

Université de Montréal

Évaluation de politiques de séquençage d'arrivées d'avions par simulation

par
Wael Sboui

Département d'informatique et de recherche opérationnelle
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)
en informatique

Septembre, 2017

© Wael Sboui, 2017.

RÉSUMÉ

Avec l'augmentation croissante du trafic aérien, la gestion des pistes aéroportuaires devient un problème crucial, tant au niveau des opérations que de la sécurité. En effet, les pistes ont une capacité limitée et il convient de respecter une certaine distance entre deux avions, tant au décollage qu'à l'atterrissage, en raison des turbulences de sillage. Cette séparation minimale dépend de la taille des avions, laquelle influence leur sensibilité aux turbulences. Par conséquent, l'ordre des décollages et des atterrissages affecte le délai d'attente total minimal d'une séquence de décollages ou d'atterrissages, ainsi que les retards imposés aux passagers. Diverses politiques d'ordonnancement ont été proposées pour réduire ces retards, généralement sur base d'heuristiques, comme le problème de séquençage est NP-difficile. En outre, peu d'attention est généralement accordée aux facteurs aléatoires influençant les heures de décollage et d'atterrissage.

Le but de ce travail est de construire un outil de simulation par événements discrets permettant d'évaluer différentes politiques d'ordonnancement d'atterrissages, tenant compte des contraintes opérationnelles de séparation, ainsi que des aléas sur l'heure d'arrivée des avions dans la zone aéroportuaire. Nous nous concentrons sur les atterrissages, comme ils sont plus critiques que les décollages, et étudions uniquement les mouvements en vol. L'outil développé permettra de comparer plusieurs politiques populaires dans la littérature, en calculant plusieurs mesures de performance. Contrairement aux hypothèses courantes de temps de vol parfaitement connu, nous introduisons un bruit entre le temps d'arrivée prévu lors de l'ordonnancement et l'arrivée effective, et examinons les impacts sur la performance de l'ordonnancement.

Mots clés: simulation stochastique, ordonnancement, événements discrets, contrôle aérien, atterrissages d'avions.

ABSTRACT

With the air traffic increase, airport runway management is becoming a critical issue both at the operational and safety levels. Runways have limited capacity and a minimum separation distance must be maintained between two consecutive aircrafts during both takeoff and landing phases due to wake turbulences. The minimum separation between two aircrafts depends on their size, influencing their sensitivity to turbulence. As a result, the ordering of takeoffs and landings affects the minimum total waiting time for a sequence of takeoffs or landings, as well as the delays imposed on passengers. Various scheduling policies have been proposed to reduce the delays, usually based on heuristics as the sequencing problem is NP hard. In addition, little attention is usually paid to the random factors influencing take-off and landing times.

We focus on landings as they are more critical than takeoffs and propose a discrete event simulation tool to evaluate different landing scheduling policies, taking account of the operational constraints on separation as well as the uncertainties on the arrival times in the airport area. We then compare several popular policies, based on various measures of performance. Contrary to the usual assumption of deterministic flight durations, we consider the noise between the expected arrival time and the realized arrival time and examine the impacts on the scheduling performance.

Keywords : stochastic simulation, scheduling, discrete events, air traffic control, aircraft landing.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
ABSTRACT	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES ANNEXES	ix
LISTE DES SIGLES	x
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 : PROBLÉMATIQUE ET REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 Système aéroportuaire	5
2.1.1 Configuration en secteurs aéroportuaires	7
2.1.2 Contrôle aérien	11
2.2 Problématique	13
2.3 Outils de gestion d'arrivées d'avions	17
2.4 Politiques d'ordonnancement	19
2.4.1 FCFS	20
2.4.2 Constrained Position Shifting (CPS)	20
2.4.3 Synthèse	21
CHAPITRE 3 : SIMULATEUR	23
3.1 Prototype de simulateur	23

3.2	Implantation de la politique CPS (S-CPS)	25
3.2.1	D-CPS	29
CHAPITRE 4 : EXPÉRIENCES NUMÉRIQUES		33
4.1	Mise en oeuvre technique	34
4.1.1	Données	34
4.1.2	Paramétrage du simulateur	36
4.1.3	Génération des arrivées	36
4.2	Comparaisons de politiques	38
4.2.1	Comparaison sur des données réelles	39
CHAPITRE 5 : CONCLUSION		42
BIBLIOGRAPHIE		45

