

Développement d'un Simulateur Numérique pour le
Comportement des Aéronefs au Sol de l'Aéroport International
Montréal-Trudeau

par

Chloé DESHAYES

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE AÉROSPATIAL
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 19 AOÛT 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Chloé Deshayes, 2026



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Georges Ghazi, directeur de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

Mme. Ruxandra M. Botez, codirectrice
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Tony Wong, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Julio C. Montecinos, membre du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 18 AOÛT 2026

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Ce mémoire marque l'aboutissement de deux années d'apprentissage et d'efforts en maîtrise à l'École de Technologie Supérieure (ÉTS) de Montréal. La réalisation de ma maîtrise n'aurait pas été possible sans le soutien et la confiance de plusieurs personnes à qui je souhaite exprimer toute ma gratitude.

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement mon directeur de recherche, Georges Ghazi, pour son encadrement, sa confiance et son investissement tout au long de ce projet. Ce mémoire n'aurait pas été le même sans son soutien constant, notamment dans les moments où il fallait comprendre et résoudre les problèmes liés au simulateur. Je m'estime chanceuse d'avoir pu être accompagnée par un professeur aussi impliqué et bienveillant, et je réalise à quel point cela a compté dans la réussite de mon travail. Merci de m'avoir aidée à prendre confiance en mes capacités et d'avoir cru en moi ces deux dernières années.

Je remercie également Ruxandra Mihaela Botez, ma codirectrice, pour son accompagnement, ses remarques pertinentes et le temps qu'elle a consacré à la relecture et à la correction de mes écrits. Merci de m'avoir fait confiance et de m'avoir accueillie au sein du LARCASE.

Je souhaite adresser mes remerciements à tous mes collègues du LARCASE pour les échanges que nous avons partagés et pour leur bonne humeur. Je tiens à remercier particulièrement les stagiaires Clément Rousseaux, Naël Beauvarlet et Cloé Bertino pour leur travail sur le simulateur. Vous avez rendu ce projet un peu plus dynamique.

Ce projet a été rendu possible grâce au soutien financier du Fonds de recherche ÉTS sur les changements climatiques (FRECC) et du Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT) via le programme Établissement de la relève professorale. Je les remercie pour leur appui sans lequel le projet ne pourrait exister.

Je remercie JUNIA HEI pour cette belle opportunité de venir compléter mes études à l'ÉTS de Montréal. Merci à la professeure Katia Deheuvels pour m'avoir fait confiance lors de mon choix de projet.

Je n'oublie pas mon conjoint, Lilian, qui a été un pilier tout au long de ce parcours et sans qui je n'aurais pas pu surmonter les moments les plus difficiles. Merci d'avoir calmé toutes mes angoisses, de m'avoir poussé à donner le meilleur de moi-même et d'avoir relu ce mémoire avec moi une dizaine de fois. À tes côtés, même les périodes les plus intenses ont été les plus douces.

J'exprime enfin ma profonde reconnaissance à ma famille et mes amis pour leur amour et leur soutien. Je remercie mes parents Ines et Franck pour leurs appels, leurs visites et leurs conseils mais aussi pour le soutien financier qu'ils m'ont apporté afin de réaliser mes études à Montréal. Merci à mes sœurs Juliette et Fanny pour leurs encouragements et tous nos moments de complicité, même à distance. Leur confiance m'a permis de traverser les moments de doute et d'aller au bout de ce projet.

Développement d'un Simulateur Numérique pour le Comportement des Aéronefs au Sol de l'Aéroport International Montréal-Trudeau

Chloé DESHAYES

RÉSUMÉ

La croissance du trafic aérien met sous pression les aéroports, dont la capacité physique n'augmente pas au même rythme que le nombre d'opérations. Les opérations au sol, soit les manœuvres réalisées entre la piste et la porte d'embarquement, constituent un enjeu opérationnel et environnemental majeur. Or, aucun outil de simulation existant n'intègre, au sein d'un même environnement, le rejeu de trajectoires historiques, le routage coopératif d'aéronefs et l'estimation environnementale en temps réel. Ce mémoire présente le développement d'un simulateur numérique géoréférencé des opérations au sol de l'aéroport international Montréal-Trudeau (CYUL), implémenté en C++ dans Unreal Engine 5 (UE5). L'environnement 3D, à échelle réelle, permet de rejouer des trajectoires reconstruites à partir de données issues de l'Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B). Des aéronefs contrôlables y sont également routés à l'aide d'un algorithme Windowed Hierarchical Cooperative A* (WHCA*) sur un *line graph* encodant les contraintes opérationnelles. Un modèle basé sur la méthode Boeing Fuel Flow 2 (BFFM2) calcule et affiche en temps réel la consommation de carburant et les émissions polluantes de chaque aéronef. La validation fonctionnelle a confirmé la cohérence des trajectoires rejouées, l'efficacité du routage coopératif pour éviter les conflits et la fiabilité du modèle environnemental. Le simulateur constitue donc un outil d'analyse et d'aide à la décision pertinent, bien que sa validation demeure limitée au cas de CYUL et repose sur des ordres de grandeur plutôt que des mesures réelles. Des travaux futurs sont recommandés pour affiner le modèle dynamique des aéronefs, valider le modèle environnemental par des mesures réelles et tester la généralisation du simulateur à d'autres aéroports.

Mots-clés: simulation aéroportuaire, trafic au sol, routage multi-aéronefs, WHCA*, rejeu de trajectoires, émissions polluantes, BFFM2

Development of a Simulation Platform for Aircraft Surface Operations at Montréal-Trudeau International Airport

Chloé DESHAYES

ABSTRACT

The continuous growth of air traffic is placing increasing pressure on airports, as their physical capacity is not expanding at the same rate as the number of operations to be handled. Ground operations, defined as the maneuvers performed by an aircraft between the runway and the gate, represent a major operational and environmental challenge. Yet no existing simulation tool combines, within a single environment, the replay of historical trajectories, cooperative routing of aircraft, and real-time environmental estimation. This work presents the development of a georeferenced digital simulator of ground operations at Montréal-Trudeau International Airport (CYUL), implemented in C++ within Unreal Engine 5. The full-scale 3D environment allows historical trajectories reconstructed from Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) data to be replayed. Controllable aircraft are also routed on a line graph encoding the airport's operational constraints, using a Windowed Hierarchical Cooperative A* (WHCA*) algorithm. A model based on the Boeing Fuel Flow Method 2 (BFFM2) computes and displays, in real time, the fuel consumption and pollutant emissions of each aircraft. Functional validation confirmed the consistency of the replayed trajectories, the effectiveness of cooperative routing in avoiding conflicts, and the reliability of the environmental model. The simulator therefore constitutes a relevant analysis and decision-support tool, although its validation remains limited to the CYUL case and relies on comparisons rather than real measurements. Future work is recommended to refine the aircraft dynamics model, validate the environmental model against real measurements, and test the generalization of the simulator to other airports.

Keywords: airport simulation, ground traffic, multi-aircraft routing, WHCA*, trajectory replay, pollutant emissions, BFFM2

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Mise en contexte	5
1.2 Simulation et modélisation aéroportuaires de base	7
1.2.1 Approches événementielles et paramétriques	7
1.2.2 Optimisation des opérations au sol	10
1.3 Techniques avancées de simulation comportementale et prédictive	12
1.3.1 Modélisation multi-agents et interactions dans les terminaux	12
1.3.2 Approches axées sur les données pour la prévision des trajectoires	14
1.4 Analyse critique des modèles et cadre conceptuel	16
1.4.1 Comparaison des avantages et inconvénients	16
1.4.2 Cadre conceptuel pour évaluer les besoins actuels	18
1.5 Problématique et objectifs de recherche	19
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	21
2.1 Architecture de l’environnement de simulation	21
2.1.1 Modélisation 3D de l’aéroport dans Unreal Engine 5	21
2.1.2 Modèles d’aéronefs	23
2.2 Acquisition, traitement et rejeu des données ADS-B	24
2.3 Routage sur le <i>line graph</i> et planification multi-aéronefs	26
2.3.1 Construction du graphe nodal de CYUL	26
2.3.2 Identification des portes d’embarquement et des pistes	27
2.3.3 Implémentation du <i>line graph</i> et intégration des contraintes opérationnelles	29
2.3.4 Algorithme A*	30
2.3.5 Algorithme WHCA* pour la gestion multi-aéronefs	31
2.4 Génération de trafic contrôlable	34
2.4.1 Fichier de planification défini par l’utilisateur	35
2.4.2 Manœuvres modélisées : décollage, atterrissage, refoulement, dégivrage, collisions et points d’attente	38
2.4.3 Génération manuelle d’aéronefs et routage interactif	41
2.5 Modèle de carburant et d’émissions polluantes	41
2.5.1 Correction aux conditions atmosphériques locales : méthode BFFM2	42
2.5.2 Calcul et affichage en temps réel	44
CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION	47
3.1 Validation fonctionnelle du simulateur	47
3.1.1 Validation du simulateur par le rejeu des trajectoires ADS-B	48
3.1.2 Routage d’aéronefs contrôlables dans un scénario simple	49

3.1.3	Réduction de conflit grâce à l'algorithme WHCA*	49
3.1.4	Affichage en temps réel des données de performance	51
3.2	Analyse d'une journée complète sans contrainte (scénario de référence)	53
3.2.1	Distribution spatiale du trafic	53
3.2.2	Temps de roulage total et par aéronef	54
3.2.3	Consommation de carburant et émissions cumulées	56
3.3	Analyse du scénario avec fermeture d'une voie de roulage	57
3.3.1	Identification de la voie critique et justification du choix	58
3.3.2	Redistribution du trafic et nouvelles zones de congestion	58
3.3.3	Impact sur les temps de roulage	59
3.3.4	Impact environnemental de la fermeture	61
3.4	Analyse du scénario avec passage obligatoire au dégivrage (50% des départs)	63
3.4.1	Redistribution spatiale du trafic vers la station de dégivrage	64
3.4.2	Impact sur le temps de roulage et congestion à la station de dégivrage	66
3.4.3	Impact environnemental et concentration à la station de dégivrage	68
3.4.4	Synthèse comparative des trois scénarios	70
3.5	Discussion	72
3.5.1	Apports du simulateur par rapport aux approches existantes	72
3.5.2	Interprétation des résultats algorithmiques	74
3.5.3	Limites et hypothèses simplificatrices	75
	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	79
	LISTE DE RÉFÉRENCES	83

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Principaux paramètres du script de génération du fichier de planification 37
Tableau 2.2	Temps de séparation minimum entre départs et arrivées pour respecter les contraintes liées aux turbulences de sillage (OACI, 2016) 41
Tableau 3.1	Synthèse comparative des indicateurs clés pour les trois scénarios simulés 70

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Schéma modèle DELCAP 8
Figure 1.2	Principe de reconstruction paramétrique d'une trajectoire par AEDT 10
Figure 1.3	Interface graphique SOS2 sur CYUL 11
Figure 1.4	Schéma de l'architecture AATOM et ses différents modules 13
Figure 1.5	Vue d'ensemble du processus de traitement des données topologiques d'un aéroport 15
Figure 1.6	Exemple d'une scène récupérée sur l'aéroport international Liberty de Newark (KEWR) par AmeliaTF 16
Figure 2.1	Vue du dessus de CYUL 22
Figure 2.2	Flotte du simulateur 23
Figure 2.3	Résultats de l'algorithme de map-matching pour une trajectoire sur CYUL 25
Figure 2.4	Graphe nodal de CYUL dans UE5 27
Figure 2.5	Extrait du fichier contenant les portes d'embarquement de CYUL 28
Figure 2.6	Extrait du fichier contenant les points d'entrée et de sorties des pistes de CYUL 29
Figure 2.7	Schéma du principe de création du <i>line graph</i> 30
Figure 2.8	Fichier de planification du trafic contrôlable 36
Figure 2.9	Trajectoire d'un aéronef au départ d'une porte d'embarquement 39
Figure 2.10	Configurations possibles des positions d'attente de la piste 24R dans UE5 40
Figure 3.1	Rejeu dans le simulateur de trajectoires issues de données ADS-B 48
Figure 3.2	Simulation d'un scénario simple impliquant 25 aéronefs contrôlables ... 49
Figure 3.3	Comparaison des stratégies de routage par différents algorithmes 50

Figure 3.4	Données visibles dans l'ATH de la simulation pour chaque aéronef	51
Figure 3.5	Carte de chaleur du trafic au sol de CYUL superposée sur une image satellite de Google Earth.	54
Figure 3.6	Graphique du temps total cumulé d'utilisation des voies de circulation par les aéronefs	55
Figure 3.7	Graphique de l'évolution des polluants cumulés en fonction du temps de simulation	56
Figure 3.8	Carte de chaleur de la consommation de carburant totale après une journée de simulation	57
Figure 3.9	Carte de chaleur du trafic au sol de CYUL pour le scénario avec fermeture de la voie A4	59
Figure 3.10	Graphique du temps total cumulé d'utilisation des voies de circulation et nombre d'aéronefs simultanément en roulage pour le scénario avec fermeture de la voie A4	60
Figure 3.11	Graphique de l'évolution des polluants cumulés en fonction du temps de simulation pour le scénario avec fermeture de la voie A4	62
Figure 3.12	Carte de chaleur de la consommation de carburant pour le scénario avec fermeture de la voie A4	63
Figure 3.13	Carte de chaleur du trafic au sol de CYUL pour le scénario avec passage obligatoire au dégivrage	65
Figure 3.14	Graphique du temps total cumulé d'utilisation des voies de circulation pour le scénario avec dégivrage	66
Figure 3.15	Graphique de l'évolution des polluants cumulés en fonction du temps de simulation pour le scénario avec dégivrage	68
Figure 3.16	Carte de chaleur de la consommation de carburant pour le scénario avec dégivrage	69

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACD	Base de données des caractéristiques des aéronefs
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast
AATOM	Agent-based Airport Terminal Operations Model
AEDT	Aviation Environmental Design Tool
ATH	Affichage Tête Haute
BFFM2	Boeing Fuel Flow Method 2
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
CYUL	Aéroport International Montréal-Trudeau
DELCAP	DELaY CAPacity
EEDB	Base de données sur les émissions des moteurs d'aéronef
EI	Indice d'émission
FAA	Administration Fédérale de l'Aviation
FCFS	First-Come-First-Served
ISA	Atmosphère Standard Internationale
LARCASE	Laboratoire de recherche en commande active, avionique et aéroserveoélasticité
METAR	Rapport d'observation météorologique
NO _x	Oxydes d'azote
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
OSM	OpenStreetMap
NAS	Réseau National d'Aéroports
SCO	Security Checkpoint Optimizer
SOS2	Surface Operations Simulator and Scheduler
UE5	Unreal Engine 5

XVIII

UHC	Hydrocarbures imbrûlés
WHCA*	Windowed Hierarchical Cooperative A*

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

$f(n)$	Coût total du chemin passant par le nœud n
F_{TOT}	Consommation totale de carburant à l'instant t
$g(n)$	Coût réel du nœud de départ jusqu'au nœud n
$h(n)$	Estimation heuristique du coût restant du nœud n au nœud d'arrivée
M	Nombre de Mach
N_{eng}	Nombre de moteurs
P_{ISA}	Pression en atmosphère standard internationale
P_{METAR}	Pression de l'aéroport
P_{SAT}	Pression de vapeur saturante
HR	Humidité relative de l'air
T_{ISA}	Température en atmosphère standard internationale
T_{METAR}	Température de l'aéroport
W_F	Débit de carburant ajusté aux conditions locales de CYUL
x, y	Paramètres de correction
δ	Rapport de pression
θ	Rapport de température
ω	Facteur d'humidité spécifique

INTRODUCTION

La croissance perpétuelle du trafic aérien met sous pression les aéroports, qui doivent gérer un nombre record d'aéronefs et de passagers. Si les opérations en vol apparaissent immédiatement comme le principal levier d'amélioration opérationnelle, les défis se jouent aussi, de plus en plus, au sol. Les opérations au sol regroupent toutes les manœuvres réalisées par un aéronef entre la piste et la porte d'embarquement (roulage, attente, refoulement, parking). Un temps de roulage prolongé augmente l'usure des moteurs et la pollution sonore, tout en compliquant les activités des opérateurs au sol, ce qui nuit directement à l'efficacité globale des aéroports. Malgré leur courte durée, l'optimisation des opérations au sol est donc essentielle pour améliorer l'efficacité, la sécurité et la durabilité du transport aérien.

Pour répondre à ces problématiques, les modèles de simulation agissent comme des outils de prévision et d'analyse du comportement des aéronefs. Les simulateurs événementiels et paramétriques, comme le modèle DELay CAPacity (DELCAP) (Gilsinn, 1976) ont établi les bases de l'analyse de la capacité aéroportuaire. Ensuite, les outils d'optimisation des opérations au sol, tel que le Surface Operations Simulator and Scheduler (*SOS2*) de Wood, Kistler, Rathinam & Jung (2009), ont démontré leur capacité à réduire les retards de roulage grâce à des représentations en graphe nodal. Les modèles multi-agents, quant à eux, ont permis de modéliser les flux de passagers dans les terminaux (Janssen, Sharpanskykh, Curran & Langendoen, 2019). Plus récemment, des approches axées sur les données comme le modèle AmeliaTF de Navarro *et al.* (2024) ont montré qu'il était possible de prédire les trajectoires au sol des aéronefs à partir de données historiques. Des travaux antérieurs menés au Laboratoire de recherche en commande active, avionique et aéroserveoélasticité (LARCASE) ont également porté sur l'optimisation des trajectoires (Durand, Ghazi & Botez, 2024a; Szymanski, Ghazi & Botez, 2023a; Watteau, Ghazi & Botez, 2024) ainsi que sur la prédiction de trajectoires (Ghazi, Botez & Maniette, 2020). Cependant, toutes ces méthodes traitent chacune un aspect isolé de la simulation des opérations au sol. Peu d'entre elles offrent un modèle complet et réaliste capable de combiner

le rejeu de trajectoires, un routage adaptatif aux contraintes de l'aéroport, les interactions entre aéronefs et l'analyse environnementale. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce mémoire, réalisé au LARCASE de l'École de technologie supérieure (ÉTS). L'objectif principal du mémoire est de développer une plateforme de simulation numérique de l'aéroport international Montréal-Trudeau (CYUL), géoréférencée et à échelle réelle.

Pour atteindre cet objectif, le modèle de simulation de CYUL a été implémenté en C++ dans le moteur Unreal Engine 5 (UE5). Grâce à des données de trajectoires issues de l'Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) et d'OpenSky Network (Schäfer, Strohmeier, Lenders, Martinovic & Wilhelm, 2014), le simulateur peut reconstruire et rejouer des scénarios réels des déplacements des aéronefs d'une journée donnée à CYUL. Des aéronefs contrôlables peuvent également être générés par l'utilisateur et se déplacer sur la surface de l'aéroport à l'aide d'un *line graph* représentant le réseau de voies de circulation et d'un algorithme Windowed Hierarchical Cooperative A* (WHCA*) (Bnaya & Felner, 2014; Silver, 2005). Le *line graph* intègre les contraintes opérationnelles telles que le sens de circulation, les limitations de virage, les points d'arrêt et les zones de dégivrage. Enfin, le modèle de simulation calcule et affiche en temps réel la consommation de carburant et les émissions d'oxyde de carbone (CO), oxydes d'azote (NO_x), hydrocarbures imbrûlés (UHC) et dioxyde de carbone (CO₂) de chaque aéronef. Cette intégration de fonctionnalités variées au sein d'un même environnement fait de cette plateforme de simulation un outil d'analyse et d'aide à la décision pour la gestion des opérations au sol.

Ce mémoire de maîtrise est organisé en trois chapitres. Le premier propose la revue de la littérature des modèles existants de simulation du déplacement des aéronefs au sol. Ce chapitre justifie la nécessité de développer un nouveau simulateur plus intégré que les approches existantes en identifiant les principales contributions et limites des études précédentes. Il établit la problématique et les objectifs de recherche. Le deuxième chapitre présente la méthodologie

retenue pour le développement du simulateur, en détaillant dans l'ordre l'architecture de l'environnement 3D, le traitement des données ADS-B, la génération de trafic contrôlable, le routage coopératif et le modèle de calcul de consommation de carburant et d'émissions. Enfin, le dernier chapitre expose les résultats obtenus, discute des performances du simulateur au regard des travaux antérieurs, et présente les limites actuelles et perspectives du mémoire.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue de la littérature des différentes approches de simulation utilisées pour reproduire les opérations au sol dans le domaine aéroportuaire. Les modèles de simulation aéroportuaires de base sont d'abord présentés, en distinguant les méthodes événementielles et paramétriques des méthodes d'optimisation au sol. Les techniques plus récentes de simulation comportementale et prédictive sont ensuite abordées, notamment la modélisation multi-agents et les approches axées sur les données. Une analyse critique des avantages et des limites de chaque approche permet finalement de faire ressortir les besoins non couverts par les modèles existants et de définir la problématique ainsi que les objectifs de recherche poursuivis dans ce mémoire.

1.1 Mise en contexte

Le transport aérien est l'un des secteurs dont la croissance est la plus soutenue aujourd'hui. Selon l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), le trafic aérien mondial a retrouvé son niveau d'avant-pandémie depuis 2024, soit 4,5 milliards de passagers par an, et devrait doubler dans les prochaines décennies avec une croissance annuelle moyenne de 3,4% jusqu'en 2050 (OACI, 2025). Cette croissance exerce une pression constante sur les aéroports, qui doivent gérer un volume d'opérations toujours plus grand alors que leurs infrastructures, comme la surface au sol disponible, n'augmentent pas au même rythme. Dans ce contexte, l'efficacité des opérations au sol est devenue un enjeu majeur de la gestion aéroportuaire d'aujourd'hui.

Les opérations au sol représentent l'ensemble des manœuvres effectuées par un aéronef entre la piste et la porte d'embarquement, soit le roulage, l'attente, le refoulement et le stationnement. Bien que courtes en durée par rapport au vol lui-même, elles représentent une part non négligeable de l'empreinte environnementale et économique du transport aérien. En effet, lors de phases de roulage prolongées, les moteurs fonctionnent à faible puissance, un régime pour lequel ils sont peu optimisés. Ils gaspillent alors du carburant tout en relâchant du monoxyde de carbone (CO), des oxydes d'azote (NO_x) et des hydrocarbures imbrûlés (UHC) dans l'atmosphère.

Ces émissions sont proportionnellement plus élevées que celles observées en vol de croisière (Nikoleris, Gupta & Kistler, 2011) et elles contribuent à la dégradation de la qualité de l'air aux abords des terminaux, affectant autant les riverains que le personnel au sol. Quant à la consommation de carburant, les opérations au sol peuvent représenter jusqu'à 6% de la consommation totale d'un vol court-courrier (Zhang, Huang, Liu & Li, 2019). À l'échelle d'un aéroport international, ce pourcentage se traduit par des milliers de tonnes de carburant consommées annuellement.

Aux enjeux environnementaux s'ajoutent des enjeux opérationnels majeurs. Les retards de départ sont une source directe de temps supplémentaire passé au sol. Selon Transport Canada (2024), 33,4% des vols au Canada ont été retardés de plus de quinze minutes en 2023, ce qui compromet la ponctualité des vols suivants, l'occupation des portes d'embarquement et la satisfaction des passagers. C'est notamment le cas de l'aéroport international Montréal-Trudeau (CYUL), qui accueille plus de 22 millions de passagers annuellement et dont la topologie du réseau de voies de circulation génère des situations de congestion récurrentes (Aéroport de Montréal, 2025). À ces contraintes structurelles s'ajoutent les conditions météorologiques hivernales propres à Montréal, qui réduisent la capacité opérationnelle des voies de circulation et allongent les temps de roulage.

Face à ces enjeux, la simulation numérique s'impose comme un outil essentiel à l'analyse, la compréhension et l'optimisation des opérations au sol. Il est en effet impossible de tester directement de nouvelles stratégies de routage sur un aéroport en activité, en raison des risques pour la sécurité, des coûts élevés et de l'impossibilité de reproduire des conditions de trafic spécifiques de façon contrôlée. La simulation permet au contraire de recréer un environnement virtuel fidèle à la réalité, d'y rejouer des journées passées, de tester des scénarios de perturbation opérationnelle et d'évaluer l'impact de décisions opérationnelles sans avoir à interrompre les activités réelles (Wu & Mengersen, 2013). Elle constitue ainsi un outil d'aide à la décision innovant pour les gestionnaires d'aéroports, les contrôleurs aériens et les compagnies aériennes qui cherchent à améliorer l'efficacité, la sécurité et la durabilité de leurs opérations au sol. C'est dans ce contexte que s'inscrit la revue de la littérature suivante, dont l'objectif est d'analyser

les approches de simulation existantes, d'en dégager leurs contributions respectives, puis d'en identifier les limites afin de positionner la contribution du présent mémoire.

1.2 Simulation et modélisation aéroportuaires de base

Les premières approches de simulation aéroportuaire reposent sur deux méthodes fondamentales. Dans un premier temps, les modèles événementiels et paramétriques permettent de représenter les phases critiques de vol et d'évaluer la capacité et les retards des aéronefs à l'échelle d'un aéroport. Ensuite, les modèles d'optimisation des opérations au sol visent à améliorer le routage des aéronefs sur les voies de circulation afin de réduire les temps de roulage. Cette première partie présente les deux approches et leurs limites.

1.2.1 Approches événementielles et paramétriques

On distingue historiquement deux méthodes fondamentales pour simuler le déplacement des aéronefs : l'approche événementielle et l'approche paramétrique. Ces deux méthodes partagent un même objectif qui est de réduire la complexité des données de trajectoire réelles pour rendre leur traitement possible à l'échelle d'un aéroport complet, mais elles y parviennent de façon différente.

L'approche événementielle consiste à simuler le système dans le temps en avançant d'un événement critique à un autre, plutôt que par incréments de temps fixes. Cette simplification est nécessaire car le volume de données de trajectoires complètes est trop important pour être traité point par point. Les aéronefs passent ainsi des événements « entrée en approche », « passage par un marqueur extérieur », « décollage » et « atterrissage » les uns par rapport aux autres, ce qui permet d'intégrer les interactions qu'ils ont entre eux sans avoir à modéliser l'ensemble de leur trajectoire, tel que représenté en Figure 1.1 (Gilsinn, 1976; Wu & Mengersen, 2013).

