAFOSSE

Illustrations/Dessins: © DGAC page 19
© STAC page 13, 14, 15, 16, 32, 42, 47, 48
© Larousse page 36
© Joël SCHWARTZ page 23

Autre source: © engineering.purdue.edu page 26

Juillet 2012



service technique de l'Aviation civile
CS 30012
31, avenue du Maréchal Leclerc
94385 BONNEUIL-SUR-MARNE CEDEX
Tél. 33 (0) 1 49 56 80 00
Fax 33 (0) 1 49 56 82 19

Site de Toulouse
9, avenue du Docteur Maurice Grynfolgel - BP 53735
31037 TOULOUSE CEDEX
Tél. 33 (0) 1 49 56 83 00
Fax 33 (0) 1 49 56 83 02

Centre de test de détection d'explosifs
Centre d'essais de lancement de missiles - BP 38
40602 BISCARROSSE CEDEX
Tél. 33 (0) 5 58 83 01 73
Fax 33 (0) 5 58 78 02 02