LISTE DES TABLEAUX

2.I	Classification des politiques de séquençage	22
2.II	Politiques d'ordonnancement des mouvements aériens	22
4.I	Taux d'arrivée par intervalles	38
4.II	Retard par avion en présence de bruit	40
4.III	Différence de retard par avion en présence de bruit	40
4.IV	Statistiques sur les 10 simulations	41
4.V	Comparaison sur les 10 simulations	41
II.I	Statistiques d'une simulation par avion sur les données réelles . . .	xx
II.II	Statistiques des 10 simulations sur les données réelles	xx
II.III	Détails de comparaison entre FCFS et S-CPS sur les données réelles avec 10 simulations en présence du bruit	xxi
III.I	Comparaison entre FCFS et S-CPS sur des données simulées . . .	xxiii
III.II	Comparaison entre FCFS et D-CPS sur des données simulées . . .	xxiv
III.III	Statistiques sur les 10 simulations	xxv

LISTE DES FIGURES

2.1	Diagramme TMA [28]	6
2.2	Phase de descente	7
2.3	Phase d'approche	8
2.4	Modélisation du système aéroportuaire [20]	9
2.5	Miniature du système aéroportuaire [39]	10
2.6	Région de contrôle	13
2.7	Phases de vol et tâches du contrôleur responsable [1]	14
2.8	Turbulences de sillage [20]	15
2.9	Impact de l'ordonnancement sur le retard total	17
3.1	Simulateur d'arrivées	24
3.2	Réseau CPS	27
3.3	Réseau CPS réduit	28
3.4	Ordonnancement CPS optimal	28
3.5	Ordonnements statique et dynamique	30
3.6	Modèle de file d'attente des arrivées	31
4.1	Modèle du processus d'arrivées approximatif de Poisson	37
I.1	Fréquence des inter-arrivées sous FCFS	xi
I.2	Fonction de répartition des inter-arrivées sous FCFS	xi
I.3	Fréquence des retards sans bruit sous FCFS	xii
I.4	Fonction de répartition des retards sans bruit sous FCFS	xii
I.5	Retards par avion sans bruit sous FCFS	xii
I.6	Fréquence des coûts sans bruit sous FCFS	xiii
I.7	Fonction de répartition des coûts sans bruit sous FCFS	xiii
I.8	Fréquence des inter-arrivées avec bruit sous FCFS	xiii
I.9	Fonction de répartition des inter-arrivées avec bruit sous FCFS	xiii

I.10	Fréquence des retards sous FCFS	xiv
I.11	Fonction de répartition des retards sous FCFS	xiv
I.12	Retards par avion avec bruit sous FCFS	xiv
I.13	Fréquence des coûts sous FCFS avec bruit	xv
I.14	Fonction de répartition des coûts sous FCFS avec bruit	xv
I.15	Fréquence des inter-arrivées sous S-CPS sans bruit	xv
I.16	Fonction de répartition des inter-arrivées sous S-CPS sans bruit	xv
I.17	Fréquence des retards sans bruit sous S-CPS	xvi
I.18	Fonction de répartition des retards sans bruit sous S-CPS	xvi
I.19	Retards S-CPS par avion sans bruit	xvi
I.20	Fréquence des coûts sous S-CPS sans bruit	xvii
I.21	Fonction de répartition des coûts sous S-CPS sans bruit	xvii
I.22	Fréquence des inter-arrivées avec bruit sous S-CPS	xvii
I.23	Fonction de répartition des inter-arrivées avec bruit sous S-CPS	xvii
I.24	Retards par avion avec bruit sous S-CPS	xviii
I.25	Fréquence des coûts avec bruit sous S-CPS	xviii
I.26	Fonction de répartition des coûts avec bruit sous S-CPS	xviii
I.27	FCFS sur des données réelles et simulées sans bruit	xix

LISTE DES ANNEXES

Annexe I :	Résultats de FCFS et S-CPS	xi
Annexe II :	FCFS versus S-CPS sur les données réelles	xx
Annexe III :	Comparaison des politiques FCFS et S-CPS sur des données simulées	xxii