Un modèle événementiel comme DELay CAPacity (DELCAP) illustre cette logique car il permet d'évaluer la capacité (nombre d'opérations par heure) et les retards dans les aéroports en modélisant ces interactions lors des phases critiques de vol (de Neufville, Odoni,

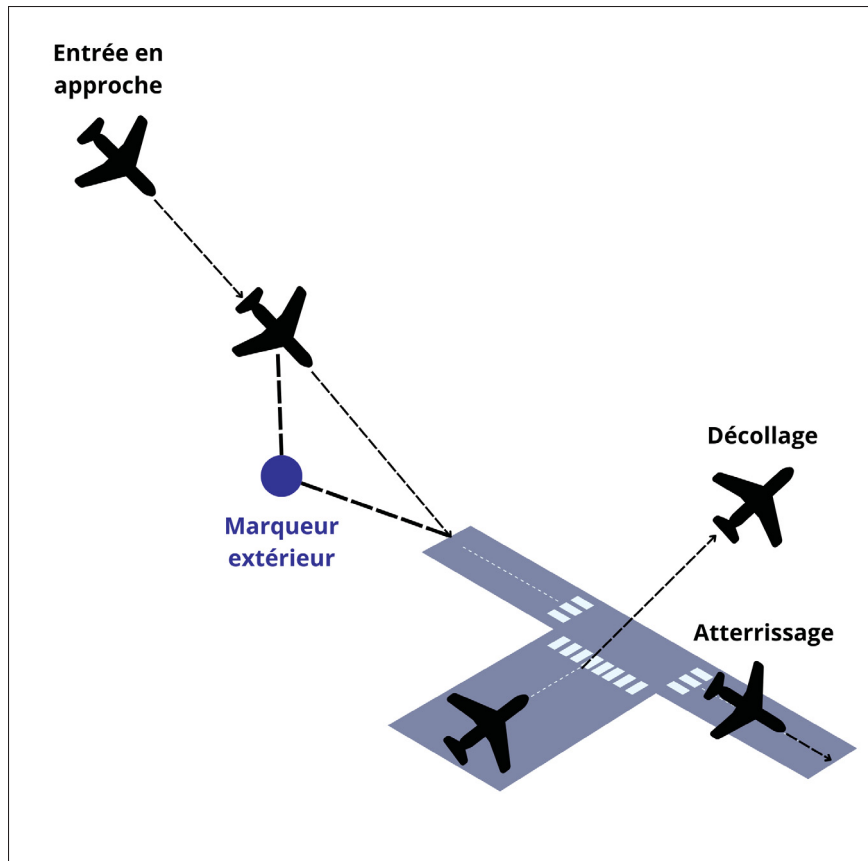


Figure 1.1 Schéma de la zone du terminal comme vu par DELCAP

Belobaba & Reynolds, 2013; Gilsinn, 1976). Il s'agit de l'une des premières approches employées pour simuler le déplacement des aéronefs au sol.

La validation de ce type de modèle repose sur la comparaison des performances simulées à des performances observées en conditions réelles sur de grands aéroports. Les estimations de capacité aéroportuaire du modèle DELCAP diffèrent ainsi de moins de 10% par rapport aux données de la Federal Aviation Administration (FAA), pour un temps de calcul de moins de quinze secondes sur une journée complète d'opérations (Gilsinn, 1976). Les modèles à approche événementielle sont donc rapides à exécuter, avec une précision acceptable pour planifier les opérations aériennes dans la zone terminale. Cependant, ils présentent deux limites majeures pour les besoins de ce mémoire. Ils n'intègrent pas directement les mouvements sur les voies de

circulation, les opérations au sol ou les processus dans les terminaux. L'approche par événements critiques ne vise pas à reproduire fidèlement les routes suivies par les aéronefs, mais impose plutôt des délais fondés sur des règles de séparation et d'occupation des pistes.

L'approche paramétrique répond en partie à ces limites en s'attaquant directement à la complexité des données de trajectoire au décollage, à l'atterrissage et, potentiellement, en croisière. Plutôt que de conserver l'intégralité des données brutes, cette méthode les convertit en un nombre réduit de paramètres exploitables sous forme de séries temporelles. Cette réduction contribue à simplifier les analyses environnementales (consommation de carburant, émissions, bruit) et fournit une base théorique commune sur laquelle s'appuyer pour comparer d'autres modèles entre eux (Behere & Mavris, 2023; de Neufville *et al.*, 2013). Cette approche est notamment mise en œuvre dans l'Aviation Environmental Design Tool (AEDT), un outil de simulation qui reconstruit la trajectoire d'un aéronef à partir de ses paramètres d'entrée au décollage : son poids, sa poussée, l'altitude à laquelle il accélère et la part d'énergie allouée à cette accélération (Behere & Mavris, 2023). Les simulations portant sur de larges ensembles de vol sont ainsi facilitées, puisque le volume de données à traiter est considérablement réduit. Comme l'illustre schématiquement la Figure 1.2, une représentation paramétrique peut être assignée à toute trajectoire réelle par le simulateur, en minimisant l'écart entre la trajectoire observée et sa reconstruction.

La méthode de Behere & Mavris (2023) repose sur l'exploitation de données issues de capteurs de l'Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B), un système de surveillance qui transmet en continu la position des aéronefs. La précision du modèle paramétrique dépend donc fortement de la qualité de ces données sources. Lorsque l'aéronef sur lequel le simulateur est testé ne suit pas une trajectoire de décollage « classique » (par exemple lorsqu'il manque la distance parcourue au sol avant le décollage, ou lorsque l'aéronef passe par des segments de stabilisation en palier lors de sa montée), le taux d'erreur du modèle varie entre 29% et 39% (Behere & Mavris, 2023). L'approche paramétrique fonctionne donc bien pour des trajectoires simples, mais perd en précision dès que les trajectoires se complexifient. De plus, comme

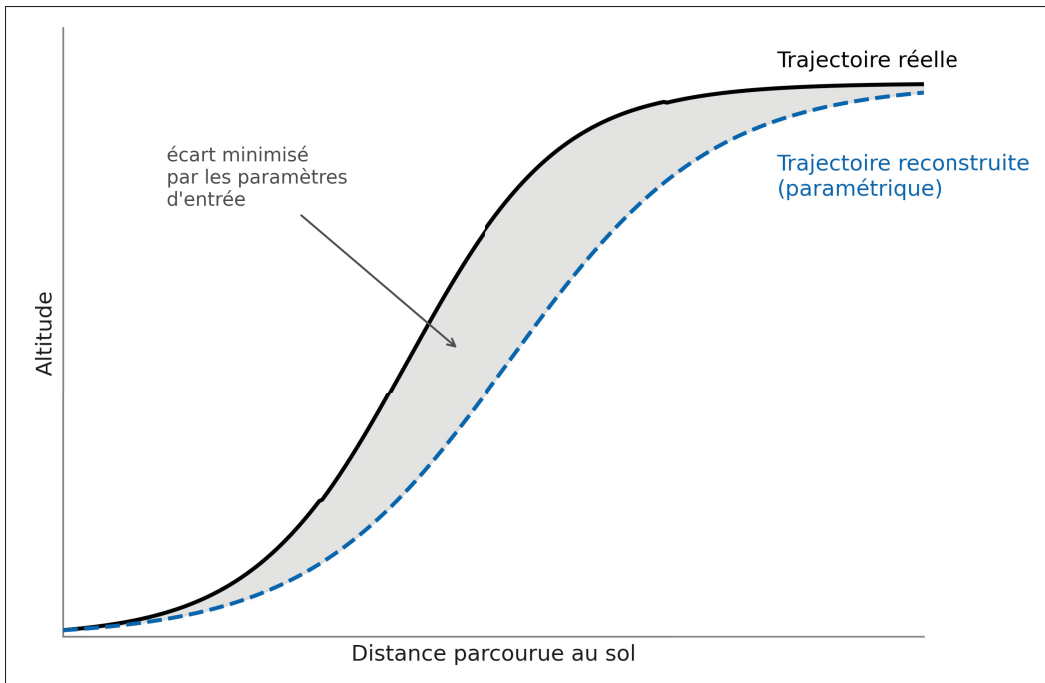


Figure 1.2 Principe de reconstruction paramétrique d'une trajectoire par AEDT

l'approche événementielle, elle ne permet pas de représenter les interactions entre plusieurs aéronefs évoluant simultanément au sol.

En somme, les modèles événementiels et paramétriques offrent des solutions efficaces et validées pour modéliser les phases critiques du vol, mais ils se limitent à ces seules phases. Ni l'un ni l'autre ne permet de couvrir les interactions dynamiques qui se produisent sur les voies de circulation, ni d'intégrer les décisions prises en temps réel par les contrôleurs aériens.

1.2.2 Optimisation des opérations au sol

Pour pallier ces limitations, Wood *et al.* (2009) ont développé le Surface Operations Simulator and Scheduler (SOS2), conçu spécifiquement pour tester des algorithmes d'optimisation des opérations au sol. Son principe de base est le First-Come-First-Served (FCFS) : le simulateur traite les aéronefs et les passagers dans leur ordre d'arrivée. À cette règle simple s'ajoutent des modules de programmation dynamique qui permettent d'ordonner le séquençement des

aéronefs pendant leur déplacement sur les voies de circulation, à l’atterrissage ou au décollage (de Neufville *et al.*, 2013; Wood *et al.*, 2009).

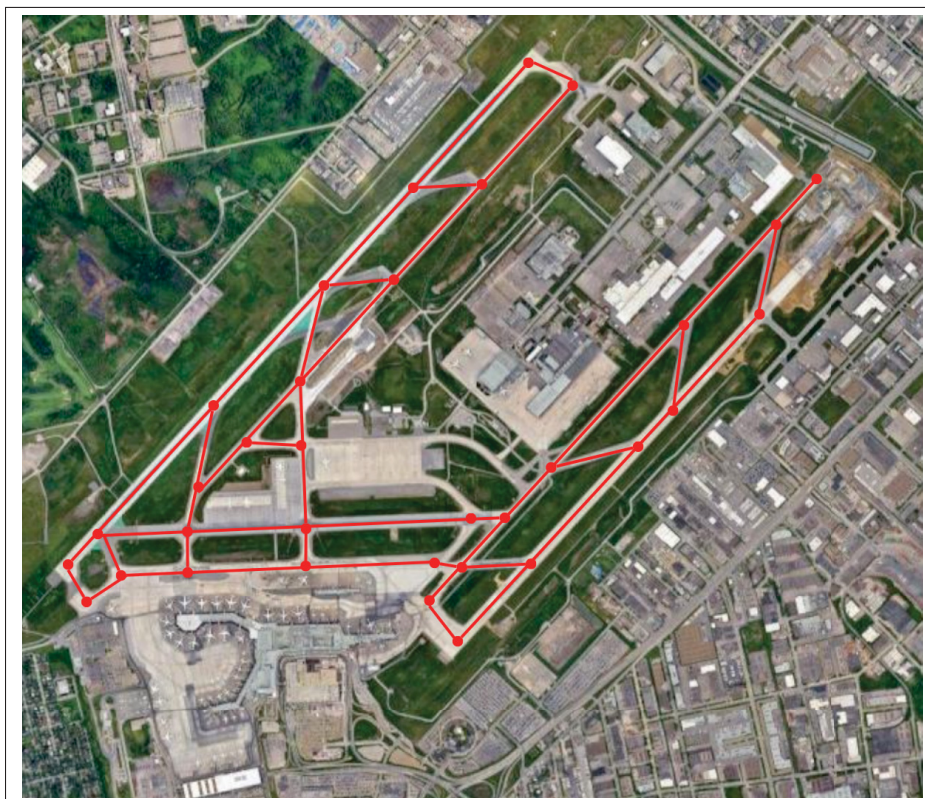


Figure 1.3 Exemple de la structure de l’interface graphique SOS2 à CYUL, superposée sur une image satellite du service de cartographie Google Earth.

Pour représenter la topologie de l’aéroport, le modèle utilise un système de graphe nodal. Les intersections et les segments de voies de circulation sont modélisés respectivement comme des nœuds (des points) et des segments (des droites), ainsi que le montre la Figure 1.3, où cette structure est superposée à une image satellite. Cette représentation en graphe simplifie l’application future d’algorithmes de routage, puisqu’elle repose sur une structure standard pour laquelle de nombreuses méthodes de résolution existent déjà. Grâce à ces différents ajouts, le simulateur parvient à réduire significativement les retards de roulage au sol, avec une diminution pouvant atteindre 33% pour les configurations opérationnelles les plus simples. Son architecture

modulaire permet de changer de stratégie de planification sans devoir modifier la structure du simulateur (Wood *et al.*, 2009).

SOS2 constitue donc un modèle compétent pour l'optimisation des opérations au sol. Il présente néanmoins des écarts persistants avec les données réelles, car il n'intègre ni les contraintes utilisées par les contrôleurs aériens, ni les interactions complexes entre aéronefs, comme les conflits de trajectoire. De plus, le simulateur n'a été testé que sur l'aéroport de Dallas, son efficacité resterait à démontrer dans des environnements aux topologies différentes.

1.3 Techniques avancées de simulation comportementale et prédictive

Les approches événementielles, paramétriques et d'optimisation restent donc limitées dans leur capacité à représenter les comportements individuels des aéronefs et à anticiper les trajectoires dans des environnements complexes. Les méthodes suivantes permettent de dépasser ces limitations. La première méthode est la modélisation multi-agents, qui simule les interactions entre aéronefs. La deuxième méthode est la modélisation axée sur les données, exploitant l'apprentissage automatique pour prévoir des trajectoires à partir de grandes bases de données historiques.

1.3.1 Modélisation multi-agents et interactions dans les terminaux

Dans la perspective de modéliser le plus fidèlement possible les interactions dans les terminaux aéroportuaires entre passagers, agents de sécurité et personnel opérationnel, des modèles multi-agents ont été développés. Dans ces modèles, chaque agent est un individu doté d'un comportement propre, capable d'interagir avec les autres agents et avec son environnement pour faire émerger un comportement collectif. On distingue généralement deux types d'agents dans la zone du terminal d'un aéroport : à l'intérieur, les passagers, caractérisés par exemple par un vol assigné ou des bagages, et les opérateurs, qui gèrent les opérations du terminal ; à l'extérieur, les aéronefs et les équipements de soutien au sol peuvent également être représentés comme des agents.

Les modèles multi-agents, comme le simulateur Agent-based Airport Terminal Operations Model (AATOM) présenté par Janssen *et al.* (2019), reposent sur une architecture en trois couches : opérationnelle, tactique et stratégique, comme visible en Figure 1.4. Cette architecture permet de simuler des activités telles que l'enregistrement, la sécurité et l'embarquement. Dans la couche opérationnelle, l'agent perçoit son environnement et se déplace ou communique immédiatement via les modules de perception et d'action. Dans la couche tactique, l'agent intègre ses observations pour planifier ses déplacements à court terme. Finalement, dans la couche stratégique, l'agent définit des objectifs à long terme via les modules d'objectif et de planification (Janssen *et al.*, 2019). Grâce à ce calibrage approfondi des réactions individuelles, effectué à partir de données réelles de contrôle de sécurité et d'enregistrement, le simulateur est capable de modéliser des comportements humains et de générer des visualisations de scénarios.

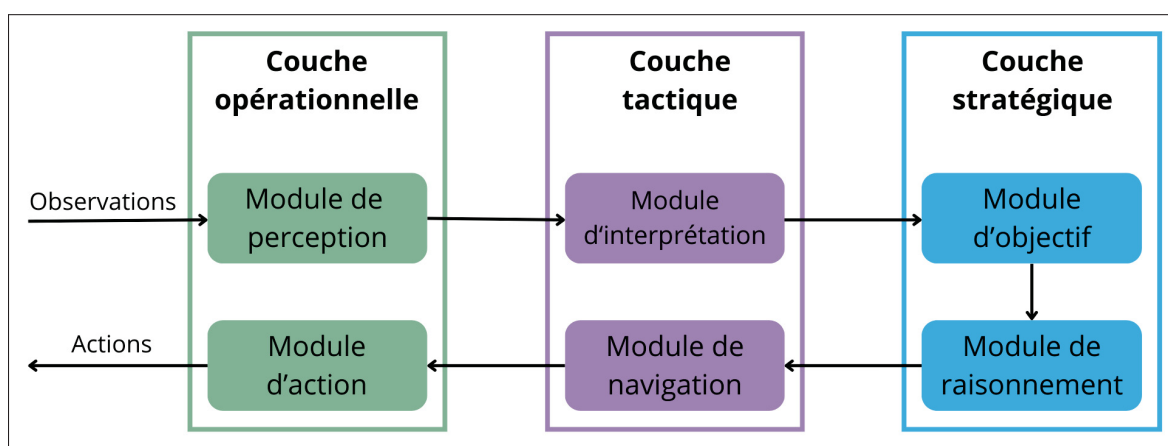


Figure 1.4 Schéma de l'architecture AATOM et ses différents modules

D'autres simulateurs adoptent une approche différente pour représenter ces mêmes environnements. Le Security Checkpoint Optimizer (SCO), développé par Wilson, Roe & So (2006), repose sur une simulation à événements discrets et spatialement explicite. Plutôt que de faire progresser le temps par incréments fixes, le simulateur avance d'un événement à l'autre (arrivée d'un passager, fin d'un contrôle, dépôt d'un bagage), ce qui le distingue de l'architecture à trois couches d'AATOM. Les passagers y sont représentés comme des entités qui se déplacent le long de trajets prédéfinis ou à travers des zones ouvertes, et qui exécutent des activités telles que le

dépôt des bagages ou le passage au détecteur de métaux. Cette approche, moins riche sur le plan comportemental que celle d'AATOM, permet de tester rapidement différentes configurations d'équipement, comme le nombre de voies de contrôle, ainsi que différentes procédures de sécurité, telles que l'augmentation des fouilles aléatoires ou la modification de la liste des objets interdits (Wilson *et al.*, 2006).

Cependant, la mise en place et l'étalonnage du comportement des agents demandent un travail important de collecte de données et de validation. Les modèles multi-agents se concentrent sur la gestion des flux de passagers et des opérateurs. Ils ne modélisent pas les mouvements des aéronefs sur la piste (Janssen *et al.*, 2019; Wu & Mengersen, 2013). Un simulateur multi-agents, comme le modèle AATOM, pourrait permettre de compléter les modèles précédents uniquement axés sur les opérations aériennes.

1.3.2 Approches axées sur les données pour la prévision des trajectoires

Face aux défis liés à la modélisation du déplacement des aéronefs, des approches centrées sur les données se sont récemment développées. Ces modèles utilisent l'apprentissage automatique pour produire des prévisions de trajectoires. Un exemple de simulateur axé sur les données est présenté par Navarro *et al.* (2024). Leur modèle AmeliaTF se base sur un grand ensemble de données, le dataset Amelia-48, récolté sur 48 aéroports du Réseau National d'Aéroports (NAS) pendant un an. Il collecte des informations diversifiées sur les trajectoires des aéronefs au sol afin de prédire leurs déplacements futurs en tenant compte de leur historique, des interactions multi-agents et de la topologie de l'aéroport ; soit la combinaison des principaux aspects évoqués dans la revue jusqu'ici (Behere & Mavris, 2023; Navarro *et al.*, 2024). Cette base de données permet de pallier la rareté des ensembles de données dans le cadre de la modélisation des déplacements aéroportuaires, problème évoqué comme récurrent dans la littérature (de Neufville *et al.*, 2013). Pour représenter la topologie de l'aéroport, le simulateur AmeliaTF utilise un système de graphe nodal similaire à celui utilisé pour SOS2. Il récupère une base de données géographiques sur OpenStreetMap (OSM), un logiciel à code source ouvert, afin de modéliser un des 48 aéroports. Le processus de traitement des données topologiques est présenté en Figure

1.5. Le modèle combine le traitement de séquences et l'apprentissage automatique pour produire des prévisions même dans des contextes complexes, sur plusieurs aéroports différents, ce qui était une limite des modèles paramétriques. Ces prévisions peuvent être utilisées pour la gestion des retards, la planification des départs et une estimation des émissions. Un exemple d'une de ces prévisions est visible en Figure 1.6. Sur cette scène, différents avions effectuent diverses manœuvres comme l'atterrissage, le roulage et la sortie de piste. Sur la figure, on distingue les prédictions faites par AmeliaTF pour chaque agent (en vert), par rapport à leur historique (en rouge) et aux informations géographiques (Navarro *et al.*, 2024).

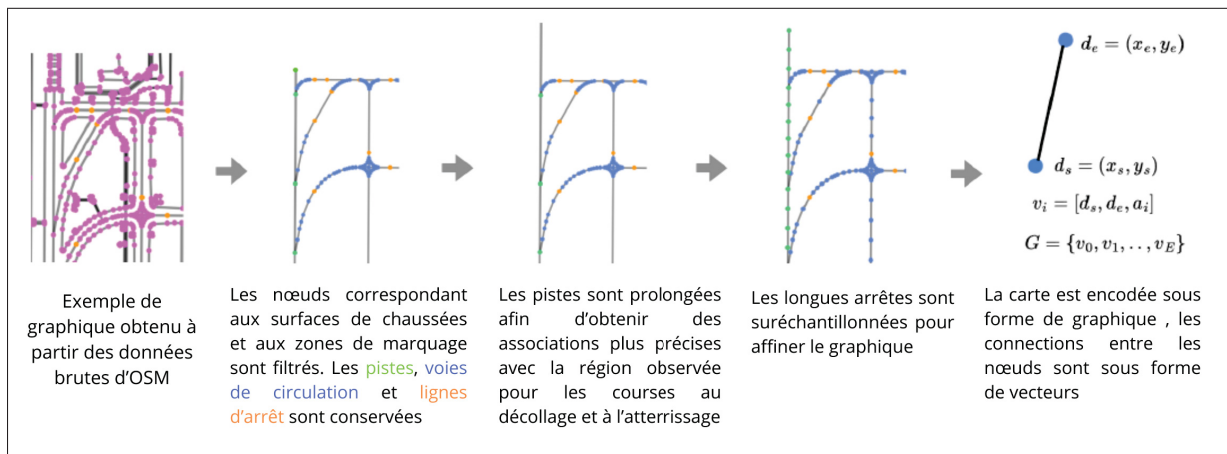


Figure 1.5 Vue d'ensemble du processus de traitement des données topologiques d'un aéroport

Traduit de (Navarro *et al.*, 2024, p. 6)

Les modèles axés sur les données seraient donc utilisables pour des applications multiples ; cependant, ils requièrent des ressources élevées et se focalisent sur la prédiction de trajectoires sans traiter directement de l'optimisation du séquençement. De plus, c'est une technologie relativement nouvelle qui n'a pas encore été validée en situation réelle. Ce genre de simulateur apporte néanmoins une complémentarité intéressante à des approches plus concrètes et validées comme les simulateurs AEDT, AATOM ou SOS2 (Behere & Mavris, 2023; Janssen *et al.*, 2019; Navarro *et al.*, 2024).

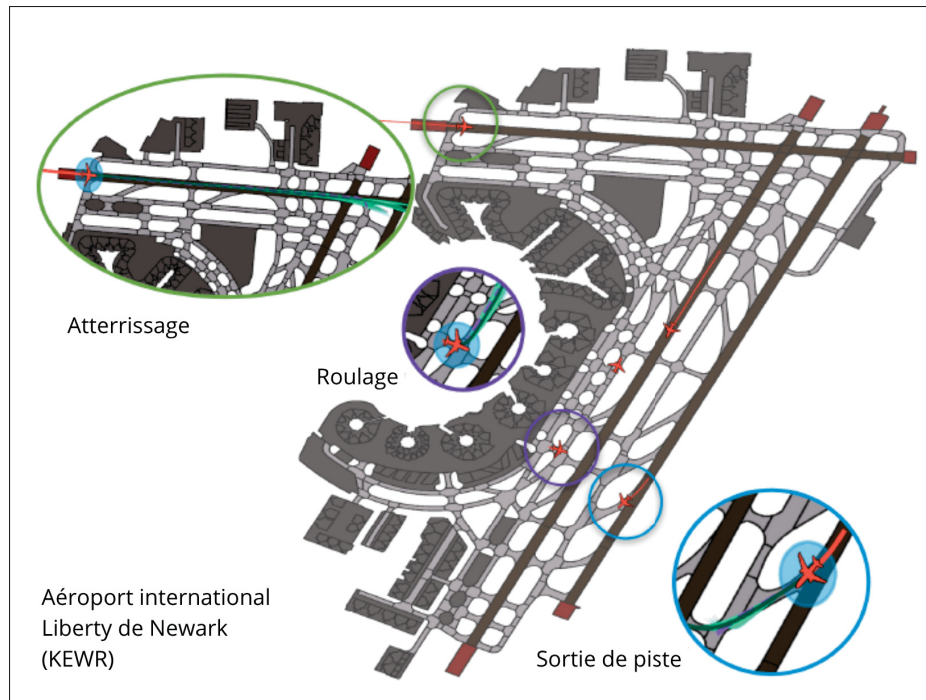


Figure 1.6 Exemple d'une scène récupérée sur l'aéroport international Liberty de Newark (KEWR) par AmeliaTF

Traduit de (Navarro *et al.*, 2024, p. 2)

1.4 Analyse critique des modèles et cadre conceptuel

Les approches présentées dans les sections précédentes offrent des contributions complémentaires, mais aucune ne couvre à elle seule l'ensemble des dimensions opérationnelles d'un aéroport. Une analyse comparative de leurs forces et limites respectives permet d'identifier les besoins non couverts et de définir le cadre conceptuel qui oriente le développement du simulateur proposé dans ce travail.

1.4.1 Comparaison des avantages et inconvénients

Les différents travaux présentés jusqu'ici partagent un même objectif, soit reproduire fidèlement le comportement des aéronefs, mais chacun aborde ce problème sous un angle différent, ce qui explique en grande partie leurs limites respectives. Les modèles événementiels et paramétriques,

tels que DELCAP (Gilsinn, 1976) et AEDT (Behere & Mavris, 2023), se distinguent par leur validation rigoureuse et leur rapidité d'exécution, deux qualités qui en ont fait des standards de l'industrie pour l'estimation de capacité et l'analyse environnementale à l'échelle d'une flotte. Cette performance a toutefois un prix car en réduisant les trajectoires à des séquences d'événements ou à des paramètres regroupés, ces modèles perdent le niveau de détail nécessaire pour représenter les interactions dynamiques entre aéronefs sur les voies de circulation.