LISTE DES SIGLES

FAA	Federal Aviation Administration
IAF	Initial Approach Fix
TMA	Terminal Manoeuvring Area
CPS	Constrained Position Shifting
FCFS	First Come First Served
AMAN	Arrival Manager
OACI	Organisation d'Aviation Civile Internationale
IATA	International Air Transport Association
ATM	Air Traffic Management
ATC	Air Traffic Control
AAC	Area Control Centre
ACI	Airport Council International
IC	Intervalle de confiance

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Le transport aérien est un secteur névralgique pour l'économie internationale, accaparant plus du tiers des échanges de biens dans le marché international [32]. Son essor est donc primordial et a des répercussions sur un bon nombre de domaines connexes. Selon la FAA, l'organisme commandant le trafic aérien en Amérique du Nord, l'aviation civile génère aux États-Unis environ 10,6 millions d'opportunités de travail avec des revenus évalués à 446,8 milliards de dollars américains [1]. Elle contribue également à l'économie américaine à hauteur de 1600 milliards de dollars, constituant ainsi 5,1% du produit intérieur brut à l'échelle nationale. Eurocontrol, l'instance homologue de la FAA en Europe, est l'organisation européenne pour la sécurité de la navigation aérienne. Sa mission est d'harmoniser et d'unifier la gestion de la navigation aérienne en Europe. Eurocontrol met en exergue l'impact crucial du secteur du transport aérien européen sur l'épanouissement économique du continent européen, et ce, tant d'une manière indirecte que directe. En effet, le créneau de transport aérien a contribué à la création de 2,6 millions d'emplois. Par ailleurs, nous recensons en 2015 quelques 9,75 millions de vols contrôlés sous la juridiction des gestionnaires de l'espace aérien, aussi appelés contrôleurs aériens. Nous comptons environ une centaine de milliers de vols qui traversent le ciel au quotidien, transportant un million de voyageurs.

Selon diverses études prospectives, le nombre de passagers devrait atteindre 7,2 milliards en 2035, contre 3,2 milliards actuellement [22]. Le taux de croissance annuel grimpera à raison de 4.9% selon les prévisions de l'ACI¹. En outre, actuellement moins de 12% des aéroports au monde gèrent plus de 80% du mouvement aérien global [35]. Ces aéroports jouent le rôle de *hubs*, permettant d'interconnecter des lignes aériennes et de faire transiter les passagers. De grande capacité, les *hubs* profitent aux compagnies

¹<http://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.PSGR>

aériennes qui peuvent concevoir des lignes de connexion, dites *spokes*, au lieu d’opérer des lignes directes, pour lesquels les avions peuvent être à moitié vides².

Néanmoins, malgré ses avantages, le principe du *hub and spoke* demeure un défi à relever pour la gestion aéroportuaire en raison de l’augmentation de la charge de travail subie par les contrôleurs aériens. De plus, la FAA prévoit que 138 aéroports fonctionneront à une capacité réduite de 41% en 2030, en raison de l’inadéquation de leur structure face à l’accroissement de la demande. En 2015, les retards ont augmenté de 23% en 2015 par rapport à 2013, enregistrant un retard additionnel de 0,73 minute par vol [1]. Sans une amélioration significative des techniques de contrôle du trafic aérien, les retards vont croître exponentiellement. Ainsi, une meilleure utilisation de l’infrastructure aéroportuaire et des ressources disponibles telles que les pistes s’impose afin de mitiger les effets négatifs du retard, surtout dans un contexte où l’expansion des infrastructures est onéreuse et contrainte par la superficie disponible. Il suffit de mentionner que le coût de construction du terminal 5 de l’aéroport Heathrow mis en fonction en 2008 s’est élevé à 4 millions de livres anglaises soit près de 6.7 milliards de dollars canadiens et que le coût de rénovation de l’aéroport Orly à Paris a nécessité un investissement de près de 8.7 milliards de dollars canadiens.³

En particulier, il est possible d’améliorer l’utilisation des pistes et de réduire les retards en optimisant l’ordre des atterrissages et des décollages. Dans ce mémoire, nous construisons un prototype de simulateur stochastique à événements discrets dédié à examiner, évaluer et comparer des politiques d’ordonnancement d’atterrissages réalistes en vue d’atténuer la congestion dans la zone aéroportuaire, en particulier en présence d’incertitude sur les heures d’arrivées. Les politiques d’ordonnancement sont comparées par rapport au retard total des atterrissages par rapport aux heures prévues dans les plans de vol. En particulier, nous souhaitons analyser l’influence de l’incertitude sur l’application de ces politiques, habituellement développées sans en tenir compte. Notre simulateur est

²<http://science.howstuffworks.com/transport/flight/modern/airline3.htm>

³https://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9roport_de_Londres-Heathrow/

développé en Julia, langage également utilisé pour d'autres applications aéronautiques, tel l'outil d'évitement de collisions en vol du MIT⁴.

Deux politiques populaires d'ordonnement sont comparées, à savoir l'approche du premier arrivé, premier servi, et la politique CPS, dans laquelle l'ordre d'atterrissage d'un avion ne peut être modifié que de quelques positions au maximum. Nous suivons l'implantation par programmation dynamique proposée par Balakrishnan et Chandran [2] et l'étendons dans un contexte d'horizon roulant.

Le mémoire est organisée de la manière suivante. Dans le chapitre 2, nous présentons les éléments principaux permettant de modéliser la zone aéroportuaire dans le contexte d'intérêt, à savoir la phase d'approche du transport aérien, et abordons quelques contributions issues de la littérature sur les politiques d'ordonnement des atterrissages. Nous donnons dans le chapitre 3 un aperçu sur la simulation à événements discrets et sa mise en œuvre pour la comparaison de politiques d'ordonnement, avec ou sans bruit aléatoire sur les temps de vol. Le chapitre 4, quant à lui, synthétise les expériences menées et rapporte les éléments de validation effectués. Par la suite, les résultats obtenus sont présentés et discutés. Enfin, nous concluons le mémoire dans le chapitre 5 en résumant les observations principales obtenues et en y présentant certaines améliorations futures potentielles.

⁴http://juliacon.org/2015/images/juliacon2015_moss_v3.pdf

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE ET REVUE DE LITTÉRATURE

Dans ce chapitre, nous consacrons la première partie à la problématique qui nous intéresse. Puis, nous décortiquons la terminologie qui y est associée, avec les concepts clés du contrôle aérien. Le deuxième volet du chapitre actuel porte sur une revue de la littérature. L'état de l'art couvre plusieurs axes de recherche relatifs aux enjeux soulevés par l'aviation civile et auxquels se confrontent notamment les contrôleurs aériens. Nous abordons dans un premier temps quelques outils existants de la simulation de gestion d'arrivées d'avions. Ces derniers servent à l'assistance aux contrôleurs aériens dans leur prise de décision. Leur utilité se matérialise par l'évitement des longues attentes et la réduction des retards sur les arrivées. Nous considérons par la suite certaines politiques d'ordonnancement tout en traitant brièvement de quelques tentatives de modélisation de l'aérodrome, conjointement avec l'espace aérien.

Pour ce faire, nous introduisons le vocabulaire indispensable au domaine du contrôle du trafic aérien et à la discipline mère qu'est le Air Traffic Management. Ce créneau s'intéresse notamment aux mouvements du trafic aérien et veille sur l'application et le respect de la réglementation par les pilotes de ligne dans le souci de garantir le bon déroulement des vols. Nous décrivons les principales composantes de l'infrastructure aéroportuaire et les catégorisons suivant des secteurs. Un secteur est un volume tridimensionnel défini par un contour, une altitude inférieure et une altitude supérieure. Afin de garantir la sécurité des vols, les services de contrôle aérien doivent s'assurer que les avions dans les espaces aériens contrôlés évoluent dans des volumes proprement définis par des normes de séparation, longitudinale et verticale. La maîtrise de l'organisation de l'espace aérien en des secteurs aériens est un pré-requis à la gestion de trafic aérien.

Nous nous proposons ensuite de décrire en détails le problème de gestion d'arrivées d'avions. Nous présentons l'ordonnancement des atterrissages sur une piste unique. Il

s'agit de l'énoncé le plus simple et autour duquel les articles sont les plus abondants, comme en témoigne la revue de littérature de Bennell et al. [5]. Le problème est d'affecter une heure d'atterrissage à chaque avion en respectant les contraintes de séparation, ou de manière plus pratique, de déterminer le prochain avion à faire atterrir dans la séquence d'arrivées [9]. Bien que ces contraintes de séparation correspondent à des distances, elles sont habituellement traduites en contraintes temporelles pour mieux s'intégrer au reste du problème, d'autant plus que les variables de décision sont elles-mêmes temporelles.