Les outils d'optimisation comme SOS2 (Wood *et al.*, 2009) comblent une partie de ce manque en s'attaquant directement au séquençement du roulage grâce à une représentation en graphe nodal, ce qui leur permet de réduire les retards mesurés. Or, cette spécialisation sur les séquences de roulage se fait au détriment des dimensions traitées par les autres modèles car les processus dans les terminaux, les contraintes réelles des contrôleurs aériens et les conflits de trajectoire ne sont pas représentés. Les simulateurs multi-agents comme AATOM (Janssen *et al.*, 2019) comblent à leur tour une partie de ce manque, mais du côté opposé car ils excellent à modéliser les comportements humains et les flux de passagers dans les terminaux, sans toutefois s'intéresser aux opérations sur piste. Chaque famille de modèles semble ainsi combler la limite de la précédente tout en introduisant la sienne, la recherche se divise plutôt qu'elle ne converge vers une solution unique.

Les modèles axés sur les données, comme AmeliaTF (Navarro *et al.*, 2024), abordent le problème autrement. Plutôt que de combiner plusieurs approches, ils exploitent de larges ensembles de données pour apprendre les interactions entre aéronefs et la topologie de l'aéroport, ce qui leur permet de généraliser à plusieurs aéroports. Cette approche reste toutefois coûteuse en ressources de calcul et se limite à la prédiction de trajectoires, sans offrir de mécanisme d'optimisation ou de contrôle en temps réel. Ainsi, si chaque approche répond efficacement à un besoin particulier, aucune ne combine à la fois validation empirique, modélisation détaillée des interactions au sol et capacité de généralisation, ce qui constitue le principal constat de cette revue de la littérature.

1.4.2 Cadre conceptuel pour évaluer les besoins actuels

Afin de structurer objectivement les perspectives de recherche issues de cette comparaison, le cadre d'évaluation retenu s'appuie sur les travaux de Wu & Mengersen (2013). Leur revue analyse plusieurs simulateurs existants à travers des scénarios d'utilisation et des critères de performance liés à la planification, l'exploitation et la sécurité (de Neufville *et al.*, 2013; Wu & Mengersen, 2013). Les auteurs en dégagent trois critères principaux auxquels un simulateur doit répondre pour couvrir les besoins actuels des aéroports, et ces trois critères permettent de reformuler les limites identifiées à la section précédente sous une forme plus opérationnelle.

Premièrement, un simulateur doit être capable de reproduire les trajectoires et les retards des aéronefs tout en intégrant des processus décisionnels fondés sur des critères de performance, comme la congestion, le temps d'attente ou la satisfaction des passagers. Or, comme le montre la section 1.4.1, les simulateurs existants se concentrent chacun sur une seule de ces dimensions plutôt que sur leur ensemble.

Deuxièmement, Wu & Mengersen (2013) insistent sur la nécessité de combiner les approches événementielles, paramétriques, optimisatrices et multi-agents afin de capturer l'ensemble des interactions au sein de l'aéroport. Ce critère rejoint directement le constat établi précédemment. DELCAP fournit une validation empirique des opérations aériennes et SOS2 optimise les séquences de roulage, mais ces modèles restent incomplets sans la dimension comportementale d'AATOM, ni la capacité de généralisation d'AmeliaTF. Aucun travail recensé ne réunit ces quatre dimensions au sein d'un même environnement.

Troisièmement, les auteurs soulignent l'importance de tester les modèles sur des aéroports aux topologies variées. La majorité des simulateurs présentés dans ce chapitre ont été développés et validés pour un seul cas d'étude, à l'exception d'AmeliaTF, qui a été validé sur plusieurs aéroports grâce à son approche axée sur les données. Ce critère oriente la conception du simulateur proposé vers une architecture suffisamment générique pour être potentiellement transposable à d'autres aéroports, bien que la validation initiale de ce travail se porte spécifiquement sur le cas de CYUL.

Pris ensemble, ces trois critères confirment qu’aucun des simulateurs recensés ne répond simultanément aux besoins de fidélité des trajectoires, d’intégration des interactions au sol et de généralisation à différentes topologies aéroportuaires. C’est ce constat qui motive directement la problématique et les objectifs de recherche présentés dans la section suivante.

1.5 Problématique et objectifs de recherche

Aucun simulateur existant n’intègre l’ensemble des interactions au sol au sein d’un même environnement. Ce constat soulève la problématique suivante : comment développer un environnement de simulation intégré et géoréférencé capable de reproduire fidèlement les opérations au sol d’un aéroport, en combinant le rejeu de trajectoires historiques, le routage coopératif d’aéronefs contrôlables et l’estimation en temps réel des performances environnementales, afin de constituer un outil d’analyse et d’aide à la décision ?

Pour répondre à la problématique, l’objectif principal de ce mémoire est de développer un nouveau simulateur, plus intégré, qui combinerait les atouts des modèles existants et qui servirait à une première validation du modèle de simulation. Ce travail peut être décomposé en cinq sous-objectifs :

1. Modéliser fidèlement l’environnement 3D de l’aéroport.
2. Reproduire les opérations historiques au sol de CYUL.
3. Générer et router des aéronefs contrôlables par l’utilisateur à l’aide d’un algorithme de recherche du plus court chemin.
4. Calculer et afficher en temps réel la consommation de carburant et les émissions polluantes de chaque aéronef.
5. Analyser des scénarios spécifiques pour comprendre l’impact de certains choix opérationnels sur le trafic des aéronefs.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie retenue pour développer le simulateur. Dans un premier temps, l'architecture de l'environnement 3D (aéroport et aéronefs) est décrite. Ensuite, le traitement des données issues de l'ADS-B et le jeu de trajectoires sont détaillés. La troisième partie aborde le principe du routage sur le *line graph*, l'implémentation des contraintes opérationnelles et les algorithmes A* et WHCA*. La quatrième partie décrit le processus de trafic contrôlable avec la planification par l'utilisateur et les manœuvres réalisables par les aéronefs. Enfin, le modèle de calcul de la consommation de carburant et des émissions polluantes est présenté, ainsi que ses résultats. L'objectif de ce chapitre est donc de décrire rigoureusement tous les choix techniques effectués lors du travail de recherche.

2.1 Architecture de l'environnement de simulation

Cette section décrit la conception de l'environnement virtuel du simulateur. L'aéroport est modélisé en trois dimensions à l'échelle réelle dans Unreal Engine 5 (UE5) et géoréférencé. Une flotte d'aéronefs, tirée de FlightGear, est intégrée à l'échelle 1 :1 afin de garantir un positionnement au sol fidèle à la réalité.

2.1.1 Modélisation 3D de l'aéroport dans Unreal Engine 5

Afin de reproduire le déplacement des aéronefs au sol de la façon la plus réaliste possible, l'environnement 3D du simulateur est développé sur le moteur Unreal Engine 5 (UE5). Ce moteur est choisi car il est le logiciel de création 3D le plus performant et le plus intégré à ce jour en plus de permettre un développement en C++ adapté à la simulation en temps réel. La plateforme est conçue pour reproduire les opérations au sol de l'aéroport international Montréal-Trudeau (CYUL) dans un environnement virtuel géoréférencé et à échelle réelle. Un modèle 3D existant de l'aéroport, disponible sur la plateforme TurboSquid¹, sert de base à la

¹ <https://www.turbosquid.com/FullPreview/2013580>

modélisation de l'environnement. Il inclut les infrastructures principales de CYUL comme les terminaux, les voies de circulation, les pistes et les bâtiments. Ce modèle, visible en Figure 2.1, est mis à l'échelle 1 :1 grâce au logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) Rhinoceros 3D puis il est importé dans UE5.



Figure 2.1 Vue du dessus de CYUL dans UE5

Le géoréférencement du modèle est assuré par le plugin à code source ouvert Cesium², qui convertit automatiquement les coordonnées géographiques réelles de l'aéroport (longitude, latitude, altitude) en coordonnées locales UE5 (X, Y, Z). Cette conversion garantit l'alignement précis des éléments visuels de la scène avec leurs emplacements géographiques réels, ce qui est essentiel pour que les trajectoires des avions simulés soient fidèles aux trajectoires observées.

² <https://cesium.com/platform/cesium-for-unreal/>

Cela nous permet également d'exploiter des bases de données contenant des coordonnées géographiques par la suite, lors du routage des aéronefs.

2.1.2 Modèles d'aéronefs

Tous les modèles 3D des aéronefs utilisés dans le simulateur sont issus du hangar de modèles du logiciel à code source ouvert FlightGear³. Ils représentent des aéronefs de ligne de différentes dimensions, construits par divers fabricants et opérés par différentes compagnies aériennes. De cette manière, on constitue une flotte aussi variée que possible et représentative des types d'aéronefs opérant à CYUL. Comme pour le modèle de l'aéroport, chaque aéronef est représenté à l'échelle 1 : 1 dans l'environnement 3D afin de garantir une représentation spatiale fidèle à la réalité. La Figure 2.2 présente la flotte d'aéronefs intégrés dans le simulateur de l'aéroport.



Figure 2.2 Modèles d'aéronefs utilisés dans la simulation de l'aéroport

³ <https://www.flightgear.org>

Il est important de souligner que la priorité a été donnée à la précision de l'échelle et du positionnement au sol des aéronefs plutôt qu'à la fidélité visuelle. Les modèles sont volontairement simples et n'incluent pas d'animations détaillées telles que les mouvements des gouvernes ou des trains d'atterrissage par exemple. Cette approche est cohérente avec l'objectif du projet, qui vise à analyser et comparer des stratégies de routage au sol plutôt qu'à simuler le comportement aérodynamique des aéronefs.

2.2 Acquisition, traitement et rejeu des données ADS-B

Afin de reproduire les opérations au sol observées à CYUL, le simulateur exploite des données de trajectoires issues d'OpenSky Network, une association à but non lucratif qui collecte des données ADS-B grâce à un réseau mondial de capteurs au sol (Schäfer *et al.*, 2014). Ces données contiennent des informations sur la position de chaque aéronef, comme ses coordonnées GPS, son cap et sa vitesse, à un instant donné. Elles sont accessibles librement à des fins de recherche, ce qui en fait une source adaptée au développement du simulateur. Cependant, les points GPS sont imprécis car ils ne se situent pas exactement sur les voies de circulation et cela peut engendrer des discontinuités dans la modélisation des trajectoires.

Pour extraire uniquement les mouvements des aéronefs à l'intérieur de CYUL, un "filtre géographique" est appliqué aux données brutes. Un rectangle délimitant le périmètre de l'aéroport est défini à partir de quatre valeurs de coordonnées, le filtre exclut alors tous les points de données situés en dehors de ce périmètre. Ainsi, on isole efficacement les trajectoires au sol de CYUL. Une fois les données filtrées, un algorithme de map-matching développé en interne au LARCASE (Szymanski, Ghazi & Botez, 2023b) est appliqué afin de reconstruire les trajectoires complètes de chaque aéronef à partir des points GPS. Cet algorithme utilise un graphe non orienté de l'aéroport, dont la construction est détaillée à la section 2.3.1., pour obtenir des trajectoires cohérentes avec le réseau de voies de circulation réel. Chaque point brut ADS-B est projeté sur l'élément du graphe le plus proche, en tenant compte de la proximité géographique mais également du cap et de la vitesse de l'aéronef. Cela permet d'éviter les erreurs dans les zones où les taxiways sont très proches les uns des autres. Une fois tous les

points associés, l'algorithme reconstruit la trajectoire de l'aéronef. La Figure 2.3 présente un exemple des travaux de nos collègues au LARCASE.

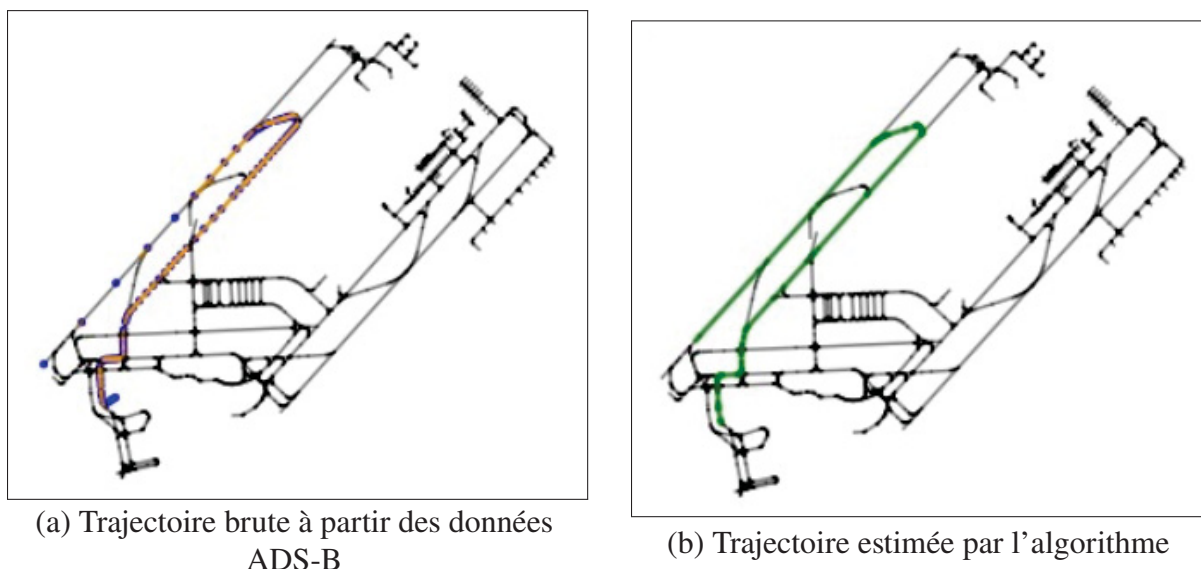


Figure 2.3 Résultats de l'algorithme de map-matching pour une trajectoire sur CYUL

Traduit de (Szymanski *et al.*, 2023b, p. 8)

Les résultats sont enregistrés dans des fichiers *.csv individuels contenant l'heure, les coordonnées GPS, le cap, la vitesse et le code de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) de l'aéronef. De cette façon, les trajectoires au sol sont cohérentes avec la topologie réelle de CYUL. Une fois toutes les trajectoires reconstruites et stockées, le simulateur crée un aéronef par fichier et lui assigne sa trajectoire. Les aéronefs sont ensuite animés en temps réel selon les données ADS-B contenues dans leur fichier, ce qui permet de reproduire fidèlement l'ensemble des mouvements au sol observés à CYUL pour une journée donnée.

Il est important de noter que les données brutes d'OSM présentent de nombreuses incohérences qui les rendent inutilisables sans pré-traitement. De plus, une partie des trajectoires reste inexploitable même après filtrage et reconstruction par map-matching en raison d'erreurs résiduelles. Ces trajectoires sont écartées manuellement avant d'être intégrées au simulateur.

Ces limitations réduisent le nombre de trajectoires exploitables et compliquent la constitution d'une base de données conséquente.

2.3 Routage sur le *line graph* et planification multi-aéronefs

Cette partie présente la méthode de routage retenue pour l'étude des déplacements des aéronefs contrôlables au sol de l'aéroport. Dans un premier temps, la conception du graphe nodal de CYUL est présentée et les points d'entrée et de sortie du réseau de voies de circulation sont définis. Ensuite, la dérivation du graphe nodal en *line graph* est détaillée. Enfin, la dernière partie décrit les algorithmes de recherche du plus court chemin utilisés pour le routage mono-aéronef (A^*) et multi-aéronefs (WHCA*).

2.3.1 Construction du graphe nodal de CYUL

Un des objectifs du simulateur étant de servir de plateforme d'analyse et d'aide à la décision, il faut ajouter la possibilité de contrôler des aéronefs, indépendants de ceux générés par les fichiers *.csv présentés précédemment. Il est cependant nécessaire que leurs déplacements soient autonomes et respectent les contraintes de l'aéroport. Pour cela, on utilise un graphe nodal, qui est une représentation simplifiée du réseau de voies de circulations de l'aéroport. Le graphe nodal de CYUL a été généré à l'aide d'un algorithme développé au LARCASE par Szymanski *et al.* (2023b). L'ensemble des données constituant l'aéroport est extrait automatiquement depuis OSM, notamment celles représentant les pistes, les voies de circulations et les portes d'embarquement. Ensuite, elles sont converties en graphe, illustré en Figure 2.4(a), dans lequel les nœuds représentent les points clés comme les intersections et les arêtes les segments navigables qui les relient. Ces données sont stockées dans un fichier *.json contenant, pour chaque nœud, un identifiant unique ainsi que ses coordonnées géographiques et pour chaque arête, les identifiants des nœuds qu'elle relie.

Ce graphe est modélisé dans l'environnement 3D d'UE5 et sert de référence géographique pour l'ensemble du système de routage du simulateur, comme illustré dans la Figure 2.4(b). Le graphe

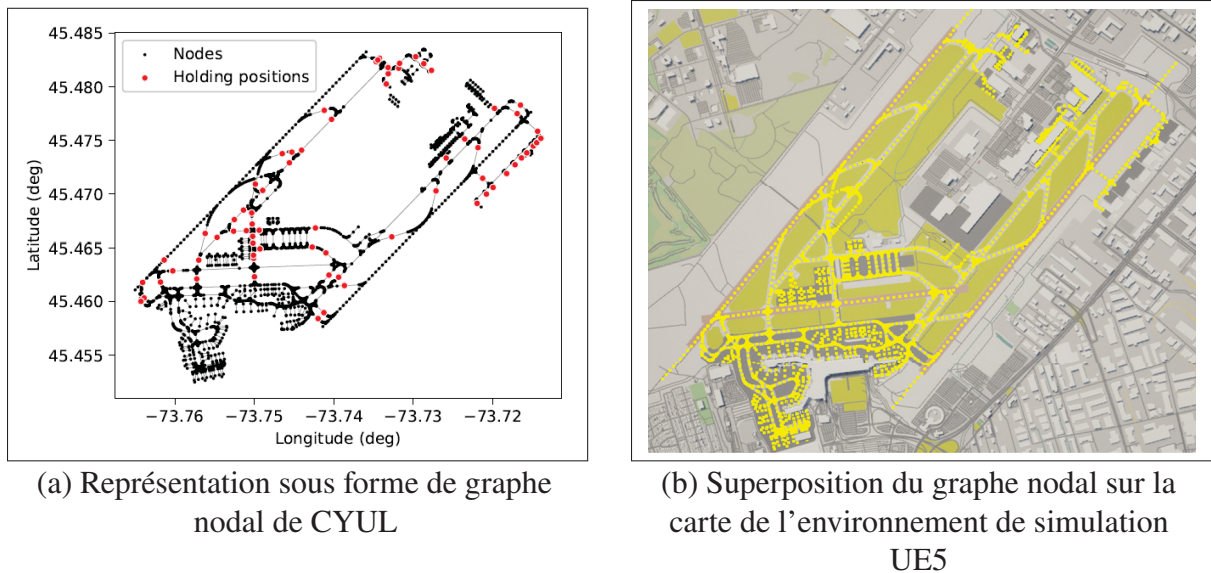


Figure 2.4 Représentation du graphe nodal de CYUL et son intégration dans UE5

nodal a été construit à partir de données OSM actuelles et reflète donc la topologie réelle de CYUL au moment de la rédaction de ce mémoire. En revanche, le modèle 3D de l'aéroport utilisé dans le simulateur représente une version antérieure de CYUL, avant certains travaux d'extension qui ont ajouté de nouvelles voies de circulation. Une estimation visuelle, basée sur la proportion des segments du graphe nodal situés dans des zones dépourvues de piste modélisée, situe cet écart à environ 5% de la longueur totale du réseau. Il existe donc un écart visuel entre le graphe nodal et le modèle 3D dans ces zones mais ceci n'affecte en rien la logique de routage qui repose uniquement sur le graphe nodal.

2.3.2 Identification des portes d'embarquement et des pistes

Pour que les avions contrôlables soient routés sur le graphe nodal, il est nécessaire de définir les points majeurs d'entrée et de sortie du réseau de voies de circulation, soit les portes d'embarquement et les pistes. Pour se faire, deux fichiers *.json distincts sont utilisés. Le premier fichier, dont la structure est illustrée en Figure 2.5, recense les données des 153 portes d'embarquement de CYUL. Pour chaque porte, il contient son identifiant, ses coordonnées

géographiques, l'identifiant du nœud du graphe nodal correspondant à sa position et l'identifiant du nœud d'entrée sur la voie de circulation. Ces deux derniers nœuds sont nécessaires pour modéliser le refoulement, détaillé en section 2.4.2.

```

"num_parkings": 153,
"parkings": [
  {
    "parking_ref": "1",
    "parking_nx_node": 3953,
    "parking_nx_node_lon": -73.7475025,
    "parking_nx_node_lat": 45.4586422,
    "entry_nx_node": 1156
  },
  {
    "parking_ref": "10",
    "parking_nx_node": 3973,
    "parking_nx_node_lon": -73.7445975,
    "parking_nx_node_lat": 45.4582496,
    "entry_nx_node": 1447
  },
  {
    "parking_ref": "11",
    "parking_nx_node": 3963,
    "parking_nx_node_lon": -73.7443744,
    "parking_nx_node_lat": 45.4587722,
    "entry_nx_node": 964
  },
  {

```

Figure 2.5 Extrait du fichier contenant les portes d'embarquement de CYUL

Le deuxième fichier *.json, illustré en Figure 2.6, contient les points de départ et d'arrivée associés aux quatre pistes de CYUL (06L, 06R, 24L et 24R). Pour chaque piste, deux entrées sont définies, une pour le départ (préfixée *D*) et une pour l'arrivée (préfixée *A*), chacune contenant les coordonnées géographiques et l'identifiant du nœud concerné. Par exemple, pour un décollage sur la piste 24L, l'aéronef va se rendre sur le point *D24L* avant d'entamer sa phase de roulage au décollage. À l'inverse, s'il doit atterrir sur la piste 24L, il choisira le point *A24L*, qui représente la position d'arrivée de l'aéronef lorsqu'il touche le sol.

Ces deux fichiers sont chargés au démarrage du simulateur et permettent de traduire des données comme le numéro de porte ou le nom de la piste en nœuds du graphe sur lesquels les algorithmes présentés par la suite pourront opérer.

```

"D24L": {
  "runway_ref": "24L",
  "label": "24",
  "node": 27,
  "lat": 45.475074,
  "lon": -73.718551
},
"A24L": {
  "runway_ref": "24L",
  "label": "24",
  "node": 314,
  "lat": 45.471263,
  "lon": -73.723548
},

```

Figure 2.6 Extrait du fichier contenant les points d'entrée et de sorties des pistes de CYUL

2.3.3 Implémentation du *line graph* et intégration des contraintes opérationnelles

Le graphe nodal seul n'est pas suffisant pour représenter l'ensemble des contraintes opérationnelles de CYUL. Le sens de circulation, les virages interdits à plus de 90° ou encore les zones restreintes ne sont pas modélisés par les nœuds du graphe mais par les transitions entre arêtes, elles dépendent donc de la direction de l'aéronef lorsqu'il passe d'un segment à un autre. Afin de répondre à cette problématique, un *line graph* est dérivé du graphe nodal, présenté dans la section 2.3.1, d'après la méthode de Durand, Watteau, Ghazi & Botez (2024b). La Figure 2.7 représente un schéma du principe de fonctionnement de cette méthode. Dans le *line graph*, chaque arête du graphe nodal devient un nœud et deux nœuds du *line graph* sont connectés si leurs arêtes d'origine partagent un nœud, c'est-à-dire si l'aéronef peut passer de l'un à l'autre sans interruption dans sa trajectoire.

Cette reformulation permet d'encoder les contraintes opérationnelles directement dans la structure du routage. Par exemple, pour appliquer une contrainte de sens unique sur une voie de circulation, les arêtes du *line graph* qui correspondent à une traversée dans le sens interdit sont supprimées. De la même manière, une limitation de virage à 90° se traduit par la suppression des connexions entre deux nœuds du *line graph* dont l'angle de transition dans le graphe nodal

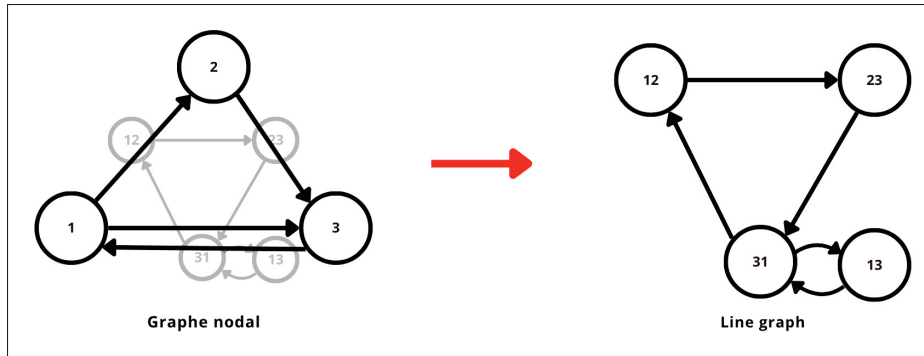


Figure 2.7 Schéma de la transformation du graphe nodal en *line graph*

dépasse cette limite. Les règles opérationnelles ainsi encodées sont tirées des cartes d'aérodrome de Jeppesen (2017). Leur intégration dans le *line graph* a été validée par une vérification visuelle de la cohérence entre les segments autorisés et les procédures illustrées sur ces cartes, mais aucune confrontation systématique avec les procédures appliquées en temps réel par le contrôle aérien à CYUL n'a été effectuée. Une fois le *line graph* construit et les contraintes opérationnelles encodées dans sa structure, il faut définir un algorithme capable de calculer le chemin optimal entre deux nœuds de ce graphe.

2.3.4 Algorithme A*

Introduit par Hart, Nilsson & Raphael (1968), l'algorithme A* est un algorithme de recherche du plus court chemin guidé par une heuristique. Il est utilisé dans le simulateur comme algorithme de routage pour des avions uniques et constitue la base de l'algorithme multi-avions présenté à la section suivante. L'algorithme A* évalue chaque nœud n du graphe à l'aide de la fonction de coût suivante :

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (2.1)$$

où $f(n)$ est le coût total du chemin passant par le nœud n , $g(n)$ est le coût réel du meilleur chemin trouvé depuis le nœud de départ jusqu'au nœud n et $h(n)$ est une estimation heuristique

du coût restant entre le nœud n et le nœud d'arrivée. Lorsque $h(n) = 0$ pour tout nœud n , l'algorithme A^* se réduit à l'algorithme de Dijkstra (Dijkstra, E.W., 1959).