2.1 Système aéroportuaire

Avant d'aborder la problématique étudiée, nous introduisons brièvement quelques concepts permettant de représenter le système considéré.

Zone aéroportuaire : elle est établie autour d'un aéroport avec un rayon habituel de 2 à 2.5NM et une altitude de 2000 pieds (600m) pour permettre le contrôle et la gestion d'atterrissages et de décollages d'avions. Sur le plan horizontal, cette zone peut avoir des formes différentes (cercle, demi-cercle, ellipse, carré, rectangle, trapèze, ...). Les avions arrivants exploitent des renseignements provenant des installations de radio-navigation tels que l'ILS (système d'atterrissage aux instruments) ou le MLS (système d'atterrissage par micro-ondes) pendant l'approche finale [39].

Région de contrôle terminale (TMA : Terminal Manoeuvring Area) : c'est une zone, représentée dans la figure 2.1, avoisinant un aéroport ou un ensemble d'aéroports du même système aéroportuaire s'étalant sur un périmètre de 40-50 NM et sur une altitude de 10000 pieds [20]. Cette zone marque la fin de la phase de croisière et annonce le commencement de la phase d'approche, illustrée à la figure 2.2. Cette zone est délimitée par les points d'entrée à l'IAF. À partir de ce point, le séquençage est considéré figé et donc la marge d'interventions du contrôleur aérien devient restreinte aux commandes affectant les manoeuvres de trajectoires [39]. Cette zone se situe au niveau de vol dit *FL 100* à une altitude de 10000 pieds, ce qui correspond à l'espace aérien de classe B.

Chaque niveau de vol dans l'espace aérien est déterminé à chaque 1000 pieds d'altitude.

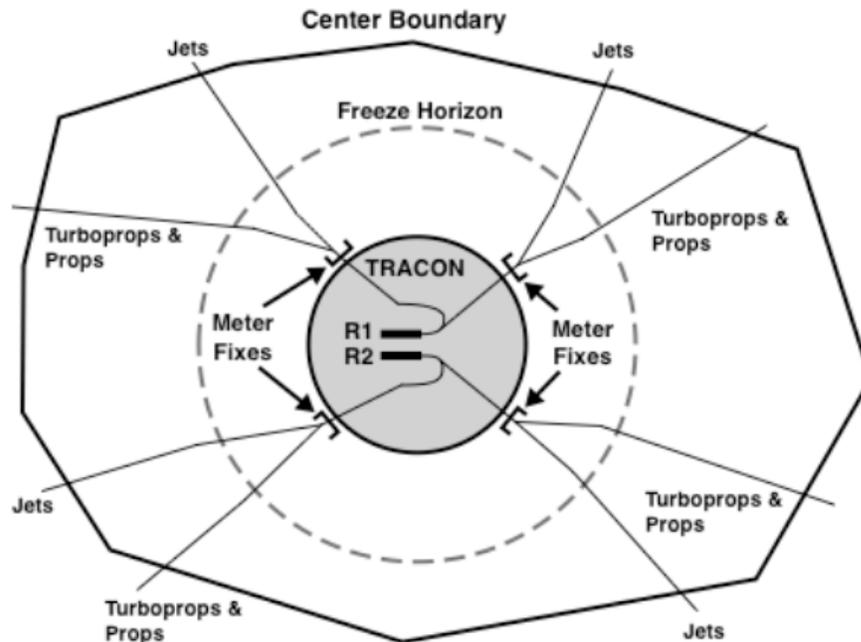


Figure 2.1 : Diagramme TMA [28]

L'espace aérien à basse altitude : il s'étale autour et au-dessus de la TMA, sur une altitude débutant entre 10000 à 18000 pieds, et finissant à 24500 pieds. L'aéronef en partance d'un aéroport donné utilise cet espace aérien pour grimper à l'altitude de croisière voulue, laquelle se situe dans l'espace aérien supérieur (à haute altitude). Les aéronefs en arrivée, descendent dans cet espace aérien le long de trajectoires précédant la zone terminale. Dans cet espace aérien, les trajectoires des aéronefs sont définies de la même façon que dans l'espace aérien terminal [20].

L'espace aérien à haute altitude (supérieure) : il couvre les altitudes entre les niveaux de vols, dits *Flight Level* (FL), FL 180 à FL 245 et FL 600 (espace aérien de classe A). Dans cet espace aérien, l'avion effectue la phase de croisière de ses vols [20]. La distance verticale minimale entre les avions est de 1000 pieds.