Le pseudo-algorithme 2.1 décrit le fonctionnement de l'algorithme A^* tel qu'il est implémenté dans le simulateur. L'algorithme explore une liste de nœuds, initialisée avec le nœud de départ s . À chaque itération, le nœud ayant la valeur $f(n)$ la plus faible est sélectionné et retiré de la liste, puis ses voisins m sont évalués. Pour chacun d'eux, si le chemin passant par le nœud courant est moins coûteux que ce qui avait été enregistré jusqu'alors, les coûts sont mis à jour et le voisin m est ajouté à la liste à son tour. L'algorithme s'arrête lorsque le nœud d'arrivée t est atteint ou lorsque la liste est vide, indiquant qu'aucun chemin n'existe. Dans le cas où le nœud d'arrivée est atteint, le chemin optimal est reconstruit en remontant tous les pointeurs parents de t jusqu'à s .

Appliqué au *line graph* de la section 2.3.2, l'algorithme A^* permet de calculer le chemin optimal d'un aéronef entre sa position actuelle et sa destination finale en tenant compte de toutes les contraintes opérationnelles de l'aéroport. Cependant, même si l'algorithme A^* est efficace pour le routage d'un aéronef à la fois, il ne tient pas compte de la présence des autres aéronefs lors du calcul de sa trajectoire. Dans des scénarios impliquant plusieurs aéronefs en simultané, cette limitation conduit inévitablement à des conflits car les aéronefs vont emprunter les mêmes intersections ou voies de circulation au même moment. Pour pallier ce problème, un algorithme WHCA*, présenté à la section suivante, est utilisé dans les scénarios multi-aéronefs.

2.3.5 Algorithme WHCA* pour la gestion multi-aéronefs

Le Windowed Hierarchical Cooperative A^* (WHCA*) est un algorithme coopératif, basé sur l'algorithme A^* , adapté à la planification multi-aéronefs. Proposé par Silver (2005) et étendu par Bnaya & Felner (2014), il est utilisé dans le simulateur pour le routage de tous les aéronefs contrôlables générés par le fichier de planification. Son principe repose sur deux éléments principaux : la restriction de la recherche à une fenêtre temporelle finie et l'introduction d'une table de réservation $\mathcal{T}$ partagée entre tous les aéronefs.

Algorithme 2.1 Algorithme A* pour le routage sur le *line graph*

```

1 Algorithme : Algorithme A* pour le routage sur le line graph
   Input : line graph  $G = (N, E, \text{coût})$ , nœud de départ  $s$ , nœud d'arrivée  $t$ 
   Output : Chemin optimal  $P$  de  $s$  jusqu'à  $t$ , ou  $\emptyset$  si aucun chemin n'existe

2 openSet  $\leftarrow \{s\}$ ;
3  $g(s) \leftarrow 0$ ;
4  $f(s) \leftarrow h(s, t)$ ;          /*  $h(s, t)$  = distance euclidienne entre  $s$  et  $t$  */
5 parent( $n$ )  $\leftarrow \emptyset \quad \forall n \in N$ ;

6 while openSet  $\neq \emptyset$  do
7    $n \leftarrow \arg \min_{x \in \text{openSet}} f(x)$ ;

8   if  $n = t$  then
9     | return reconstruire_chemin(parent,  $t$ );
10  end if

11  Retirer  $n$  de openSet;

12  for chaque voisin  $m$  de  $n$  dans  $G$  do
13     $g_{\text{temp}} \leftarrow g(n) + \text{coût}(n, m)$ ;

14    if  $g_{\text{temp}} < g(m)$  ou  $m$  pas encore visité then
15      | parent( $m$ )  $\leftarrow n$ ;
16      |  $g(m) \leftarrow g_{\text{temp}}$ ;
17      |  $f(m) \leftarrow g(m) + h(m, t)$ ;

18      if  $m \notin \text{openSet}$  then
19        | Ajouter  $m$  à openSet;
20      end if
21    end if
22  end for
23 end while

24 return  $\emptyset$ ;                                     /* Aucun chemin trouvé */

```

Le fonctionnement de l'algorithme, tel qu'il est implémenté dans le simulateur, est décrit par le pseudo-algorithme 2.2. Lorsqu'un aéronef est créé, le WHCA* calcule son chemin sur le *line graph* à l'aide de l'algorithme A*, puis inscrit dans $\mathcal{T}$ l'ensemble des nœuds de la trajectoire qu'il prévoit d'occuper. Lors de chaque calcul suivant, l'algorithme consulte cette table $\mathcal{T}$ et recherche un chemin qui évite d'assigner un nœud déjà réservé par un autre aéronef. Puisque chaque nœud du *line graph* représente une arête orientée du graphe nodal, réserver un nœud

revient à réserver le passage sur le segment correspondant dans un sens donné, ce qui empêche également deux avions de se croiser en sens inverse sur le même segment.

Plutôt que de planifier la totalité des trajectoires en une seule fois au début de la simulation, le WHCA* traite les avions séquentiellement par ordre croissant de leur instant de départ τ_i . Chaque avion a_i est défini par un nœud de départ s_i , un nœud d'arrivée t_i , un instant de départ τ_i et une vitesse v_i . Pour chaque avion a_i , un algorithme A* est exécuté sur une fenêtre temporelle de taille W , soit sur l'intervalle $[\tau_i, \tau_i + W]$. Cela veut dire que les nœuds du *line graph* sont explorés non plus seulement dans l'espace mais aussi dans le temps, celui-ci étant divisé en intervalles réguliers de durée Δt . Chaque état de la recherche est donc un couple (n, τ) qui représente la présence de l'avion au nœud n du *line graph* au pas de temps τ . Pour chaque voisin v de n , l'algorithme calcule le pas d'arrivée τ_v en fonction de la longueur du segment reliant n à v et de la vitesse v_i de l'avion. Si l'état (v, τ_v) est déjà réservé dans $\mathcal{T}$, le déplacement vers v est rejeté et l'algorithme cherche une trajectoire alternative. Sinon, l'état est ajouté à la liste des candidats à explorer. Une fois la trajectoire complète calculée, tous les états (n, τ) sont inscrits dans $\mathcal{T}$ afin de les rendre indisponibles pour les prochains avions.

Il est important de préciser que les avions jouant des trajectoires ADS-B ne sont pas pris en compte dans le calcul de la table de réservation $\mathcal{T}$, car leurs trajectoires sont prédéterminées et ne peuvent pas être recalculées. Les avions contrôlables leur cèdent donc systématiquement la priorité en cas de conflit.

L'algorithme WHCA* permet ainsi de générer des trajectoires pour l'ensemble des avions contrôlables en tenant compte à la fois des contraintes opérationnelles de CYUL et de la présence des autres avions. Bien qu'il arrive que les chemins générés soient légèrement plus longs dans certains cas, éviter les conflits reste une exigence critique pour garantir la sécurité et la fluidité du trafic au sol. Il est cependant important de noter que cet algorithme ne garantit pas l'absence totale de conflits : si aucun chemin sans conflit n'est trouvé dans la fenêtre temporelle, l'avion reste en attente à sa porte jusqu'à ce qu'une replanification soit possible. De plus, les trajectoires

Algorithme 2.2 Algorithme WHCA*

```

1 Algorithme : WHCA* pour la planification multi-aéronefs
   Input : line graph  $G = (N, E, \text{coût})$ , liste d'agents  $\mathcal{A} = \{a_1, \dots, a_k\}$  définis par
            $(s_i, t_i, \tau_i, v_i)$ , fenêtre temporelle  $W$ , pas de temps  $\Delta t$ 
   Output : Pour chaque agent  $a_i$ , un chemin spatio-temporel  $P_i$  sans conflit
2  $\mathcal{T} \leftarrow \{\}$ ;                                     /* Table de réservation */
3 Trier  $\mathcal{A}$  par  $\tau_i$  croissant;
4 for chaque agent  $a_i \in \mathcal{A}$  do
5    $\text{pas}_{\text{départ}} \leftarrow \lfloor \tau_i / \Delta t \rfloor$  ;    $\text{pas}_{\text{max}} \leftarrow \text{pas}_{\text{départ}} + W$ ;
   /* A* sur le line graph : état = (nœud, pas)                                     */
6    $\text{openSet} \leftarrow \{(s_i, \text{pas}_{\text{départ}})\}$ ;
7   while  $\text{openSet} \neq \emptyset$  do
8      $(n, \tau) \leftarrow$  état de  $\text{openSet}$  avec  $f$  minimal;
9     if  $n = t_i$  then  $P_i \leftarrow \text{reconstruire\_chemin}()$    break;
10    if  $\tau \geq \text{pas}_{\text{max}}$  then continuer;
11    for chaque voisin  $v$  de  $n$  dans  $G$  do
12       $\tau_v \leftarrow \tau + \lceil \text{dist}(n, v) / (v_i \cdot \Delta t) \rceil$ ;
13      if  $(v, \tau_v) \notin \mathcal{T}$  then Ajouter  $(v, \tau_v)$  à  $\text{openSet}$  si meilleur  $g$ ;
14    end for
15  end while
   /* Inscription de  $P_i$  dans la table de réservation                                     */
16  for chaque  $(n, \tau)$  dans  $P_i$  do  $\mathcal{T}(n, \tau) \leftarrow a_i$ ;
17 end for
18 return  $\{P_1, \dots, P_k\}$ ;

```

étant planifiées une par une et non simultanément, les aéronefs planifiés en premier ont priorité sur les aéronefs suivants.

2.4 Génération de trafic contrôlable

La génération de trafic contrôlable constitue le second mode de fonctionnement du simulateur, en complément du rejeu de trajectoires historiques. Elle repose sur un fichier de planification défini par l'utilisateur, à partir duquel le simulateur instancie des aéronefs et leur assigne automatiquement une trajectoire calculée par le WHCA* sur le *line graph* de CYUL. Afin de

rendre les scénarios générés aussi réalistes que possible, plusieurs manœuvres opérationnelles sont modélisées, notamment le décollage, l’atterrissage, le refoulement, le dégivrage et la gestion des points d’attente. Le simulateur offre également la possibilité de générer des avions manuellement pendant la simulation, permettant ainsi de tester des scénarios en temps réel de manière interactive.

2.4.1 Fichier de planification défini par l'utilisateur

La méthode de génération de trafic contrôlable repose sur un fichier de planification défini par l'utilisateur, présent en Figure 2.8. Ce fichier permet de spécifier un ensemble de paramètres pour chaque avion à générer :

- le type de manœuvre avec *D* pour départ ou *A* pour arrivée,
- la destination avec les numéros de la piste (*NomPiste*) et de la porte d'embarquement (*NomPorte*),
- le groupe de l'avion *A*, *B* ou *C*, dont les caractéristiques sont détaillées en section 2.5.1,
- l'instant de départ (*TempsSpawn*),
- le code OACI de l'avion,
- si un passage au dégivrage est requis.

Le code OACI renseigné dans le fichier de planification est utilisé pour retrouver les caractéristiques techniques de l'avion dans une base de données développée pour les besoins de ce projet. Elle combine deux bases de données à source ouverte : la base de données de l'OACI sur les émissions des moteurs d'avion (EEDB) et la base de données des caractéristiques des avions (ACD) de la FAA. Elle fournit, pour chaque avion, des informations telles que la vitesse d'approche, l'envergure, le nombre de moteurs, le débit de carburant en roulage et les indices d'émissions. Chaque avion est associé à un des trois groupes opérationnels définis pour CYUL par Jeppesen (2017) :

- le groupe A regroupe les avions dont l'envergure est inférieure à 36 mètres,

```

D/A,NomPiste,NomPorte,Groupe,TempsSpawn,OACI,DégivrageOuiNon
A,24R,57,B,0,B789,non
A,24R,2,A,1560,B712,non
A,24R,7,A,1740,BCS3,non
A,24R,85,A,2760,E75S,non
A,24R,58,A,3660,B38M,non
A,24R,6,A,3840,B38M,non
D,24L,2,A,3900,B712,non
A,24R,28,A,4080,B712,non
A,24R,52,A,4140,B38M,non
A,24R,11,A,4200,A320,non
A,24R,66,B,4260,B788,non
A,24R,81,A,5460,CRJ9,non
A,24R,51,A,5520,BCS3,non
A,24R,2,A,5860,B38M,non
A,24R,8,A,6180,B712,non
A,24R,79,A,6300,BCS3,non
A,24R,27,A,6360,B712,non
A,24R,63,B,6540,A359,non
A,24R,49,A,6720,E75S,non
D,24L,28,A,7080,B712,non

```

Figure 2.8 Fichier de planification du trafic contrôlable

- le groupe B ceux dont l'envergure est supérieure à 36 mètres,
- le groupe C est pour les très grands avions soit l'A380, l'A124, l'A346 et le B773.

À chacun de ces groupes est associé un *line graph* dédié contenant les contraintes opérationnelles propres à sa catégorie. Par exemple, un avion de groupe C ne pourra pas emprunter les mêmes voies de circulation qu'un avion de groupe A, ce qui reflète les contraintes réellement appliquées à CYUL.

Visuellement, un modèle 3D est attribué aléatoirement à chaque avion, parmi un ensemble de modèles représentatifs de son groupe. Trois modèles sont disponibles pour le groupe A (CRJ700, A322 et B737), deux pour le groupe B (B767 et A332) et deux pour le groupe C (A380 et A346). Par exemple, un avion dont le code OACI est A320 se verra attribuer l'un des modèles 3D du groupe A, quel que soit son type exact. Cette simplification est purement visuelle, le modèle 3D affiché n'intervient à aucun moment dans les calculs de routage, ni dans les futurs calculs de

consommation de carburant et d'émissions car ces calculs reposent exclusivement sur le code OACI renseigné dans le fichier de planification, indépendamment du modèle 3D choisi pour l'affichage.

Afin de simplifier la génération de scénarios réalistes, un script Python a été développé pour produire automatiquement le fichier de planification. Le script génère une liste de vols en suivant plusieurs paramètres modifiables, récapitulés dans le Tableau 2.1. Chaque aéronef doit obligatoirement arriver puis décoller depuis une même porte, avec un délai entre ces deux manœuvres. Les arrivées sont également espacées d'un intervalle minimal de trois minutes afin de respecter les réglementations liées aux turbulences de sillage (OACI, 2016). Le code OACI de chaque aéronef est obtenu aléatoirement depuis la base de données, et son groupe A, B ou C est déterminé automatiquement à partir de son envergure.

L'attribution des portes respecte également les contraintes de groupe. Par exemple, les portes réservées aux aéronefs de groupe C ne peuvent pas être attribuées aux groupes A ou B et deux aéronefs de groupe B ne peuvent pas être assignés à des portes adjacentes. Il est également possible de paramétrer les pistes utilisées pour les départs et les arrivées ou encore la probabilité qu'un départ nécessite un dégivrage.

Tableau 2.1 Principaux paramètres du script de génération du fichier de planification

Paramètre	Description	Valeur par défaut
n_vols	Nombre de vols à générer	500
temps_début_s	Instant de début de la simulation (s)	0
temps_fin_s	Instant de fin de la simulation (s)	86400
min_séparation_s	Séparation minimale entre arrivées (s)	180
min_rotation_s	Temps de rotation minimal (s)	1800
piste_départ	Piste principale de départ	06L
piste_arrivée	Piste principale d'arrivée	24L
p_oui_départ	Probabilité de dégivrage au départ	0.5

Finalement, au lancement de la simulation, le fichier de planification est lu, les aéronefs contrôlables sont instanciés et leur trajectoire leur est assignée automatiquement, calculée par

le WHCA* sur le *line graph* de CYUL. Cette approche permet de reproduire des scénarios de trafic complexes et d'analyser des situations opérationnelles spécifiques comme des périodes de pointe ou des configurations particulières de l'aéroport comme des travaux.

2.4.2 Manœuvres modélisées : décollage, atterrissage, refoulement, dégivrage, collisions et points d'attente

Le simulateur prend en charge plusieurs manœuvres opérationnelles afin de rendre le mouvement des aéronefs plus réaliste et plus complet.

Lors d'un atterrissage, l'aéronef est créé dans les airs à une distance fixe du seuil de piste, puis entame une descente progressive jusqu'à toucher le sol. Pour un décollage, l'aéronef s'aligne dans l'axe de la piste puis commence une phase de roulage jusqu'à atteindre sa vitesse de rotation. Ces deux manœuvres restent volontairement simples sur le plan visuel, les volets et les gouvernes ne sont par exemple pas animés dans le simulateur, ce qui est cohérent avec l'objectif du mémoire de modéliser les opérations au sol et non en vol.

Le refoulement est modélisé à partir des données du fichier *.json présent en Figure 2.5. Pour chaque porte d'embarquement, le fichier contient deux nœuds distincts : le "nœud de la porte" (`parking_nx_node`), qui correspond à la position exacte de l'endroit où l'aéronef doit stationner et le "nœud d'entrée sur la voie de circulation" (`entry_nx_node`), qui est le premier nœud du graphe accessible depuis cette porte. Lors de son départ, l'aéronef est d'abord créé sur le nœud de la porte avec son nez dirigé vers celle-ci. Il recule ensuite en ligne droite jusqu'au nœud d'entrée, afin de simuler un refoulement. Lorsque ce nœud est atteint, l'aéronef effectue une rotation sur place afin que son nez soit dans la direction du premier segment de la trajectoire qui lui a été assignée par l'algorithme WHCA*, puis il entame son roulage. La Figure 2.9 présente un exemple de trajectoire de refoulement suivie par un aéronef.

Si un dégivrage est requis, l'aéronef est routé vers l'un des emplacements libres de la zone de dégivrage avant de rejoindre sa piste de décollage. Si tous les emplacements sont occupés, il attend à sa porte d'embarquement qu'une place se libère avant d'entamer son refoulement.

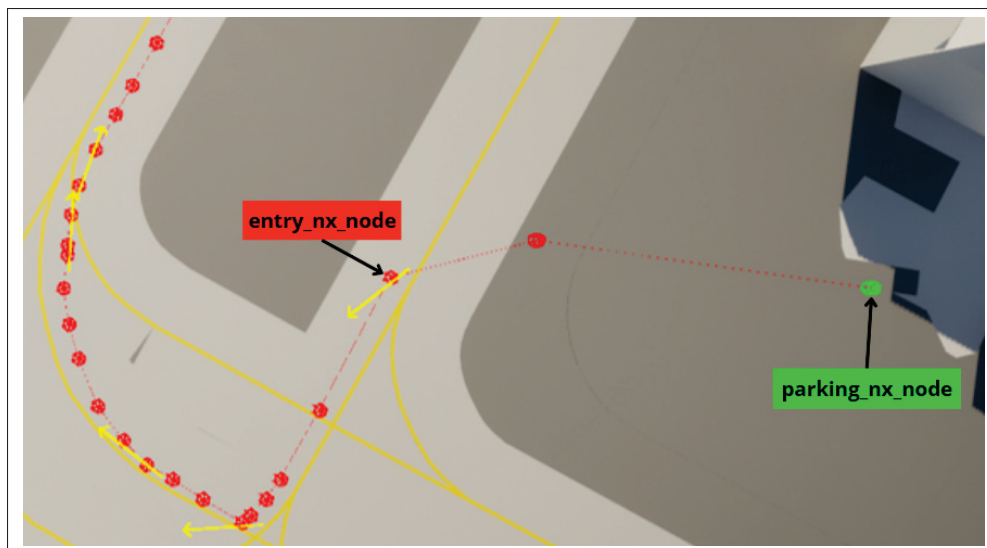


Figure 2.9 Trajectoire d'un aéronef au départ d'une porte d'embarquement avec son point de parking et son point d'entrée

La gestion des collisions repose sur une logique de priorité selon le type d'aéronef impliqué. Lorsqu'un aéronef ADS-B entre en conflit avec un aéronef contrôlable, l'aéronef contrôlable lui cède systématiquement le passage car la trajectoire des aéronefs ADS-B est fixe. Lorsque deux aéronefs contrôlables entrent en conflit, l'un d'eux cède le passage à l'autre avec une probabilité d'une chance sur deux. Deux cas particuliers s'appliquent. Premièrement, si deux aéronefs contrôlables se retrouvent face à face sur un même segment alors les deux s'immobilisent définitivement. Deuxièmement, si deux aéronefs contrôlables circulent dans le même sens et que celui qui suit rattrape celui qui est devant, il s'arrête et attend que l'aéronef devant lui reprenne sa trajectoire. Cette gestion des conflits au sol entre les aéronefs permet de simuler simplement le comportement réel des aéronefs dans un cas rare de collision potentielle.

Finalement, les points d'attente sur la piste sont modélisés à partir des données du graphe nodal. Chaque piste est associée à un nombre défini de positions d'attente. Les pistes 06R, 06L et 24L en comportent chacune deux, permettant à deux aéronefs de groupes A ou B de se positionner côte à côte en attente de décollage. La piste 24R, quant à elle, en comporte trois.

Les deux positions latérales sont réservées aux aéronefs de groupes A et B, tandis que la position centrale est réservée aux aéronefs de groupe C en raison de leur envergure. La Figure 2.10 reprend ces configurations. Si toutes les positions d'attente pour un groupe donné sont occupées, les aéronefs suivants se mettent en file d'attente derrière le dernier aéronef, comme visible en Figure 2.10(a).

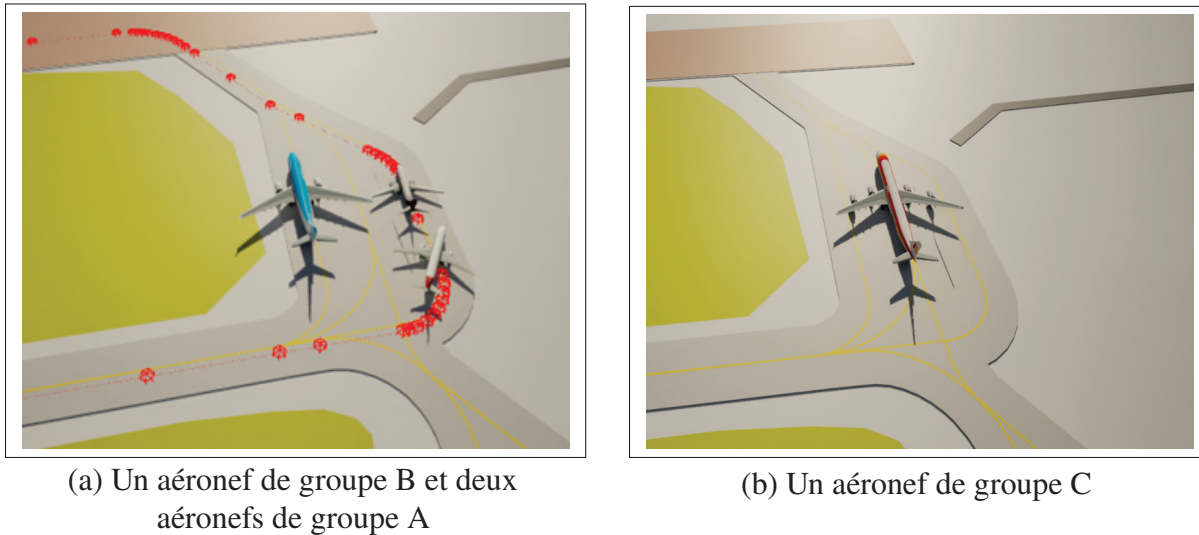


Figure 2.10 Configurations possibles des positions d'attente de la piste 24R dans UE5

Le temps d'attente est déterminé par une séparation minimale liée à la turbulence de sillage définie par l'OACI (2016). Ce minimum dépend de la catégorie de turbulence de sillage de l'aéronef qui peut appartenir à trois catégories : légère (L), moyenne (M) ou lourde (H). Cette information est récupérée dans la base de données combinée présentée en section 2.4.1. Pour les départs des aéronefs, une séparation minimale de deux minutes est appliquée lorsqu'un aéronef léger (L) ou moyen (M) décolle derrière un aéronef lourd (H) ou lorsqu'un aéronef léger (L) décolle derrière un aéronef moyen (M) (OACI, 2016). Cette séparation de deux minutes s'applique lorsque les aéronefs utilisent la même piste. Dans tous les autres cas, ou si la piste est inutilisée, il y a un temps d'attente d'une minute afin de simuler le temps nécessaire à la tour de contrôle pour autoriser un aéronef à décoller. Pour les arrivées des aéronefs, il y a une séparation systématique de trois minutes. Ces contraintes, résumées dans le Tableau 2.2, sont

directement intégrées à la logique de gestion des points d'attente modélisée par le simulateur afin de reproduire des séquences de départ et d'arrivée des avions conformes aux procédures opérationnelles actuelles.

Tableau 2.2 Temps de séparation minimum entre départs et arrivées pour respecter les contraintes liées aux turbulences de sillage (OACI, 2016)

Aéronef suivant	Aéronef précédent	Départ (min)	Arrivée (min)
Moyen (M)	Lourd (H)	2	3
Léger (L)	Lourd (H)	2	3
Léger (L)	Moyen (M)	2	3
Lourd (H)	Léger (L)	1	3

2.4.3 Génération manuelle d'avions et routage interactif

Le simulateur offre également la possibilité de générer des avions manuellement, sans passer par le fichier de planification. Pour ce faire, l'utilisateur clique sur le bouton de création d'avion manuel, présent dans l'Affichage Tête Haute (ATH) du simulateur, puis sélectionne le groupe de l'avion (A, B ou C). Une fois créé, l'avion peut être déplacé en cliquant n'importe où dans l'environnement 3D. Il se voit alors assigner une trajectoire calculée par l'algorithme A* sur son *line graph* qui prendra comme point d'arrivée le nœud le plus proche du point de clic. Contrairement aux avions issus du fichier de planification, dont le routage est effectué en amont, les avions générés manuellement sont routés individuellement afin de permettre une interaction en temps réel avec la simulation. Cette fonctionnalité est utile pour tester rapidement des scénarios divers et évaluer l'implémentation des contraintes dans le simulateur.

2.5 Modèle de carburant et d'émissions polluantes

Au-delà du calcul des trajectoires, le simulateur intègre un modèle de calcul permettant d'estimer, pour chaque avion, la consommation de carburant et les émissions polluantes associées pendant le roulage. Ainsi, les stratégies de routage sont directement reliées à leurs conséquences environnementales. Les valeurs de référence de ces paramètres, issues de l'EEDB, sont définies

pour les conditions atmosphériques standard, elles sont donc corrigées suivant la méthode BFFM2 (DuBois & Paynter, 2006). Les résultats qui en découlent sont ensuite affichés en temps réel dans l'interface du simulateur.

2.5.1 Correction aux conditions atmosphériques locales : méthode BFFM2

Chaque aéronef défini dans le fichier de planification est associé à un code OACI, utilisé pour retrouver l'identifiant unique (UID) du moteur correspondant dans la base de données combinée présentée à la section 2.4.1. Cet identifiant permet ensuite de récupérer les valeurs du débit de carburant au ralenti ainsi que les indices d'émissions de référence associés au moteur de l'aéronef. Ces valeurs constituent le point de départ des calculs suivants de consommation et d'émissions. Cependant, les données fournies dans l'EEDB sont définies pour les conditions de l'atmosphère standard internationale (ISA), soit pour une température $T_{ISA} = 288.15$ K et une pression $P_{ISA} = 1013.25$ hPa. Ce sont donc des valeurs de référence qui doivent être corrigées pour tenir compte des conditions atmosphériques réelles de CYUL. Pour cela, au début de la simulation, l'utilisateur peut renseigner un rapport d'observation météorologique (METAR) qui fournit des informations locales de température, visibilité, point de rosée et pression. Si l'utilisateur ne rentre pas de METAR, les valeurs ISA sont utilisées par défaut.

La correction est effectuée en suivant la méthode Boeing Fuel Flow Method 2 (BFFM2) de DuBois & Paynter (2006). Dans un premier temps, le débit de carburant de référence corrigé $W_{F,C}^{REF}$ est défini par :

$$W_{F,C}^{REF} = \frac{(1 + 0.2M^2) \theta^{(3.8+y)}}{\delta^{(1-x)}} W_{F,C} \quad (2.2)$$

où M est le nombre de Mach, $W_{F,C}$ est le débit de carburant corrigé et $\{x, y\}$ sont des paramètres de correction fixés à $x = 1$ et $y = 0,5$ (Ghazi & Botez, 2022). Les paramètres θ et δ représentent respectivement les rapports de température et de pression, définis par :

$$\theta = \frac{T_{\text{METAR}}}{T_{\text{ISA}}} \quad \text{et} \quad \delta = \frac{P_{\text{METAR}}}{P_{\text{ISA}}} \quad (2.3)$$

En supposant que le nombre de Mach est très faible (i.e., $M \approx 0$) lors du roulage au sol, l'équation (2.2) devient :

$$W_{F,C}^{\text{REF}} = \theta^{4.3} W_{F,C} \quad (2.4)$$

Il faut ensuite déterminer la valeur du débit de carburant corrigé pour un moteur, donnée par DuBois & Paynter (2006) telle que :

$$W_{F,C} = \frac{W_F}{\delta \sqrt{\theta}} \quad (2.5)$$

où W_F est le débit de carburant ajusté aux conditions atmosphériques locales de l'aéroport. En substituant l'équation (2.5) dans l'équation (2.4), on obtient l'expression finale de W_F :

$$W_F = W_{F,C}^{\text{REF}} \frac{\delta \sqrt{\theta}}{\theta^{4.3}} \quad (2.6)$$

Afin que le débit de carburant de chaque aéronef actif dans la simulation soit corrigé, ces calculs sont effectués à chaque instanciation. Les indices d'émissions pour le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x) et les hydrocarbures imbrûlés (HC) sont également corrigés aux conditions atmosphériques locales à l'aide des équations suivantes (DuBois & Paynter, 2006) :

$$EI_{HC} = EI_{HC,C}^{\text{REF}} \frac{\theta^{3.3}}{\delta^{1.02}} \quad (2.7)$$

$$EI_{CO} = EI_{CO,C}^{\text{REF}} \frac{\theta^{3.3}}{\delta^{1.02}} \quad (2.8)$$

$$EI_{NO_x} = EI_{NO_x,C}^{\text{REF}} \sqrt{\frac{\delta^{1.02}}{\theta^{3.3}}} e^{-19(\omega - 0.00634)} \quad (2.9)$$

où $EI_{HC,C}^{REF}$, $EI_{CO,C}^{REF}$ et $EI_{NO_x,C}^{REF}$ sont les indices d'émissions de référence corrigés et ω est le facteur d'humidité spécifique défini par :

$$\omega = \frac{0.62197058 \times HR \times P_{SAT}}{0.1P - HR \times P_{SAT}} \quad (2.10)$$

où HR est l'humidité relative de l'air, calculée à partir du rapport entre la pression de vapeur réelle et la pression de vapeur saturante P_{SAT} , qui s'exprime comme suit :

$$P_{SAT} = 6.107 \times 10^{\frac{7.5(T_{METAR} - 273.15)}{T_{METAR} - 35.85}} \quad (2.11)$$

Enfin, pour le dioxyde de carbone (CO_2), un indice d'émissions constant $EI_{CO_2} = 3,16$ $kg_{CO_2}/kg_{carburant}$ est utilisé, ce qui correspond à 3,16 kg de CO_2 émis par kilogramme de carburant brûlé, conformément aux pratiques courantes de la littérature.

2.5.2 Calcul et affichage en temps réel

La consommation cumulée de carburant est calculée et affichée en temps réel à l'aide de l'expression suivante :

$$F_{TOT} = N_{eng} \times W_F \times t \quad (2.12)$$

où F_{TOT} est la consommation totale de carburant à l'instant t (en kg) et N_{eng} est le nombre de moteurs de l'aéronef.

Les émissions cumulées de chaque polluant sont obtenues en multipliant F_{TOT} par l'indice d'émissions correspondant, corrigé aux conditions atmosphériques de CYUL selon les équations (2.7) à (2.9). La consommation de carburant est calculée en continu lorsque l'aéronef est en mouvement ou lors d'une phase d'attente opérationnelle, telle que le maintien en position avant le décollage. En revanche, les moteurs sont considérés comme coupés lors des arrêts prolongés, tels que le stationnement à la porte ou les opérations de dégivrage. Finalement,

l'ATH de la simulation présente, pour chaque aéronef actif, le débit carburant instantané W_F , la consommation cumulée F_{TOT} , ainsi que les masses cumulées de CO , CO_2 , NO_x et UHC émises depuis le début du roulage.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre présente les résultats obtenus par le simulateur et propose une analyse critique de leur portée. La validation fonctionnelle du simulateur est d'abord établie, en confirmant la cohérence du jeu des trajectoires ADS-B, du routage des aéronefs contrôlables et de l'algorithme WHCA*, ainsi que la fiabilité de l'affichage en temps réel des données de performance environnementale. Trois scénarios sont ensuite analysés et comparés : un scénario de référence représentant une journée complète d'opérations sans contrainte à CYUL, un scénario avec fermeture de la voie de circulation A4, et un scénario imposant un passage obligatoire par la station de dégivrage pour la moitié des départs. Pour chacun d'eux, la distribution spatiale du trafic, les temps de roulage et la consommation de carburant avec les émissions associées sont examinés, avant d'être comparés entre eux dans une synthèse commune. Le chapitre se termine par une discussion qui situe les apports du simulateur par rapport aux approches existantes, interprète les résultats obtenus avec l'algorithme WHCA*, et identifie les principales limites du modèle ainsi que les sources d'incertitude qui en découlent.

3.1 Validation fonctionnelle du simulateur

Avant d'aborder les analyses de scénarios complets, le simulateur doit être validé sur le plan fonctionnel. Cette validation est effectuée sur les quatre fonctionnalités principales du modèle : le jeu de trajectoires ADS-B, les aéronefs contrôlables sur un scénario simple, l'algorithme WHCA* et l'affichage en temps réel des données environnementales. Ainsi, on confirme que chaque composante de la simulation fonctionne correctement et que les résultats sont cohérents avec les comportements attendus. Cette partie constitue la base des interprétations pour les résultats des sections suivantes.

3.1.1 Validation du simulateur par le rejeu des trajectoires ADS-B

Le premier volet de validation concerne le rejeu des trajectoires historiques. Les données ADS-B issues du réseau OpenSky (Schäfer *et al.*, 2014) sont la source principale utilisée pour la reconstruction des trajectoires. La Figure 3.1 est un exemple de rejeu simultané de plusieurs trajectoires historiques dans l'environnement UE5. Afin d'améliorer la lisibilité de la scène en vue du dessus, les aéronefs sont affichés en bleu et leur échelle est quatre fois supérieure à leur taille réelle. Les trajectoires reproduites sont géométriquement cohérentes avec le réseau de voies de circulation de CYUL. Chaque aéronef suit les segments du graphe, y compris dans les zones où les voies sont très proches les unes des autres. Cela confirme que le simulateur reconstruit correctement les trajectoires à partir des données *.csv brutes.

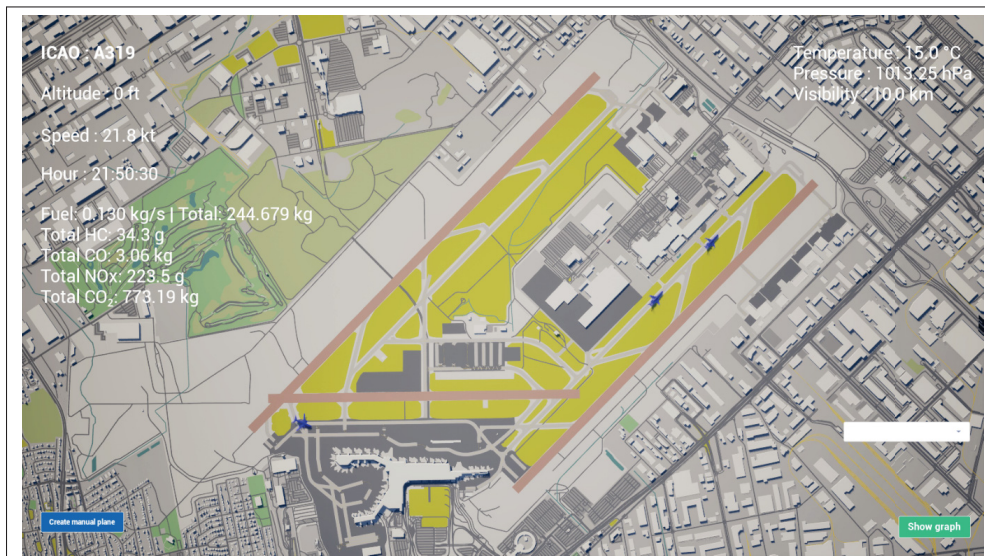


Figure 3.1 Rejeu dans le simulateur de trajectoires issues de données ADS-B

Cette fonctionnalité permet d'analyser des scénarios passés spécifiques comme des périodes de pointe, de maintenance ou de congestion pour évaluer leur impact sur les stratégies de routage. Ainsi, il est possible de comparer les choix opérationnels effectués lors de différentes journées ou situations et optimiser les opérations de surface à partir de données réelles.

3.1.2 Routage d'aéronefs contrôlables dans un scénario simple

La deuxième validation porte sur les aéronefs contrôlables, dont les trajectoires sont calculées en temps réel par l'algorithme de routage. Un scénario simple, présenté en Figure 3.2, impliquant 25 aéronefs en simultanée permet d'évaluer la cohérence des trajectoires produites et le respect des contraintes opérationnelles du *line graph*. Les trajectoires générées par le simulateur apparaissent cohérentes avec la structure du réseau de circulation de CYUL. Les itinéraires sont réalistes et les contraintes de virage sont correctement appliquées selon le groupe de l'aéronef.

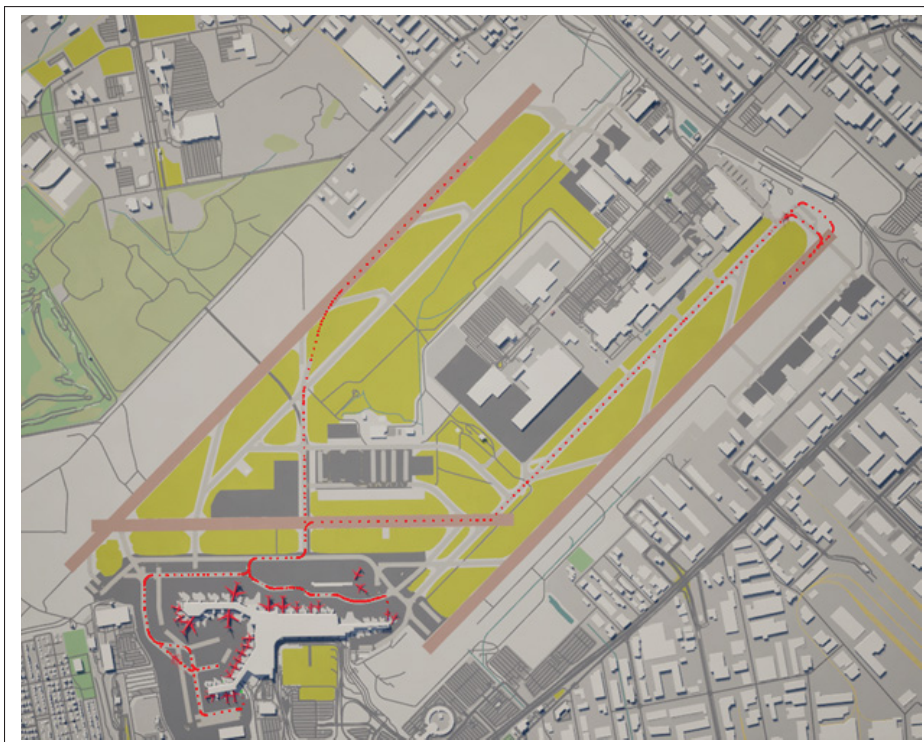


Figure 3.2 Simulation d'un scénario simple impliquant 25 aéronefs contrôlables

3.1.3 Réduction de conflit grâce à l'algorithme WHCA*

Le troisième résultat porte sur l'impact du planificateur coopératif sur les performances de routage. Dans un scénario impliquant deux aéronefs dont les trajectoires se croisent, l'algorithme A* calcule chaque route indépendamment, sans tenir compte des positions futures des autres

aéronefs. Dans des scénarios à trafic dense, cette approche conduit fréquemment à des conflits, car les plus courts chemins de plusieurs avions tendent à converger vers les mêmes intersections ou les mêmes segments de voies de circulation. À l'inverse, l'algorithme WHCA* intègre une table de réservation qui prend en compte l'occupation des nœuds sur un horizon temporel fini, ce qui réduit significativement ces conflits. La Figure 3.3 compare deux stratégies de routage obtenues en utilisant l'algorithme (a) A* et l'algorithme (b) WHCA* pour deux avions contrôlables.

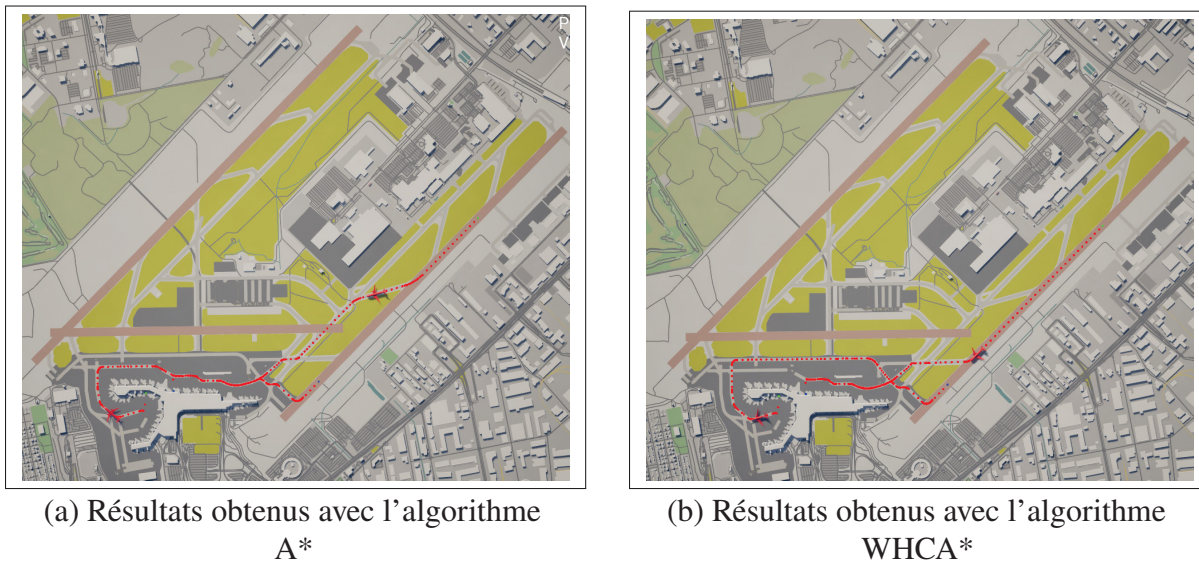


Figure 3.3 Comparaison des stratégies de routage de différents algorithmes

Dans les deux situations, les avions ont les mêmes points de départ et d'arrivée. On constate que l'algorithme A* génère deux chemins qui aboutissent à un conflit, tandis que l'algorithme WHCA* prévient cette situation en rendant indisponibles les nœuds déjà attribués à l'autre avion. Comme l'illustre la Figure 3.3(b), la seconde trajectoire est modifiée pour éviter le conflit, favorisant une circulation plus fluide. Dans le cas de l'exemple en Figure 3.3(a), l'avion de gauche a un temps de roulage d'environ 13 minutes avec une consommation de carburant de 158,3 kg. Le chemin trouvé par l'algorithme WHCA* est plus long afin d'éviter le conflit donc il augmente le temps de roulage à 19 min (+46%) et la consommation de carburant à 231,4 kg (+46%). Bien qu'il arrive que les chemins générés soient plus longs dans certains cas, éviter les

conflits reste une exigence critique pour garantir la sécurité et la fluidité du trafic au sol. Ces résultats confirment que le simulateur intègre une implémentation fonctionnelle de l'algorithme WHCA* et soulignent son potentiel pour l'optimisation des trajectoires de roulage dans des scénarios multi-aéronefs.

3.1.4 Affichage en temps réel des données de performance

Pour chaque aéronef actif dans la scène, l'ATH indique le débit de carburant ajusté W_F , la consommation totale cumulée F_{TOT} et les masses cumulées de CO , CO_2 , NO_x et HC émises depuis le début du roulage. Ces grandeurs sont calculées à l'aide de la méthode BFFM2 décrite au chapitre 2, corrigée pour les conditions atmosphériques locales de l'aéroport. D'autres paramètres sont également affichés comme la vitesse par rapport au temps, l'altitude et le cap afin de faciliter l'analyse du comportement de l'aéronef. Ainsi, il est possible d'observer en temps réel l'impact environnemental de différents scénarios de routage. Les résultats des calculs sont affichés en temps réel dans l'interface du simulateur via l'ATH.

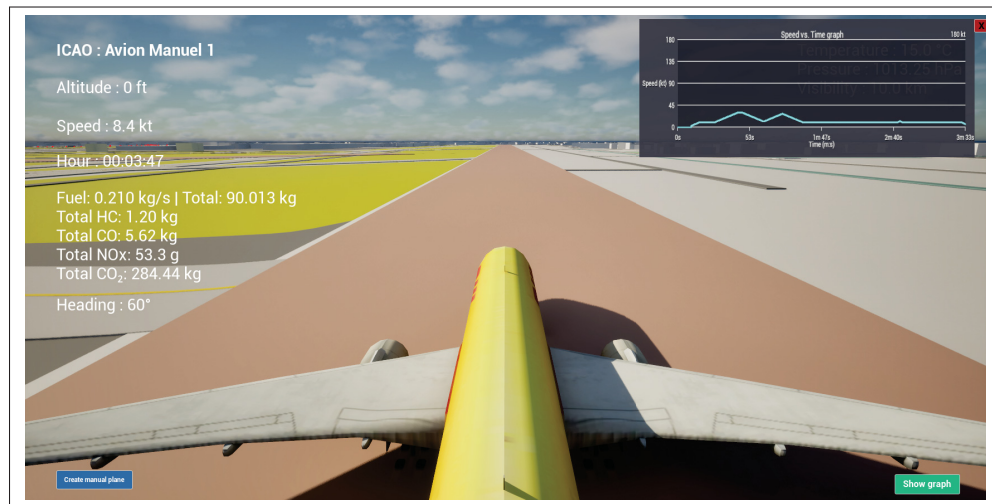


Figure 3.4 Données visibles dans l'ATH de la simulation pour chaque aéronef

Dans le cas de l'aéronef présent en Figure 3.4, la valeur de débit carburant instantané $W_F = 0,210$ kg/s correspond à un régime moteur de ralenti. Pour un aéronef de type B, ce niveau de débit est

caractéristique d'un régime au sol pour un moteur de cette catégorie, la valeur simulée est donc dans une plage réaliste (European Union Aviation Safety Agency, 2025). La consommation totale cumulée est calculée de manière uniforme pour une durée de roulage de 3 min 47 s (soit 227 s) et deux moteurs telle que :

$$F_{TOT} = 0,210 \times 227 \times 2 \approx 95 \text{ kg} \quad (3.1)$$

La valeur affichée dans l'ATH est de 90 kg. La capture d'écran présente en Figure 3.4 a été réalisée une fois l'aéronef arrêté, les calculs de consommation et d'émissions étaient alors arrêtés depuis quelques secondes. La durée de roulage effectivement prise en compte est légèrement inférieure à 3 min 47 s. Cet écart de l'ordre de 5% entre la valeur estimée et la valeur affichée est donc justifié et confirme la cohérence du modèle.

Concernant les émissions polluantes, les masses sont calculées proportionnellement à la consommation totale de carburant. Le ratio CO_2 /carburant obtenu :

$$\frac{m_{CO_2}}{F_{TOT}} = \frac{284,44}{90} \approx 3,16 \text{ kg} \quad (3.2)$$

est en accord avec le facteur d'émission théorique estimé à 3,16 kg CO_2 /kg de carburant. Les émissions de CO (5,62 kg) et de NO_x (53,3 g) sont également cohérentes avec les données de référence de la méthode BFFM2. En phase de roulage, les émissions de CO sont proportionnellement élevées par rapport aux NO_x , car les moteurs fonctionnent à faible température, favorisant une combustion incomplète. Enfin, les émissions d' HC (1,20 kg) restent faibles mais non nulles, ce qui est cohérent avec un fonctionnement à faible puissance. L'ensemble de ces résultats confirme que le modèle de calcul implémenté reproduit fidèlement les ordres de grandeur attendus lors d'une phase de roulage prolongée. L'ATH constitue également un outil de visualisation efficace pour l'analyse en temps réel de l'impact environnemental des aéronefs simulés.

La combinaison des quatre volets de validation confirme que la plateforme fonctionne correctement dans ses caractéristiques fondamentales. La section suivante présente donc les résultats d'une simulation d'une journée complète, qui constituera le scénario de référence pour les analyses comparatives.

3.2 Analyse d'une journée complète sans contrainte (scénario de référence)

Le scénario englobe 280 opérations, décollages et atterrissages confondus. Aucune perturbation n'est introduite, les aéronefs n'ont pas de contrainte de dégivrage ou de restriction de voie de circulation. Les sept heures entre 23h00 et 06h00 n'ont pas été simulées car il n'y a pas ou très peu d'activité la nuit sur l'aéroport. Ce scénario sera utilisé par la suite comme base à laquelle tous les scénarios perturbés seront comparés. Ainsi, il est possible d'établir des indicateurs de référence sur la distribution spatiale du trafic, le temps de roulage et les émissions générées dans le cas d'une journée classique.

3.2.1 Distribution spatiale du trafic

La Figure 3.5, qui superpose l'ensemble des trajectoires simulées au fond cartographique de l'aéroport, révèle une organisation du trafic au sol concentrée autour de quelques axes.

La quasi-totalité des passages se concentre sur un réseau restreint de voies confirmant que le routage par l'algorithme WHCA* est cohérent avec les contraintes opérationnelles réelles de CYUL. La zone de l'aire de stationnement, au sud-ouest proche des portes d'embarquement, constitue l'un des nœuds les plus denses de la simulation avec des cellules atteignant 10^2 passages par maille. Une densité comparable s'observe sur les voies de circulation principales desservant la piste 24R/06L. La première est la voie A, qui longe la piste afin de permettre aux aéronefs de rejoindre les points d'attente au nord-est. La seconde, la voie A4, contourne le terminal en direction de la piste 24R/06L, c'est la plus sollicitée de la journée. Ces deux axes apparaissent en teintes orange à jaune sur la Figure 3.5, soit des fréquences de passage supérieures à 10^2 mouvements par maille. Un troisième élément ressort nettement, la voie de

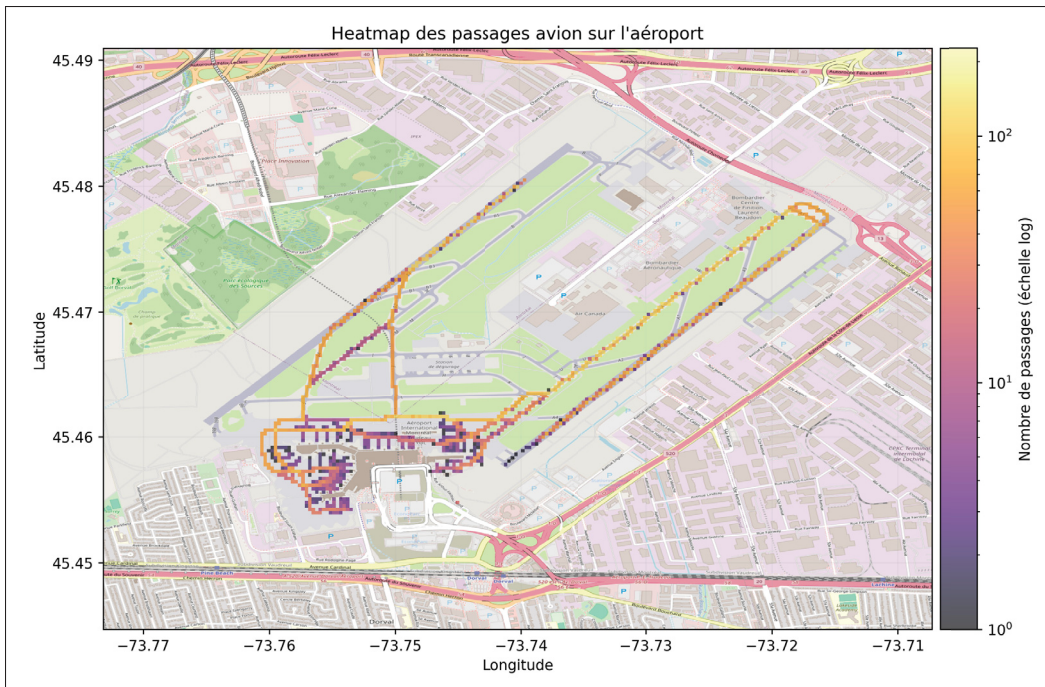


Figure 3.5 Carte de chaleur du trafic au sol de CYUL superposée sur une image satellite de Google Earth.

circulation qui encercle l'ensemble du terminal est en orange, avec des intensités comprises entre 10^1 et 10^2 passages par maille. Les aéronefs l'utilisent pour se rendre aux différentes aires de stationnement. Ces résultats s'expliquent par la géographie du terminal, dont la configuration force chaque aéronef à traverser plusieurs voies de circulation communes pour rejoindre ou quitter leurs portes d'embarquement. À l'inverse, les zones situées entre les deux pistes ou en extrémité apparaissent en teintes violettes à noires sur la Figure 3.5 (de l'ordre de 10^0 à 10^1 passages par maille). Elles ne sont utilisées que par un nombre limité d'aéronefs. Cette asymétrie du trafic entre les axes centraux et périphériques est une caractéristique du réseau de CYUL qui conditionnera directement l'analyse du scénario perturbé.

3.2.2 Temps de roulage total et par aéronef

Le temps total cumulé de roulage sur les voies de circulation pour l'ensemble des aéronefs est de 2 469,79 minutes sur la durée de la simulation, soit une moyenne d'environ 8 minutes par

opération. La Figure 3.6 illustre cette dynamique à travers deux représentations superposées : la courbe bleue retrace la progression du temps de roulage cumulé et les barres en arrière-plan indiquent, à chaque instant, le nombre d'aéronefs simultanément en mouvement sur l'aéroport.

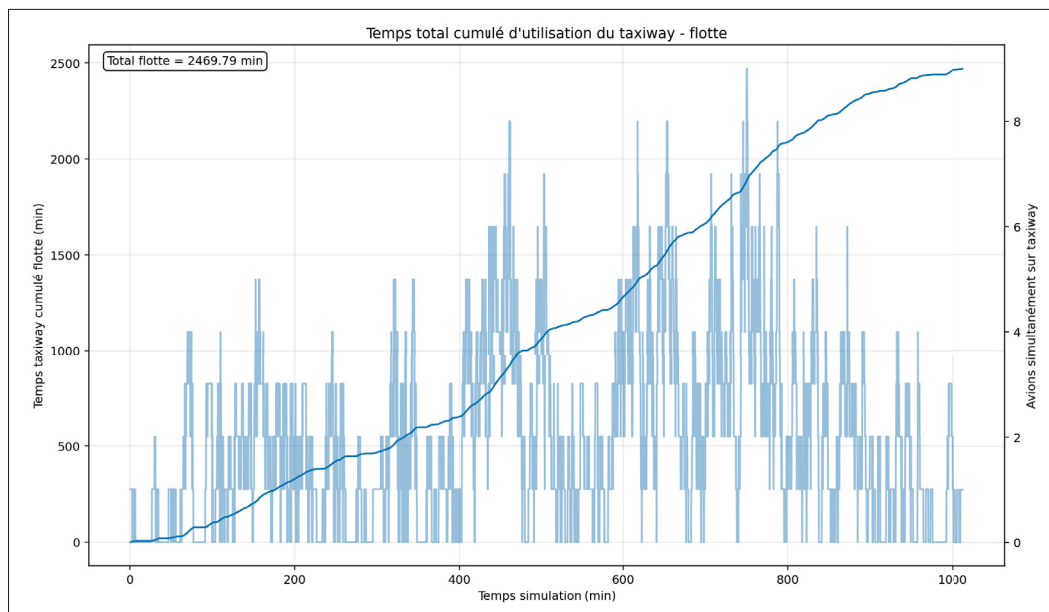


Figure 3.6 Graphique du temps total cumulé d'utilisation des voies de circulation par les aéronefs.

Trois phases d'activité ressortent. Dès les premières centaines de minutes de simulation, un premier pic atteint 3 à 4 aéronefs simultanés. Une première phase, vers $t = 400-500$ min, correspond à la pointe de mi-journée pendant laquelle il y a jusqu'à huit aéronefs en mouvement au même moment. La deuxième phase, autour de $t = 650$ min, est similaire. La troisième phase, la plus intense, est située entre $t = 750$ et $t = 800$ min environ. C'est à ce moment que l'on enregistre les valeurs maximales d'aéronefs simultanément en roulage, avec des pointes atteignant 9 aéronefs. Entre ces trois périodes de pointe, des phases creuses sont identifiables. Autour de $t = 350$ min, $t = 530$ min et $t = 950$ min où l'activité au sol est de 2 aéronefs simultanés maximum.

Les temps de roulage individuels sont quant à eux dans une plage d'environ 5 à 30 minutes, selon les aéronefs, ce qui reflète la diversité des opérations simulées et la configuration géographique de CYUL.

3.2.3 Consommation de carburant et émissions cumulées

Au terme des 17 heures, les quantités totales cumulées d'émissions polluantes générées par la flotte sont les suivantes : la consommation de carburant s'élève à environ 36 700 kg et les émissions de CO_2 atteignent 116 000 kg, tandis que le CO reste plus modeste avec environ 900 kg. Les HC et les NOx , respectivement de l'ordre de 75 kg et 180 kg, sont négligeables par rapport aux autres polluants en termes de masse, bien qu'ils présentent un intérêt environnemental disproportionné à leur quantité en raison de leur toxicité. Le rapport entre la masse de CO_2 émise et la quantité de carburant consommée est cohérent avec un facteur d'émission de l'ordre de 3,16, conformément aux données de la section 2.5.1, ce qui valide le fonctionnement interne du modèle de simulation. La Figure 3.7 présente l'évolution temporelle de ces polluants cumulés. Les courbes de CO_2 et de CO se confondent presque sur l'axe de gauche, reflétant leur couplage direct avec la consommation de carburant comme présenté dans le modèle BFFM2. Deux décélérations sont notables autour de $t = 350$ min et $t = 530$ min, ces paliers coïncident avec les phases creuses d'activités identifiées à la section 3.2.2. Le redémarrage des courbes après chaque palier correspond aux reprises de trafic qui suivent les périodes creuses.

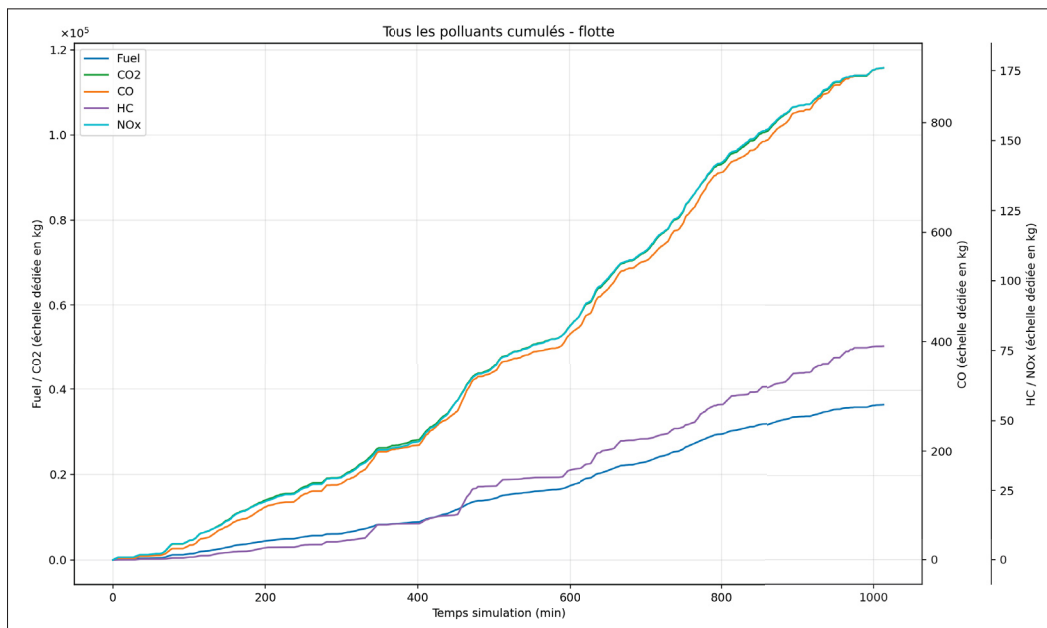


Figure 3.7 Graphique de l'évolution des polluants cumulés en fonction du temps de simulation

Spatialement, la Figure 3.8 confirme que la consommation de carburant et, par extension, les émissions sont inégalement réparties sur l'aéroport. Les valeurs les plus élevées, qui atteignent 10^2 kg par maille sur l'échelle logarithmique, se concentrent autour des terminaux et des bretelles de sortie de piste côté Est. Les axes de roulage principaux (Nord-Sud) présentent des valeurs intermédiaires de l'ordre de 10^1 kg par maille, tandis que les zones en bordure de piste, traversées plus rapidement, affichent des intensités plus faibles. Cette distribution souligne que la concentration de polluants est significativement plus élevée au niveau des terminaux, là où les aéronefs passent le plus de temps avec le moteur allumé à basse puissance.

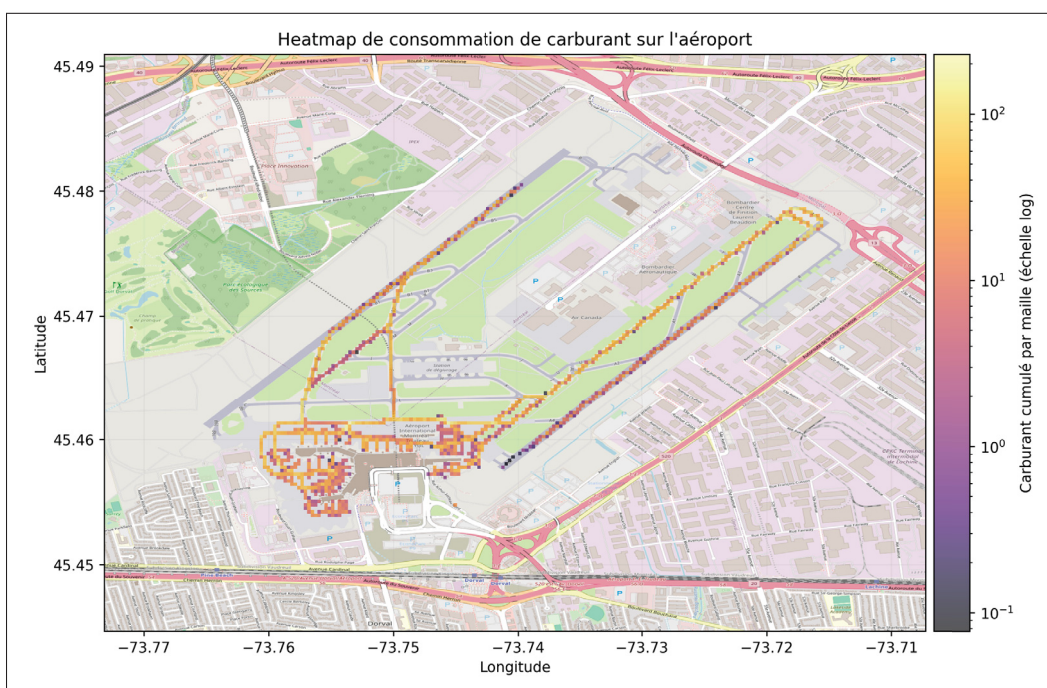


Figure 3.8 Carte de chaleur de la consommation de carburant totale après une journée de simulation

3.3 Analyse du scénario avec fermeture d'une voie de roulage

Dans ce second scénario, le plan de vol reste strictement identique à celui du scénario de référence mais une perturbation est introduite. Les 280 opérations sont maintenues, les mêmes aéronefs opèrent selon les mêmes horaires mais une voie de roulage est fermée pour la durée totale de la simulation. Cela permet d'isoler l'effet de la fermeture de toute autre source de

variabilité. Ainsi, une comparaison directe avec les résultats établis à la section précédente est établie.

3.3.1 Identification de la voie critique et justification du choix

Le choix de la voie de circulation à fermer repose directement sur l'analyse de la distribution du trafic réalisée dans le scénario de référence. Comme le montrait la Figure 3.5, le réseau de roulage de CYUL n'est pas uniforme dans son utilisation. La quasi-totalité des flux converge vers un nombre limité d'axes qui assurent la liaison entre la zone de l'aire de stationnement et les seuils de piste. Parmi ces axes, la zone d'intersection A4, identifiée comme nœud de convergence majeur dans l'analyse du scénario de référence, apparaît comme un maillon critique du réseau. C'est donc ce segment qui a été sélectionné pour la fermeture.

D'une part, la charge de trafic supportée par cette zone dans le scénario de référence en fait le point de vulnérabilité maximal. Supprimer une voie aussi sollicitée force une redistribution de grande ampleur des trajectoires. Ainsi, le cas de perturbation le plus discriminant est étudié pour l'évaluation comparative. D'autre part, cette voie correspond à un scénario réaliste d'exploitation car une inspection de piste non planifiée, un incident de surface ou des travaux de courte durée sont des événements récurrents en hiver où les cycles de gel-dégel dégradent les surfaces de manœuvre. Ce scénario représente une situation à laquelle les exploitants de CYUL sont régulièrement confrontés.

3.3.2 Redistribution du trafic et nouvelles zones de congestion

Afin d'analyser la redistribution du trafic à la suite de la fermeture du segment A4, les cartes de chaleurs du trafic au sol des deux scénarios sont comparées. Sur la Figure 3.5, les zones les plus denses étaient les voies vers les pistes au Nord et celles vers les zones de stationnement. Comme le montre la Figure 3.9, la fermeture de la voie A4, encadrée sur la carte de chaleur, oblige l'algorithme WHCA* à réorganiser le trafic.

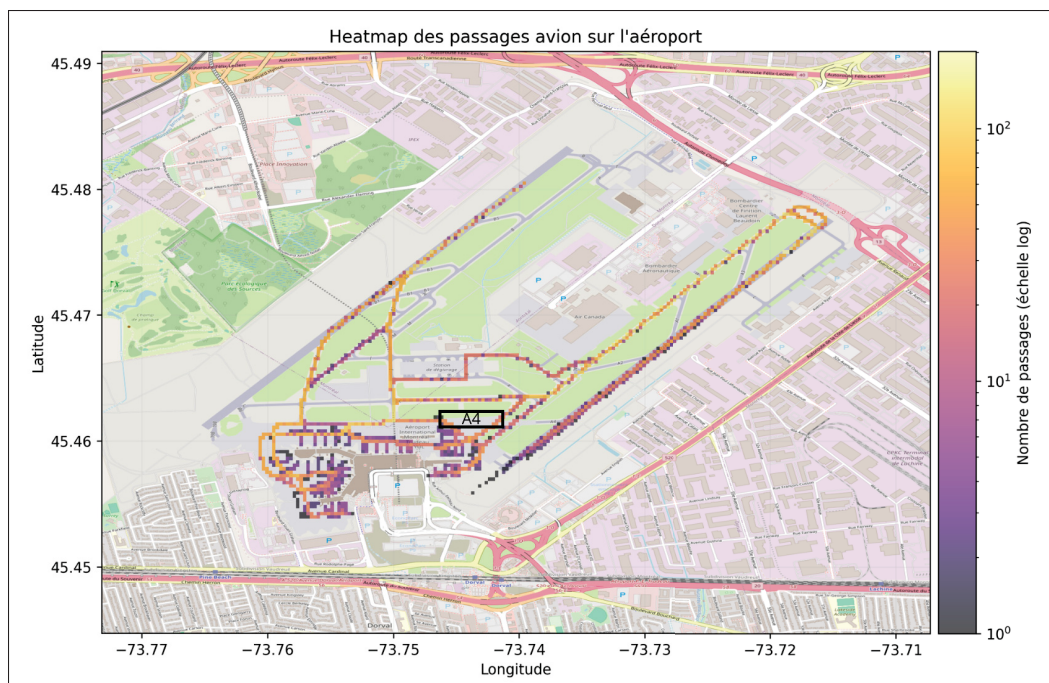


Figure 3.9 Carte de chaleur du trafic au sol de CYUL pour le scénario avec fermeture de la voie A4

Le changement le plus notable est l'interruption du trafic entre la zone de stationnement et la piste 24R/06L, directement lié à la fermeture de la voie A4. Sur la carte de chaleur du scénario perturbé, la zone représentant la voie A4 n'est plus colorée, confirmant que les aéronefs n'y circulent plus. Un nouvel axe de contournement se dessine donc plus au nord, en direction des voies C et J. Ces segments représentaient un trafic de l'ordre de 10^0 à 10^1 passages par maille dans le scénario de référence. Ici, leur intensité est montée entre 10^1 et 10^2 passages par maille. Cela signifie que la quasi-totalité des aéronefs qui empruntaient la A4 ont été réorientés vers ces nouvelles voies. Cette déviation entraîne des conséquences directes sur la répartition globale des flux et impacte les temps de roulage.

3.3.3 Impact sur les temps de roulage

L'effet de la fermeture de la voie sur le temps de roulage se lit dans la Figure 3.10. Le temps total cumulé d'utilisation des voies de circulation par l'ensemble de la flotte est de 3 679,52

minutes, contre 2 469,79 minutes dans le scénario de référence, soit une augmentation de plus de 1 209,73 minutes. Il y a donc une hausse de 49,0 % du total de référence. Cette augmentation de près de moitié pour un scénario où une seule voie est supprimée illustre l'effet multiplicateur d'une perturbation ponctuelle sur un réseau agencé comme celui de CYUL.

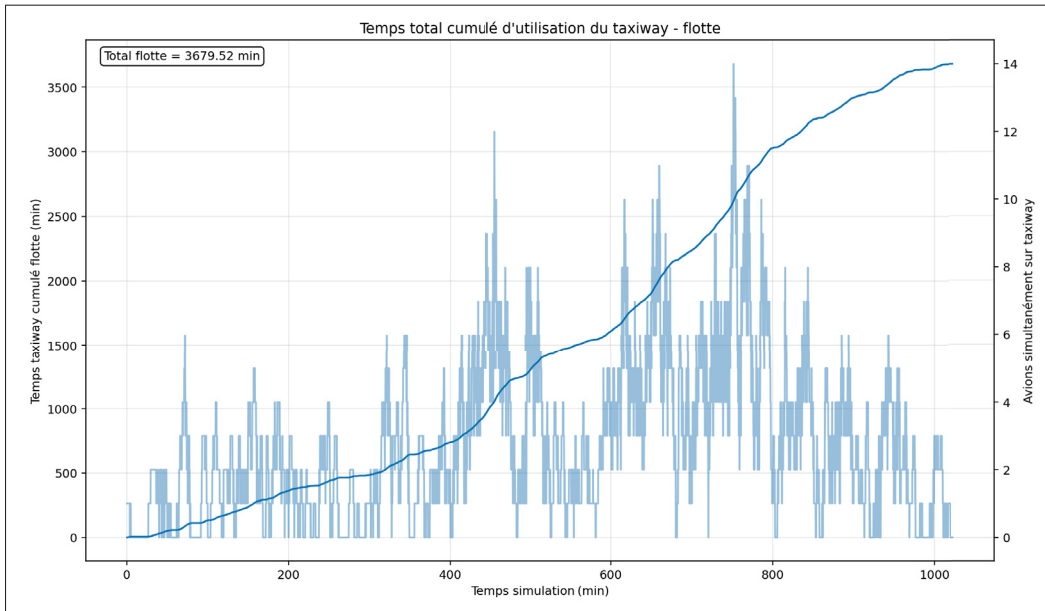


Figure 3.10 Graphique du temps total cumulé d'utilisation des voies de circulation pour le scénario avec fermeture de la voie A4

La courbe cumulative de la Figure 3.10 montre que cette augmentation ne s'est pas constituée uniformément au fil de la journée. Jusqu'à $t = 350$ min, la progression reste comparable à celle du scénario de référence, avec une activité encore peu dense. C'est à partir de $t = 400$ min que la pente de la courbe s'accroît nettement et ne se stabilise plus. Les itinéraires de substitution commencent à saturer sous les effets de l'augmentation du trafic et de l'allongement des trajets imposé par la fermeture de la voie A4. Cette hausse coïncide avec la première grande phase de pointe identifiée dans le scénario de référence mais là où celle-ci se résorbait naturellement, elle se prolonge dans le scénario perturbé. Le nombre maximal d'aéronefs simultanément en roulage atteint 14 unités vers $t = 750$ min, contre 9 dans le scénario de référence, soit une augmentation de 56% du taux d'occupation simultané du réseau. Ce pic correspond à une période

de congestion sévère durant laquelle le risque de conflit est élevé. Lorsque l'on regarde l'analyse de la distribution des temps de roulage par aéronef, la majorité d'entre eux affiche des temps de roulage compris entre 10 et 30 minutes, ce qui est similaire au scénario de référence. Cependant, l'aéronef le plus pénalisé cumule environ 55 minutes de roulage sur la journée soit près du double du maximum observé dans le scénario de référence. Le second dépasse 50 minutes et plusieurs autres aéronefs se situent autour de 40 minutes.

Ces valeurs extrêmes s'expliquent par la position des aires de stationnement de ces aéronefs qui dépendaient directement de la voie A4 pour accéder à la piste, les forçant à emprunter des détours particulièrement longs. Ces détours ont généré des situations de conflit que l'algorithme WHCA* ne peut résoudre qu'en imposant un temps d'attente prolongé à un des deux aéronefs en conflit. Ces cas isolés représentent une limite connue de l'algorithme dans un scénario perturbé et ne remettent pas en cause la validité des résultats sur toute la flotte. Ils soulignent que la fermeture de la voie A4 introduit une inégalité dans la redistribution du trafic entre les aéronefs selon leur porte d'embarquement.

3.3.4 Impact environnemental de la fermeture

L'allongement du temps de roulage constaté à la section précédente se répercute directement sur les quantités de polluants émises, comme le montre la Figure 3.11. Au terme de la simulation, la consommation de carburant s'élève à environ 57 600 kg, contre 36 700 kg dans le scénario de référence, soit une augmentation d'environ 20 900 kg (+57%). Les émissions de CO₂ progressent également passant de 116 000 kg à environ 182 000 kg, une hausse d'environ 66 000 kg (+57%). Ces chiffres représentent un surcoût environnemental important, généré uniquement par la réorganisation des itinéraires au sol car aucun vol supplémentaire n'a été ajouté à la planification. La Figure 3.11 montre l'impact de la fermeture de la voie A4 au fil de la journée. Contrairement au scénario de référence, dans lequel deux paliers distincts coïncidaient avec les phases creuses, les courbes du scénario perturbé progressent de manière quasi-continue. La congestion imposée par le détour via les voies C et J maintient un flux d'émissions constant même dans les intervalles qui correspondaient à des accalmies en conditions normales. La pente de la courbe s'accroît

progressivement à partir de $t = 400$ min et reste élevée jusqu'à $t = 850$ min, reflétant la période de saturation détaillée dans la section précédente. De plus, la courbe cumulative des *HC* est plus prononcée et régulièrement croissante à partir de $t = 400$ min par rapport au scénario de référence. Cela s'explique par les attentes prolongées imposées par les situations de conflit sur les itinéraires de substitution.

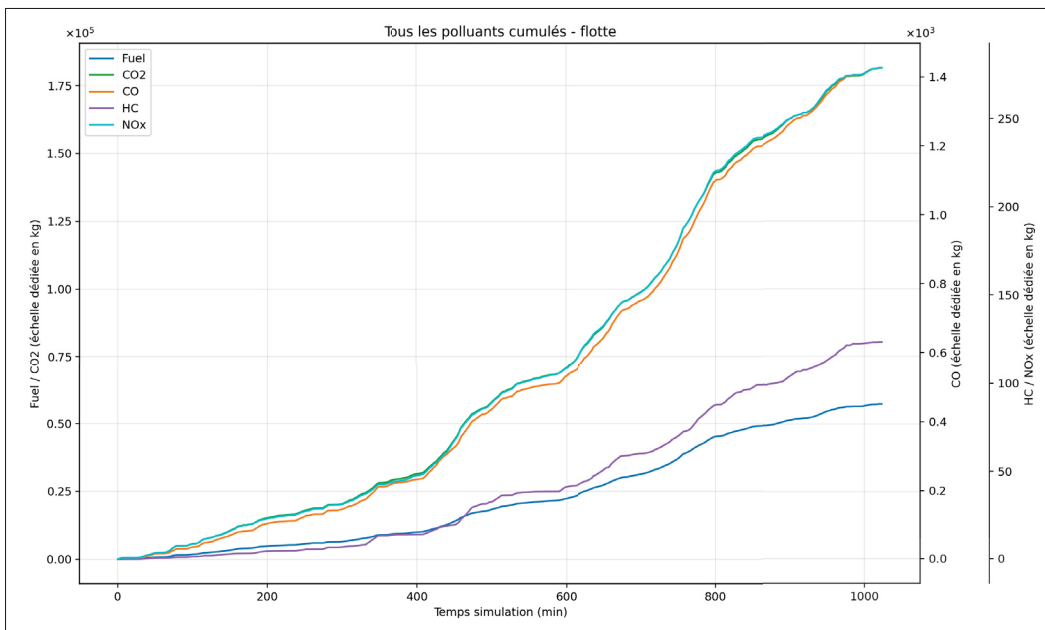


Figure 3.11 Graphique de l'évolution des polluants cumulés en fonction du temps de simulation pour le scénario avec fermeture de la voie A4

Spatialement, la Figure 3.12 confirme que la redistribution des flux documentée à la section 3.3.2 se traduit directement dans la redistribution de la consommation de carburant. Les valeurs les plus intenses restent concentrées autour des aires de stationnement du terminal et des bretelles de sortie Est, comme dans le scénario de référence. Cependant, les voies C et J, complètement inutilisées dans le scénario de référence, affichent désormais des intensités orange de l'ordre de 10^1 à 10^2 kg par maille. Ce changement est le résultat direct de la fermeture de la voie A4. Ces voies, ne présentant auparavant aucune émission, deviennent des zones d'exposition significatives pour le personnel au sol qui y opèrent. À l'inverse, la zone correspondant à la voie

A4 fermée présente des mailles vides cohérentes avec l'absence de trafic documentée sur la Figure 3.9.

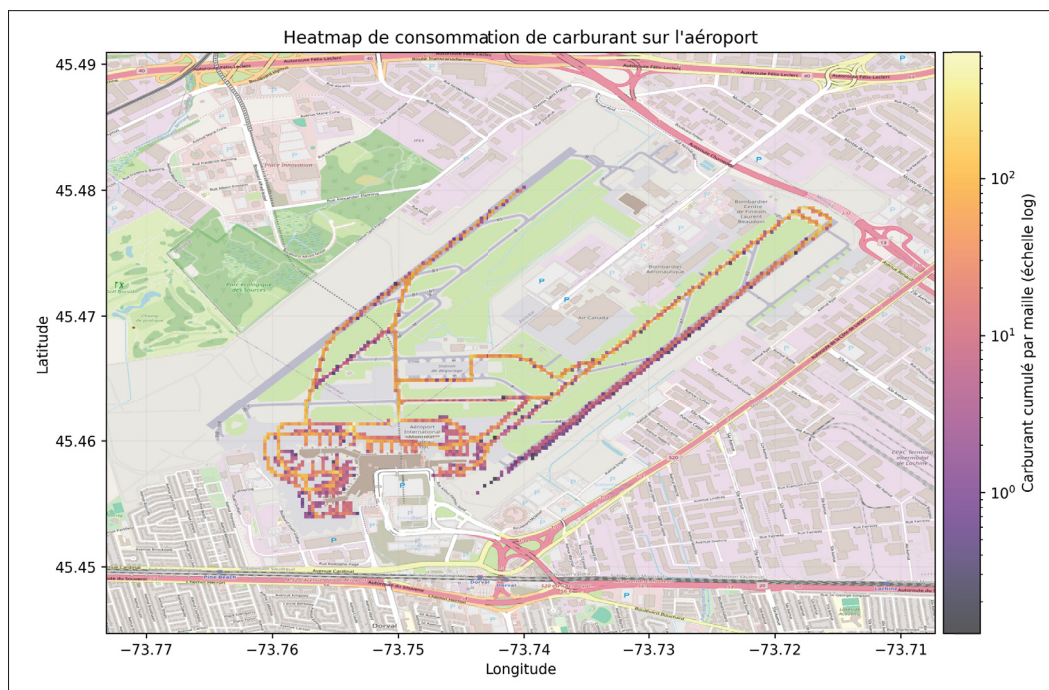


Figure 3.12 Carte de chaleur de la consommation de carburant pour le scénario avec fermeture de la voie A4

3.4 Analyse du scénario avec passage obligatoire au dégivrage (50% des départs)

Dans ce troisième scénario, le plan de vol reste strictement identique à celui du scénario de référence, mais une contrainte opérationnelle hivernale est introduite. Chaque aéronef au départ a une probabilité de 50% de devoir effectuer un passage par la station de dégivrage avant de rejoindre sa piste de décollage (paramètre `p_oui_départ`, section 2.4.1). Le dégivrage est d'une durée fixe de 30 minutes par aéronef. Les 280 opérations et les mêmes horaires sont maintenus, seule cette contrainte est ajoutée, ce qui permet une comparaison directe avec les résultats établis aux sections précédentes.

Contrairement au scénario de fermeture de la voie A4, qui supprimait complètement un segment du réseau, ce troisième scénario n'interdit aucune voie de circulation existante. Il introduit plutôt

un point de passage additionnel obligatoire pour la moitié des départs, qui doivent immobiliser l'aéronef à la station de dégivrage avant de poursuivre vers la piste. Sur les 134 aéronefs simulés, 68 présentent effectivement une phase de dégivrage, soit une proportion de 50,7%, ce qui confirme que la contrainte a été appliquée conformément à la planification. Ce type de perturbation permet d'évaluer un cas concret et récurrent en période hivernale à CYUL, où le dégivrage est une étape obligatoire avant le décollage pour une part importante des vols.

3.4.1 Redistribution spatiale du trafic vers la station de dégivrage

Après avoir quitté l'aire de stationnement, les aéronefs soumis au dégivrage empruntent un embranchement menant directement à la station de dégivrage. Une fois dégivrés, ils rejoignent l'un ou l'autre des axes principaux de sortie pour continuer vers leur seuil de piste. Si la capacité maximale de la station est atteinte, l'aéronef attend à sa porte qu'une place se libère. Ce comportement contraste avec celui observé dans le scénario de référence (section 3.2.1), où les aéronefs empruntaient directement la voie A4 puis la voie A sans interruption intermédiaire.

Comparée à la Figure 3.5 du scénario de référence, où la zone de la station de dégivrage n'affichait pratiquement aucun passage, la Figure 3.13 met en évidence l'apparition d'une nouvelle aire de trafic isolée de la boucle principale entourant le terminal. Cette redistribution des trajectoires se répercute, à l'échelle de la flotte, sur la répartition spatiale du trafic. La voie de circulation *E* relie désormais l'aire de stationnement à la station de dégivrage, alors qu'elle ne représentait qu'un trafic résiduel de l'ordre de 10^0 à 10^1 passages par maille dans le scénario de référence. Son intensité atteint ici 10^1 à 10^2 passages par maille, un ordre de grandeur comparable à celui des axes principaux tels que la voie A4.

Bien que ce détour vers la voie *E* demeure relativement modeste à l'échelle d'un seul aéronef, il se concentre entièrement sur une zone étroite du réseau, ce qui explique l'intensité observée sur la carte de chaleur à cet endroit. En effet, les 68 aéronefs soumis au dégivrage empruntent tous ce couloir avant de rejoindre la station de dégivrage.

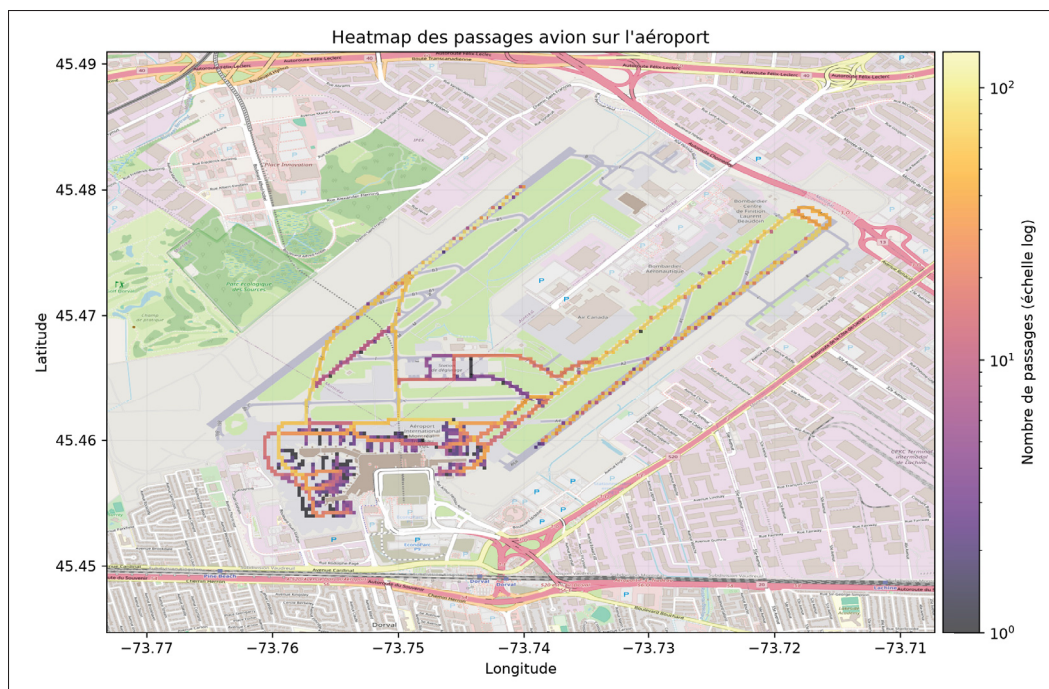


Figure 3.13 Carte de chaleur du trafic au sol de CYUL pour le scénario avec passage obligatoire au dégivrage

En dehors de ce nouvel embranchement, la structure générale du réseau reste globalement similaire à celle du scénario de référence. Les voies *A4* et *B2*, ainsi que la voie qui encercle le terminal, conservent des intensités comparables à celles observées à la section 3.2.1 car les aéronefs non soumis au dégivrage continuent d’emprunter ces voies de circulation sans déviation. Contrairement à la fermeture de la voie *A4*, qui forçait une réorganisation de l’ensemble des flux vers des voies périphériques auparavant inutilisées (voies *C* et *J*, section 3.3.2), la contrainte de dégivrage ne redistribue pas le trafic à l’échelle du réseau. Elle concentre plutôt l’ensemble de la perturbation sur un unique point de passage obligatoire susceptible de limiter localement la fluidité du trafic. Cette caractéristique oriente directement l’analyse de la section suivante, consacrée à l’impact de cette concentration sur le temps de roulage et la congestion au niveau de la station.

3.4.2 Impact sur le temps de roulage et congestion à la station de dégivrage

L'effet du passage obligatoire au dégivrage sur le temps de roulage se lit dans la Figure 3.14. Le temps total cumulé d'utilisation des voies de circulation par l'ensemble de la flotte est de 4 616,52 minutes, contre 2 469,79 minutes dans le scénario de référence, soit une augmentation de 2 146,73 minutes (+86,9 %). Cette hausse dépasse largement celle observée pour le scénario de fermeture de la voie A4 (+49,0 %), alors qu'aucune voie n'est pourtant retirée du réseau dans le cas présent. Une première explication tient à la position de la station de dégivrage elle-même, éloignée des principales voies de circulation. Chacun des 68 aéronefs sur 134 devant transiter par cette station effectue un détour systématique à l'aller comme au retour, ce qui allonge la distance de roulage de chaque aéronef concerné. Il faut toutefois noter que l'indicateur de temps de roulage utilisé ici comptabilise également le temps passé par un aéronef à patienter dans la file d'attente de la station, et non uniquement son temps de déplacement effectif. L'augmentation du temps de roulage résulte donc à la fois des détours systématiques et du temps d'immobilisation accumulé à la porte.

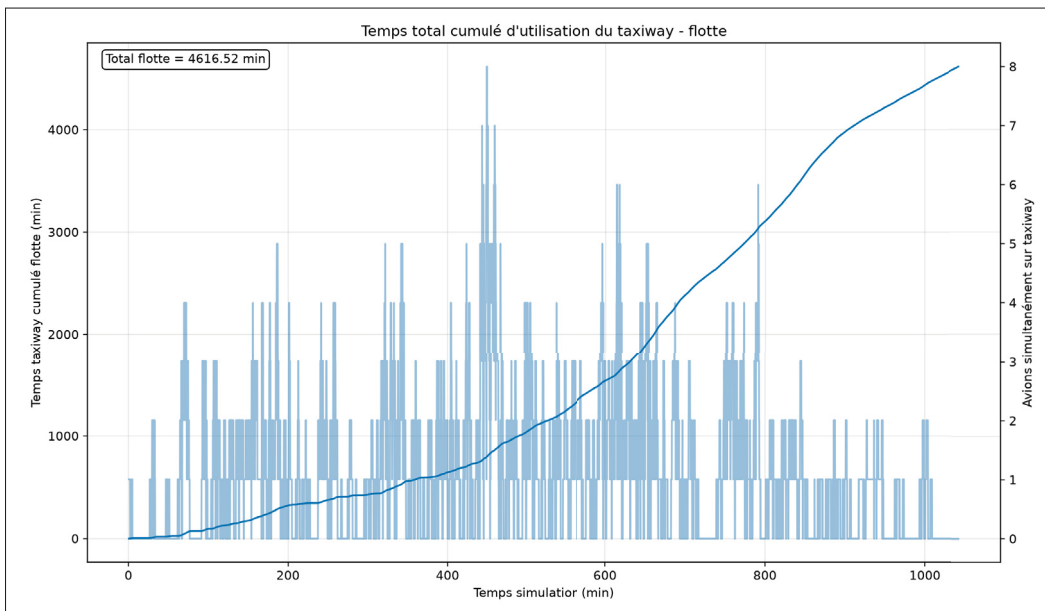


Figure 3.14 Graphique du temps total cumulé d'utilisation des voies de circulation pour le scénario avec dégivrage

Un autre résultat ressort de la courbe de la Figure 3.14, qui présente le nombre d'aéronefs simultanément en roulage. Le maximum observé est de huit aéronefs, vers $t = 450$ min, soit une valeur inférieure au maximum de neuf aéronefs du scénario de référence et nettement inférieure aux 14 aéronefs du scénario de fermeture de la voie A4. Autrement dit, la congestion générée par le dégivrage ne se traduit pas par une intensification du trafic en mouvement sur le réseau de voies de circulation, contrairement à ce qui avait été observé à la section 3.3.3. La congestion ne se situe donc pas sur les voies de circulation mais aux portes d'embarquement, où les aéronefs s'immobilisent en attendant qu'un poste de traitement se libère. Cette immobilisation n'est pas comptabilisée comme du roulage actif dans le décompte des aéronefs simultanément en mouvement, ce qui explique pourquoi l'augmentation du temps de roulage cumulé ne s'accompagne pas d'une hausse du nombre d'aéronefs simultanément en déplacement.

Deux aéronefs se distinguent toutefois par un temps d'immobilisation nettement supérieur à la moyenne. Leur horodatage final coïncide exactement avec l'instant de fin de la journée simulée. Une vérification a permis d'établir que ce comportement ne correspond pas à une file d'attente réaliste, mais à une anomalie de simulation. Ces deux aéronefs sont entrés en collision sur le réseau de voies de circulation, ce qui les a empêché de reprendre leur roulage normalement. Il s'agit donc d'une erreur identifiée du modèle plutôt que d'un résultat représentatif du comportement des aéronefs dans ce scénario. Les valeurs extrêmes associées à l'anomalie de simulation ont été exclues de l'interprétation. La correction de cette anomalie constitue une piste d'amélioration pour une version future du modèle.

Ces résultats démontrent que la contrainte de dégivrage, bien qu'elle ne modifie pas la topologie du réseau de voies de circulation comme le fait la fermeture de la voie A4, engendre tout de même une congestion. Elle sature une voie unique, la voie *E*, dont la capacité de traitement ne suit pas la demande car la moitié de la flotte doit y transiter. Il en résulte une file d'attente qui s'allonge tout au long de la journée, se traduisant à la fois par une hausse du temps de roulage cumulé et par des temps d'immobilisation individuels croissants pour les aéronefs traités en dernier. La section suivante examine comment cette accumulation se traduit sur le plan de la consommation de carburant et des émissions polluantes générées à proximité de la station.

3.4.3 Impact environnemental et concentration à la station de dégivrage

La congestion identifiée à la section précédente se répercute directement sur les quantités de polluants émises, comme le montre la Figure 3.15. Au terme de la simulation, la consommation de carburant s'élève à environ 80 000 kg, contre 36 700 kg dans le scénario de référence (section 3.2.3), soit une augmentation d'environ 43 300 kg (+118%). Cette hausse se traduit par des émissions de CO_2 d'environ 252 800 kg, contre 116 000 kg dans le scénario de référence, soit une progression du même ordre (+118%). Cette augmentation dépasse largement celle enregistrée pour le scénario de fermeture de la voie A4 (+57% pour le carburant), alors que le trafic en mouvement y était pourtant moins dense, avec un maximum de huit avions simultanément en roulage contre 14 dans le scénario de fermeture (section 3.4.2). Ce résultat confirme que l'essentiel du surcoût environnemental ne provient pas d'une intensification du trafic mais du temps d'immobilisation moteur allumé accumulé par les avions en attente de dégivrage.

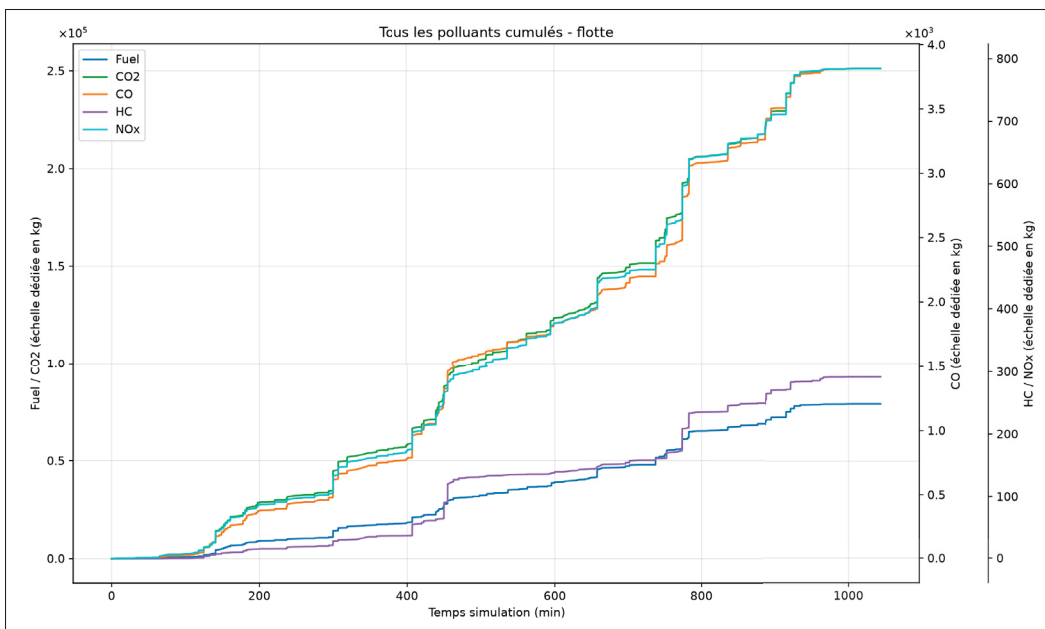


Figure 3.15 Graphique de l'évolution des polluants cumulés en fonction du temps de simulation pour le scénario avec dégivrage

La forme des courbes de la Figure 3.15 diffère nettement de celle observée dans les deux scénarios précédents. Plutôt qu'une progression continue ou par paliers liés aux phases creuses d'activité, les courbes de carburant et de CO_2 présentent une succession de sauts abrupts, particulièrement rapprochés entre $t = 650$ min et $t = 900$ min. Ces sauts ne traduisent pas un relâchement ponctuel de carburant mais une concentration de l'activité d'attente car la capacité limitée de la station de dégivrage force plusieurs aéronefs à s'accumuler simultanément en file d'attente pendant les périodes de forte demande, chacun consommant du carburant pendant cette immobilisation. Lorsque plusieurs aéronefs rejoignent ou stationnent dans la file en même temps, leurs consommations respectives s'additionnent en parallèle, ce qui élève brusquement la pente de la courbe cumulée, avant qu'elle ne s'aplatisse à nouveau lorsque peu d'aéronefs sont en attente simultanément. La courbe des HC illustre ce phénomène de façon encore plus marquée avec un saut isolé et particulièrement abrupt vers $t = 450$ min, suivi d'un second vers $t = 780$ min. Ces deux fenêtres coïncident avec les pics de congestion à la station de dégivrage identifiés à la section 3.4.2.

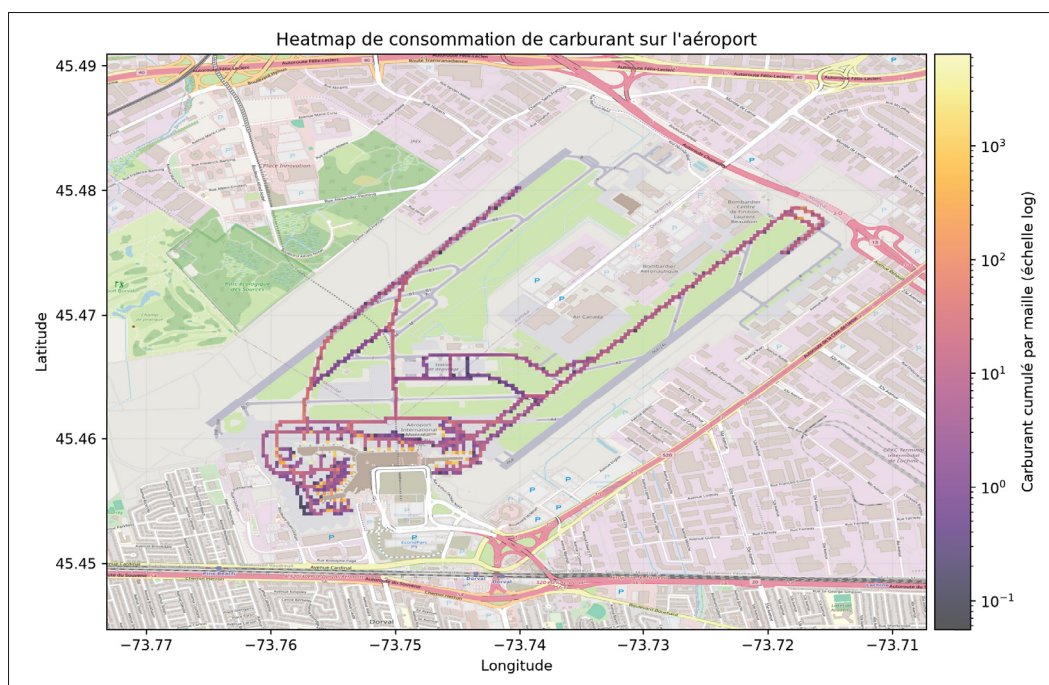


Figure 3.16 Carte de chaleur de la consommation de carburant pour le scénario avec dégivrage

Spatialement, la Figure 3.16 confirme que la répartition générale de la consommation de carburant autour du terminal et des bretelles de sortie Est demeure globalement similaire à celle du scénario de référence pour les aéronefs non soumis au dégivrage. On observe toutefois, au niveau des portes d'embarquement, des intensités atteignant 10^3 kg par maille, soit un ordre de grandeur au-dessus du maximum de 10^2 kg par maille observé dans le scénario de référence. Cette différence s'explique par la capacité de traitement limitée de la station de dégivrage. Lorsque l'ensemble des postes de traitement est occupé, les aéronefs devant être dégivrés patientent à leur porte, moteur allumé, en attendant qu'un poste se libère.

Ces résultats montrent que le dégivrage a un impact environnemental plus important que la fermeture de la voie A4, mais pour une raison différente. Contrairement à la fermeture de voie, le scénario avec dégivrage ne redistribue pas les émissions sur l'ensemble du réseau mais les concentre à un endroit précis et sur une période donnée. La section suivante compare l'ensemble des indicateurs des trois scénarios afin d'identifier les tendances communes et les particularités de chaque type de perturbation.

3.4.4 Synthèse comparative des trois scénarios

Les résultats des trois scénarios simulés sur la même journée de trafic sont regroupés dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Synthèse comparative des indicateurs clés pour les trois scénarios simulés

Indicateur	Référence	Fermeture A4	Dégivrage
Temps de roulage total cumulé (min)	2 469,79	3 679,52	4 616,52
Variation par rapport à la référence	–	+49,0 %	+86,9 %
Nombre max d'aéronefs simultanés en roulage	9	14	8
Consommation de carburant (kg)	36 700	57 600	80 000
Variation du carburant	–	+57 %	+118 %
Émissions de CO_2 (kg)	116 000	182 000	252 800
Variation des émissions de CO_2	–	+57 %	+118 %

Le premier constat est que les deux scénarios perturbés entraînent une hausse du temps de roulage et des émissions par rapport à la référence, sans qu'aucun vol supplémentaire n'ait été ajouté à la planification. Ce résultat confirme que l'organisation du réseau de circulation au sol, indépendamment du volume de trafic aérien, constitue un levier déterminant de la performance environnementale d'un aéroport. Le second constat est que la contrainte de dégivrage génère un surcoût environnemental supérieur à celui de la fermeture de la voie A4 (+118 % contre +57 % pour le carburant) alors que le nombre maximal d'aéronefs simultanément en roulage y est pourtant le plus faible des trois scénarios (8 aéronefs, contre 9 dans la référence et 14 pour la fermeture). Ce résultat montre que le nombre d'aéronefs en mouvement ne suffit pas à prédire l'impact environnemental d'une perturbation.

La fermeture de la voie A4 (section 3.3) est une perturbation topologique qui retire un segment du réseau et force une redistribution du trafic vers des voies périphériques auparavant sous-utilisées (voies *C* et *J*, section 3.3.2). L'ensemble de la flotte est concerné, mais chaque aéronef individuellement ne subit qu'un détour relativement court. À l'inverse, la contrainte de dégivrage (section 3.4) est une perturbation opérationnelle qui n'affecte pas la topologie du réseau mais impose un point de passage obligatoire. Ainsi, le temps de roulage cumulé, qui comptabilise autant le temps de déplacement que le temps d'immobilisation, augmente davantage sous la contrainte de dégivrage, sans que cela se traduise par une hausse comparable du trafic en mouvement simultané.

Cette distinction se retrouve également sur le plan spatial. La fermeture de la voie A4 diffuse les émissions sur de nouveaux axes du réseau (section 3.3.4), alors que le dégivrage les concentre à un seul endroit. Les deux perturbations ont donc un impact différent, la fermeture dégrade légèrement l'ensemble du réseau, tandis que le dégivrage crée un point de concentration sévère mais localisé. Ces trois scénarios démontrent la capacité du simulateur à reproduire des dynamiques opérationnelles de nature différente au sein d'un même environnement, ce qui répond aux objectifs de recherche énoncés à la section 1.4. La section suivante situe ces apports par rapport aux approches existantes présentées au chapitre 1.

3.5 Discussion

Ce chapitre a présenté la validation du simulateur ainsi que l'analyse de trois scénarios de simulations variés : une journée de référence sans perturbation (section 3.2), une fermeture de voie de circulation (section 3.3) et un passage obligatoire au dégivrage (section 3.4). Cette section propose une discussion de ces résultats. Elle situe d'abord les apports du simulateur par rapport aux approches existantes présentées au chapitre 1, avant d'interpréter le comportement de l'algorithme WHCA* face aux différents types de contraintes testées. Elle se termine par une présentation des limites du modèle et des sources d'incertitude qui doivent être prises en compte dans l'interprétation des résultats.

3.5.1 Apports du simulateur par rapport aux approches existantes

Les résultats présentés aux sections 3.1 à 3.4 permettent de mettre en lumière les contributions du projet dans la perspective des approches existantes décrites au chapitre 1. Plus particulièrement dans le cas du cadre conceptuel établi par Wu & Mengersen (2013) qui identifie les critères essentiels pour répondre aux besoins actuels des modèles de simulation. Il est nécessaire d'intégrer plusieurs dimensions opérationnelles au sein d'un même environnement et de combiner les approches événementielles, paramétriques, d'optimisation et multi-agents à des topologies variées. Le premier apport du simulateur réside dans sa capacité à réunir, au sein d'un même environnement, des fonctionnalités jusqu'ici réparties entre plusieurs outils. Les modèles événementiels comme DELCAP (Gilsinn, 1976) offrent une estimation fiable de la capacité aéroportuaire mais ne modélisent pas les mouvements sur les voies de circulation, tandis que SOS2 (Wood *et al.*, 2009) optimise ces séquences de roulage sans tenir compte des interactions entre aéronefs et des contraintes opérationnelles. Les résultats de la section 3.1 montrent que le simulateur développé dans ce projet reproduit fidèlement des trajectoires historiques à partir de données ADS-B tout en routant simultanément des aéronefs contrôlables, contraint par les mêmes règles opérationnelles (groupes d'aéronefs, restrictions de virage, dégivrage). Cette combinaison du rejeu et de la planification dans un environnement unique n'est proposée par aucun des outils présentés au chapitre 1.

Le deuxième apport concerne la gestion des conflits multi-aéronefs, une limite reconnue des approches paramétriques et événementielles. L'algorithme WHCA* implémenté dans le simulateur intègre une table de réservation qui anticipe l'occupation future des nœuds du graphe, ce qui permet d'éviter les conflits de trajectoire que l'algorithme A* ne détecte pas. Dans le cas étudié dans la section 3.1.3., prévenir un conflit entraîne une augmentation de 46% du temps de roulage et de la consommation de carburant pour l'aéronef dévié. Le simulateur est donc capable de quantifier le coût opérationnel d'une stratégie de routage, fonctionnalité absente des travaux de Wood *et al.* (2009) sur SOS2. Ainsi, le simulateur représente des interactions dynamiques entre aéronefs que les modèles d'optimisation de routage seuls ne capturent pas.

Le troisième apport est le calcul en temps réel de la consommation de carburant et des émissions polluantes, directement lié au routage des aéronefs. Cette analyse environnementale constitue un apport spécifique au simulateur car elle est absente des modèles du chapitre 1. L'analyse comparative des scénarios de référence, de fermeture de la voie A4 et de passage obligatoire au dégivrage (sections 3.2 à 3.4) permet de traduire immédiatement une décision opérationnelle en un coût environnemental quantifié. Cela constitue un outil d'aide à la décision que ni les modèles d'optimisation ni les modèles prédictifs ne permettent à eux seuls.

Enfin, concernant le critère de Wu & Mengersen (2013), relatif à la généralisation des modèles à des topologies variées, le simulateur partage la limite de la majorité des approches de simulation actuelles, à l'exception du modèle AmeliaTF. La validation initiale du projet repose uniquement sur le cas de CYUL. Toutefois, l'architecture du simulateur, basée sur un graphe nodal et un *line graph* construits à partir de données OSM, est voulue transposable à d'autres aéroports. Il suffit de reconstruire le graphe en fonction de l'aéroport à étudier, ce qui ouvre une perspective de généralisation qui n'a pas pu être testée dans le cadre de ce mémoire. Finalement, le simulateur apparaît comme une réponse partielle mais cohérente à la problématique du chapitre 1. Il ne remplace pas individuellement chacun des outils existants mais il réunit à lui seul le rejou de trajectoires historiques, le routage d'aéronefs contrôlables et l'estimation en temps réel des performances environnementales, trois dimensions jusqu'ici traitées séparément dans la littérature.

3.5.2 Interprétation des résultats algorithmiques

Les résultats de la section 3.1.3 montrent que l'algorithme WHCA* fonctionne correctement dans les conditions testées. La table de réservation anticipe l'occupation des nœuds sur une fenêtre finie et permet d'éviter les conflits que l'algorithme A* ne détecte pas. Dans le cas de deux aéronefs aux trajectoires en conflit, le simulateur résout le problème en allongeant le chemin de l'un des deux aéronefs plutôt qu'en imposant un arrêt aux deux. Cela favorise la fluidité du trafic. Cette stratégie atteint cependant ses limites lorsque le trafic est dense. Dans le scénario de fermeture de la voie A4 (section 3.3.3), la concentration du trafic sur un nombre réduit d'axes (voies *C* et *J*) multiplie les situations où plusieurs aéronefs convergent simultanément vers les mêmes segments. Dans ces cas, il ne suffit plus d'allonger un chemin pour éviter le conflit, il faut imposer un temps d'attente prolongé à l'un des aéronefs concernés. C'est ce qui explique que certains aéronefs cumulent jusqu'à 55 minutes de temps de roulage dans le scénario perturbé, soit près du double du maximum observé en temps normal. Ce résultat illustre une limite de l'algorithme WHCA* actuel, la pénalité d'un conflit n'est pas répartie entre les deux aéronefs concernés mais elle est supportée intégralement par celui que l'algorithme choisit de retarder.

Il est également pertinent de questionner le choix de la fenêtre temporelle finie de la table de réservation. Pour les densités de trafic observées dans ce mémoire, 14 aéronefs simultanés pour le scénario de fermeture, la fenêtre choisie est suffisante pour prévenir les conflits. Cependant, rien n'indique que l'algorithme est capable de performer dans une configuration encore plus dense ou en cas de fermetures simultanées de plusieurs voies. Une fenêtre trop courte ne permet pas d'anticiper tous les conflits et une trop longue augmente le coût de calcul de l'algorithme, ce qui entraîne une latence du simulateur.

Enfin, la sensibilité du système à la topologie de l'aéroport joue un rôle déterminant dans les résultats obtenus. La section 3.2.1 a montré que le trafic sur CYUL est concentré sur un nombre limité de voies, dont la A4. Lorsqu'un axe central est supprimé, comme en section 3.3, le nombre d'alternatives disponibles chute fortement et l'algorithme se retrouve à gérer des conflits sur un réseau déjà saturé, ce qui se traduit par la hausse de 49,0% du temps de roulage total. Cette

dégradation reflète avant tout une réduction de l'espace de solutions disponibles plutôt qu'une limite propre à l'algorithme WHCA*. L'efficacité du système dans le simulateur dépend donc directement de la disponibilité de routes alternatives, une caractéristique propre à la topologie de CYUL.

Le scénario de dégivrage (section 3.4) met à l'épreuve un autre aspect du simulateur. Contrairement à la fermeture de la voie A4, où le WHCA* redistribue les trajectoires sur des axes alternatifs, la station de dégivrage impose une file d'attente lorsque tous les postes de traitement sont occupés. Ce mécanisme reproduit fidèlement le comportement attendu à CYUL en période hivernale. L'analyse de la section 3.4.2 a permis d'identifier une anomalie car deux avions sont entrés en collision sur le réseau de voies de circulation et sont restés immobilisés jusqu'à la fin de la simulation. Ce comportement révèle une limite de la logique de gestion des conflits décrite à la section 2.4.2, qui ne prévoit pas de mécanisme de résolution lorsque deux avions se bloquent mutuellement dans cette configuration précise. Cette anomalie a été isolée et exclue de l'interprétation des résultats, mais elle constitue une piste d'amélioration prioritaire pour une version future du simulateur.

Il convient également de souligner qu'aucune comparaison systématique n'a été menée entre le WHCA* et d'autres approches de planification multi-agents, telles que le Conflict-Based Search (CBS) et ses variantes ECBS et CCBS, ou une formulation en programmation linéaire en nombres entiers mixte (MILP) pour la gestion des ressources. Ces méthodes offrent des garanties d'optimalité ou de complétude que le WHCA* ne fournit pas, sa nature séquentielle privilégiant les avions planifiés en premier au détriment d'une optimisation globale de la flotte. Une comparaison quantitative avec ces approches permettrait de mieux situer la qualité des solutions produites par le simulateur.

3.5.3 Limites et hypothèses simplificatrices

Le simulateur développé dans ce mémoire repose sur plusieurs simplifications qui doivent être prises en compte dans l'interprétation des résultats présentés aux sections précédentes.

Premièrement, le modèle dynamique des aéronefs reste volontairement simple. Comme mentionné à la section 2.1.2, la priorité a été donnée à la précision de l'échelle et du positionnement au sol des aéronefs plutôt qu'à la fidélité de leur comportement aérodynamique. Les manœuvres de décollage et d'atterrissage ne modélisent pas les phases d'accélération réelles d'un aéronef ni les contraintes associées, comme le freinage, le mouvement des gouvernes ou des trains d'atterrissage. Les trajectoires calculées par le WHCA* respectent les contraintes du graphe et les contraintes liées aux groupes d'aéronefs mais elles ne prennent pas en compte les limites physiques propres à chaque appareil, comme son rayon de virage réel ou sa capacité d'accélération. Cette simplification est cohérente avec l'objectif du simulateur qui vise à analyser les stratégies de routage et non les comportements aérodynamiques. Cependant, cela limite la précision des temps de roulage calculés pour des manœuvres complexes comme des virages serrés.

Deuxièmement, la précision du modèle de consommation de carburant et d'émissions dépend directement de la qualité des données météorologiques fournies au début de la simulation. Comme décrit à la section 2.5.1, la correction BFFM2 nécessite un rapport METAR pour ajuster les valeurs de référence de l'EEDB aux conditions atmosphériques réelles de CYUL. En l'absence de METAR, le simulateur utilise par défaut les conditions de l'atmosphère standard internationale. Il y a donc un écart entre les valeurs simulées et les conditions réelles sur l'aéroport, en particulier lors de journées hivernales où les températures par rapport aux conditions ISA sont très différentes à Montréal.

Troisièmement, les paramètres de correction x et y utilisés dans la méthode BFFM2 sont fixés à des valeurs empiriques ($x = 1$, $y = 0,5$) tirées de Ghazi & Botez (2022). Ces valeurs ont été établies pour des conditions et des types de moteurs spécifiques et ne sont pas nécessairement valides pour l'ensemble de la flotte simulée sur CYUL. Une validation plus poussée nécessiterait de comparer ces coefficients de correction à des mesures propres à chaque groupe de moteur, ce qui dépasse le cadre de ce travail.

Quatrièmement, le simulateur n'intègre pas de modèle complet de séparation par turbulence de sillage. Les contraintes de séparation actuellement appliquées, décrites à la section 2.4.2, reposent uniquement sur des temps d'attente fixes définis par les catégories de turbulence de sillage de l'OACI (2016). La dynamique réelle de dissipation des tourbillons de sillage en fonction des conditions de vent ou de la configuration de la piste n'est pas modélisée. Cette approche est suffisante pour reproduire des séquences de décollage observées dans des conditions normales, mais elle ne permet pas d'évaluer l'impact de conditions météorologiques particulières sur la sécurité des séparations, ni de tester des stratégies de réduction des minimums de séparation.

Cinquièmement, la généralisation du simulateur à d'autres aéroports reste, à ce stade, théorique. Bien que l'architecture du modèle, fondée sur un graphe nodal et un *line graph* construits à partir de données OSM, soit conçue pour être transposable, la totalité des résultats présentés dans ce mémoire repose uniquement sur le cas de CYUL. Aucun test n'a été mené sur un aéroport dont la topologie ou les procédures opérationnelles diffèrent significativement, ce qui ne permet pas de garantir la robustesse du simulateur dans un contexte différent.

Une limite additionnelle concerne l'absence de répliques pour les scénarios perturbés. Le WHCA* étant sensible à l'ordre de priorité des aéronefs, c'est-à-dire à l'ordre dans lequel ils sont planifiés séquentiellement, un changement de cet ordre pourrait produire des trajectoires et des temps de roulage différents pour un même scénario. Les résultats présentés aux sections 3.2 à 3.4 reposent sur une seule exécution par scénario, ce qui ne permet pas d'évaluer la variabilité des indicateurs obtenus ni de garantir leur stabilité statistique.

Enfin, la dernière limite de validation de ce travail concerne l'absence de comparaison directe entre les valeurs de consommation de carburant et d'émissions calculées par le simulateur et des mesures réelles effectuées sur le terrain. La validation présentée à la section 3.1.4 repose sur la vérification des ordres de grandeur et du facteur d'émission CO_2 /carburant, plutôt que sur une confrontation à des données mesurées sur des aéronefs en exploitation à CYUL. Cette absence de validation limite la portée des conclusions tirées des sections 3.2 et 3.3. Les écarts entre scénarios, soit les hausses de 49,0 % du temps de roulage et de 57 % de la consommation de carburant

pour la fermeture de la voie A4, ainsi que les hausses de 86,9 % et 118 % respectivement pour le dégivrage, sont jugés fiables car ils découlent directement de la même méthode de calcul appliquée aux trois scénarios. Les valeurs absolues devraient toutefois être confirmées par des données réelles de consommation avant d'être utilisées dans un contexte opérationnel, il est cependant compliqué d'obtenir ces informations.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La croissance soutenue du trafic aérien mondial exerce une pression croissante sur les aéroports, dont la capacité physique n'augmente pas au même rythme que le nombre d'opérations à traiter. Dans ce contexte, les opérations au sol constituent un enjeu opérationnel et environnemental majeur en raison de leur contribution aux retards, à la consommation de carburant et aux émissions polluantes. La revue de la littérature présentée au chapitre 1 a permis de constater qu'aucun des outils de simulation existants, qu'ils soient événementiels, paramétriques, axés sur l'optimisation, multi-agents ou axés sur les données, n'intègre l'ensemble de ces dimensions au sein d'un même environnement. Chacun d'eux traite un aspect isolé de la simulation des opérations au sol. C'est de ce constat qu'a émergé la problématique de ce mémoire, soit de déterminer comment développer un environnement de simulation intégré et géoréférencé capable de reproduire fidèlement les opérations au sol d'un aéroport, en combinant le jeu de trajectoires historiques, le routage coopératif d'aéronefs contrôlables et l'estimation en temps réel des performances environnementales, afin de constituer un outil d'analyse et d'aide à la décision.

Pour répondre à cette problématique, l'objectif principal de ce mémoire était de développer un nouveau simulateur des opérations au sol de l'aéroport international Montréal-Trudeau (CYUL), implémenté en C++ dans le moteur Unreal Engine 5. Ce travail a été décomposé en cinq sous-objectifs : modéliser fidèlement l'environnement 3D de l'aéroport, reproduire les opérations historiques au sol de CYUL, générer et router des aéronefs contrôlables par l'utilisateur à l'aide d'un algorithme de recherche du plus court chemin, calculer et afficher en temps réel la consommation de carburant et les émissions polluantes de chaque aéronef, et analyser des scénarios spécifiques pour comprendre l'impact de certains choix opérationnels sur le trafic. Les deux premiers sous-objectifs ont été atteints par la construction d'un environnement virtuel géoréférencé et à échelle réelle de CYUL dans UE5, dans lequel des trajectoires historiques reconstruites à partir de données ADS-B d'OpenSky Network peuvent être rejouées. La validation présentée à la section 3.1.1 a montré que ces trajectoires demeurent géométriquement cohérentes

avec le réseau de voies de circulation réel, y compris dans les zones où les voies sont très proches les unes des autres, confirmant la fiabilité de la chaîne de traitement des données ADS-B.

Le troisième sous-objectif, soit la génération et le routage d'aéronefs contrôlables, a été rempli par l'implémentation de l'algorithme WHCA* et d'un *line graph* encodant les contraintes opérationnelles de CYUL. Les résultats de la section 3.1.3 ont démontré que le routage coopératif permet d'éviter des conflits que l'algorithme A* seul ne détecte pas, au prix de l'allongement du temps de roulage et de la consommation de carburant de l'aéronef dévié. Cette capacité à anticiper et à résoudre les conflits entre aéronefs constitue l'un des apports du simulateur par rapport aux outils existants présentés au chapitre 1.

Le quatrième sous-objectif a été atteint par l'intégration d'un modèle de calcul de la consommation de carburant et des émissions polluantes, basé sur la méthode BFFM2 et corrigé aux conditions atmosphériques locales, dont les résultats sont affichés en temps réel dans l'interface du simulateur. La validation de la section 3.1.4 a confirmé la fiabilité du modèle.

Enfin, le cinquième sous-objectif a été atteint par l'analyse comparative d'un scénario de référence à un scénario de fermeture de la voie de circulation A4 et un scénario avec dégivrage. Cette comparaison a permis de quantifier l'effet d'une perturbation ponctuelle sur le réseau de CYUL, avec une hausse de 49,0% du temps de roulage total et de 57% de la consommation de carburant cumulée pour le scénario de fermeture, et une hausse de 86,9% du temps de roulage total et de 118% de la consommation de carburant pour le scénario avec dégivrage, ainsi qu'une redistribution du trafic et des émissions vers des voies auparavant peu sollicitées. Ces résultats illustrent la capacité du simulateur à traduire une décision opérationnelle en un coût environnemental quantifié, ce qu'aucun des outils recensés au chapitre 1 ne permettait à lui seul.

Ces résultats, pris dans leur ensemble, apportent une réponse satisfaisante à la problématique énoncée au chapitre 1. Le simulateur développé ne remplace pas individuellement chacun

des outils existants, mais il réunit au sein d'un même environnement le rejeu de trajectoires historiques, le routage coopératif d'aéronefs contrôlables et l'estimation en temps réel des performances environnementales, soit trois dimensions jusqu'ici traitées séparément dans la littérature. Il constitue ainsi une réponse partielle, mais cohérente, au besoin d'un outil d'analyse et d'aide à la décision intégré pour la gestion des opérations au sol de CYUL.

Ce travail comporte toutefois plusieurs limites, présentées en détail à la section 3.4.3, qu'il convient de rappeler. Le modèle dynamique des aéronefs reste volontairement simplifié et ne tient pas compte des limites physiques propres à chaque appareil. Le modèle de consommation de carburant et d'émissions dépend de la disponibilité d'un rapport METAR et repose sur des coefficients de correction empiriques de la méthode BFFM2 qui n'ont pas été validés pour l'ensemble de la flotte simulée. La gestion des points d'attente repose sur des temps de séparation fixes et n'intègre pas de modèle complet de dissipation des tourbillons de sillage. La validation du simulateur repose uniquement sur le cas de CYUL, ce qui ne permet pas de garantir sa robustesse pour un aéroport dont la topologie diffère significativement. Enfin, les valeurs de consommation de carburant et d'émissions n'ont pas pu être comparées à des mesures réelles effectuées sur le terrain. La validation du modèle repose sur la cohérence des ordres de grandeur plutôt que sur une comparaison directe avec des données mesurées.

Malgré ces limites, le simulateur développé dans ce mémoire constitue une base fonctionnelle pour l'analyse des opérations au sol de CYUL et pour l'évaluation de l'impact de différentes décisions opérationnelles. Les recommandations présentées ci-après proposent des pistes pour approfondir ces travaux et étendre la portée du simulateur :

1. Améliorer le modèle dynamique des aéronefs en intégrant leurs contraintes cinématiques réelles afin d'augmenter la précision des temps de roulage calculés pour des manœuvres complexes.

2. Intégrer systématiquement des données météorologiques réelles, sous forme de rapports METAR, au modèle de calcul du carburant et des émissions, plutôt que de parfois recourir par défaut aux conditions de l'atmosphère standard internationale.
3. Découpler le moteur de calcul (graphe, algorithme WHCA*, modèle de consommation de carburant et d'émissions) du moteur de rendu 3D d'UE5, afin de permettre des campagnes expérimentales accélérées, des répliques multiples et des comparaisons algorithmiques sans dépendre du rendu graphique en temps réel.
4. Faire évoluer la table de réservation de l'algorithme WHCA* afin de répartir équitablement le coût d'évitement de conflit entre deux aéronefs, plutôt que de l'imposer intégralement à un seul d'entre eux.
5. Ajouter un mécanisme de détection des blocages mutuels (graphe d'attente et détection de cycles) couplé à une procédure de replanification automatique, afin d'éliminer les situations d'immobilisation permanente observées lors du scénario de dégivrage.
6. Comparer quantitativement les performances du WHCA* à d'autres algorithmes de planification multi-agents (CBS, ECBS, CCBS) ou à une formulation MILP, afin d'évaluer la qualité des solutions produites par rapport à des méthodes offrant des garanties d'optimalité.
7. Réaliser plusieurs répliques de chaque scénario perturbé, en faisant varier l'ordre de priorité des aéronefs, afin d'évaluer la stabilité statistique des indicateurs de temps de roulage et de consommation.
8. Confronter les valeurs de consommation de carburant et d'émissions calculées par le simulateur à des mesures réelles effectuées sur le terrain à CYUL, afin de valider directement le modèle au-delà de la cohérence des ordres de grandeur.
9. Tester la transposition du simulateur à un ou plusieurs aéroports dont la topologie diffère de celle de CYUL, afin de confirmer la généralisation de l'architecture du modèle.

LISTE DE RÉFÉRENCES

- Aéroport de Montréal. (2025). *Rapport annuel 2025*. Montréal, Canada.
- Behere, A. & Mavris, D. N. (2023). A Method for the Parametric Representation of Take-off Time-Series Trajectory Data for Environmental Impact Assessment. *AIAA AVIATION 2023 Forum*, pp. 1–15. doi : 10.2514/6.2023-4111.
- Bnaya, Z. & Felner, A. (2014). Conflict-Oriented Windowed Hierarchical Cooperative A*. *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3743-3748. doi : 10.1109/ICRA.2014.6907401.
- de Neufville, R. L., Odoni, A. R., Belobaba, P. P. & Reynolds, T. G. (2013). *Airport Systems : Planning, Design, and Management* (éd. 2). New York : McGraw-Hill Education.
- Dijkstra, E.W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269-271.
- DuBois, D. & Paynter, G. (2006). *Fuel Flow Method2 for Estimating Aircraft Emissions*.
- Durand, A., Ghazi, G. & Botez, R. M. (2024a). Enhancing Best-First Search Algorithms for Aircraft Ground Trajectory Optimization With Non-Additive Cost Functions. *AIAA AVIATION FORUM AND ASCEND 2024*. doi : 10.2514/6.2024-4168.
- Durand, A., Watteau, T., Ghazi, G. & Botez, R. M. (2024b). Generalized Shortest Path Problem : An Innovative Approach for Non-Additive Problems in Conditional Weighted Graphs. *Mathematics*, 12(19), 2995. doi : 10.3390/math12192995. Published : September 26, 2024.
- European Union Aviation Safety Agency. [Issue 32]. (2025). ICAO Aircraft Engine Emissions Databank [Base de données]. Repéré à <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>.
- Ghazi, G. & Botez, R. M. (2022). Aircraft Mathematical Model Identification for Flight Trajectories and Performance Analysis in Cruise. *Journal of Aerospace Information Systems*, 530-549. doi : 10.2514/1.I011050.
- Ghazi, G., Botez, R. M. & Maniette, N. (2020). Cessna Citation X Takeoff and Departure Trajectories Prediction in Presence of Winds. *Journal of Aerospace Information Systems*, 17(12), 659-681. doi : 10.2514/1.I010854.
- Gilsinn, J. F. (1976). Validation of an Airport Simulation Model. *Proceedings of the 1976 Winter Simulation Conference*, pp. 273–277.

- Hart, P. E., Nilsson, N. J. & Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100-107. doi : 10.1109/TSSC.1968.300136.
- Janssen, S., Sharpanskykh, A., Curran, R. & Langendoen, K. (2019). AATOM - An Agent-based Airport Terminal Operations Model simulator. *SummerSim '19 : Proceedings of the 2019 Summer Simulation Conference*, pp. 1–12.
- Jeppesen. (2017). *Montreal-Trudeau International Airport (CYUL) – Airport Information and Operational Procedures*. Englewood, CO.
- Navarro, I., Ortega-Kral, P., Patrikar, J., Wang, H., Ye, Z., Park, J. H., Oh, J. & Scherer, S. (2024). Amelia : A Large Model and Dataset for Airport Surface Movement Forecasting. *AIAA Aviation Forum and Ascend 2024*, pp. 1–24. doi : 10.2514/6.2024-4251.
- Nikoleris, T., Gupta, G. & Kistler, M. (2011). Detailed estimation of fuel consumption and emissions during aircraft taxi operations at Dallas/Fort Worth International Airport. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 16(4), 302-308. doi : 10.1016/j.trd.2011.01.007.
- OACI. (2016). *Procedures for Air Navigation Services – Air Traffic Management* (éd. Sixteenth). Montréal, Québec, Canada : Organisation de l'Aviation Civile Internationale.
- OACI. (2025). *2025 ICAO Environmental Report : Skyward Action – Realizing Aviation's Sustainable Future*. Montréal, Canada.
- Schäfer, M., Strohmeier, M., Lenders, V., Martinovic, I. & Wilhelm, M. (2014). Bringing Up OpenSky : A Large-scale ADS-B Sensor Network for Research. *Proceedings of the 13th IEEE/ACM International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pp. 83-94.
- Silver, D. (2005). Cooperative pathfinding. *Proceedings of the 1st Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment Conference (AIIDE 2005)*, pp. 117–122. doi : 10.1609/aiide.v1i1.18726.
- Szymanski, M., Ghazi, G. & Botez, R. M. (2023a). Single and Multi-Agent Reinforcement Learning Approach to Optimize Aircraft Ground Trajectories at Airports. *Aerospace Europe Conference 2023 – Joint 10th EUCASS and 9th CEAS*. doi : 10.13009/EUCASS2023-713.
- Szymanski, M., Ghazi, G. & Botez, R. M. (2023b). Development of a Map-Matching Algorithm for the Analysis of Aircraft Ground Trajectories using ADS-B Data. *AIAA AVIATION 2023 Forum*. doi : 10.2514/6.2023-3758.

- Transport Canada. (2024). *Transportation in Canada 2023*. Ottawa. Repéré à <https://tc.canada.ca/en/corporate-services/transparency/corporate-management-reporting/transportation-canada-annual-reports/transportation-canada-annual-reports/transportation-canada-2023>.
- Watteau, T., Ghazi, G. & Botez, R. M. (2024). Optimizing Airport Ground Movements Using Multi-Agents Reinforcement Learning. *AIAA AVIATION FORUM AND ASCEND 2024*. doi : 10.2514/6.2024-4169.
- Wilson, D., Roe, E. K. & So, S. A. (2006). Security Checkpoint Optimizer (SCO) : An Application for Simulating the Operations of Airport Security Checkpoints. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, pp. 529–535. doi : 10.1109/WSC.2006.323126.
- Wood, Z., Kistler, M., Rathinam, S. & Jung, Y. (2009, August). A Simulator for Modeling Aircraft Surface Operations at Airports. *Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, pp. 1–11. doi : 10.2514/6.2009-5912.
- Wu, P. P.-Y. & Mengersen, K. (2013). A review of models and model usage scenarios for an airport complex system. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 47, 124–140. doi : 10.1016/j.tra.2012.10.015.
- Zhang, M., Huang, Q., Liu, S. & Li, H. (2019). Assessment Method of fuel consumption and emissions of aircraft during taxiing on airport surface under given meteorological condition. *Sustainability*, 11(21), 6110. doi : 10.3390/su11216110.