Horizon de gel : c'est le point limite de séquençage d'avions au-delà duquel le

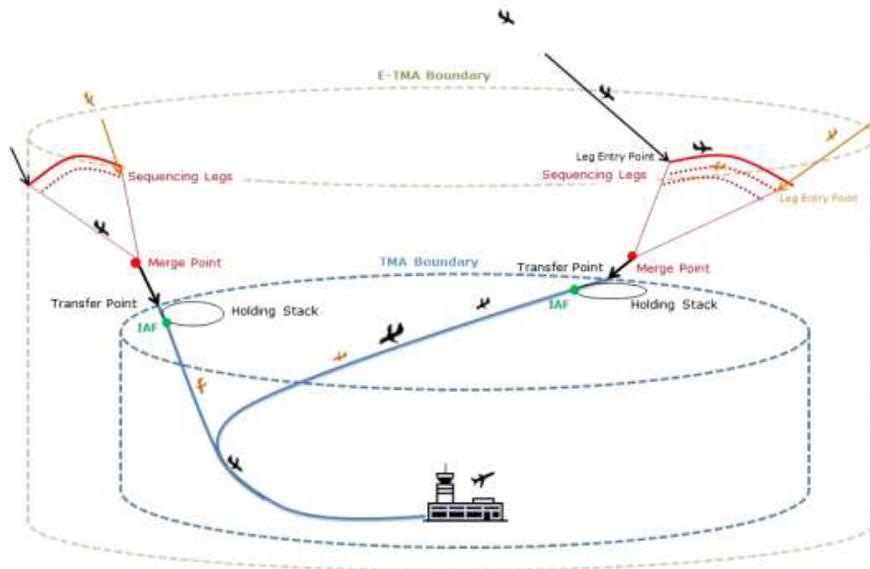


Figure 2.2 : Phase de descente

contrôle aérien n'est plus en mesure d'ajuster le séquençage d'avions en arrivées. Cette frontière se situe à une distance d'environ 200 NM à 250 NM du seuil de la piste d'atterrissage de l'aéroport de destination.

Repère d'approche initiale : la dernière portion de la phase d'en-route d'un vol finit par une route d'arrivée terminale standard (STAR : *Standard Terminal Arrival Route*) matérialisant le trajet qui se termine au point d'entrée de la TMA, appelé encore repère d'approche initiale (IAF : *Initial Approach Fix*), tel qu'illustré sur la figure 2.3. Au niveau de l'IAF, un avion peut être contraint à emprunter des circuits d'attente, appelés *hippodromes* ou *stacks*, avant de recevoir l'autorisation d'atterrir de la part du contrôleur aérien.

2.1.1 Configuration en secteurs aéroportuaires

Nous considérons le système de transport aérien comme une plateforme de demande/offre, où la capacité remplacerait l'offre. D'un côté, la demande provient du besoin

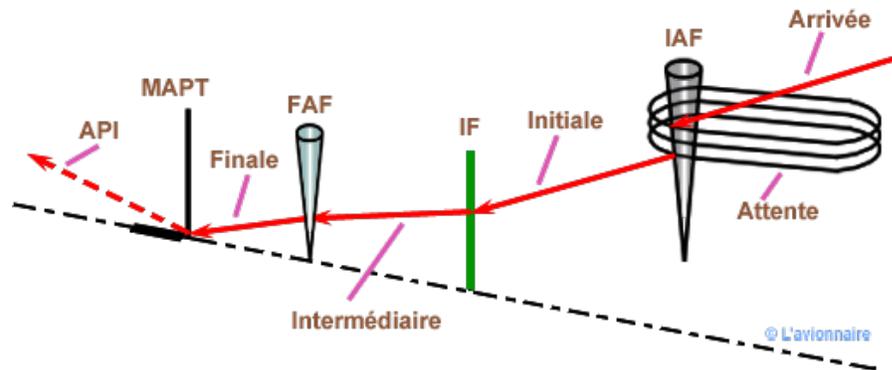


Figure 2.3 : Phase d'approche

des passagers pour voyager comme elle peut émaner de l'échange des biens (fret) entre les exportateurs et importateurs [39]. De l'autre, la capacité offerte est le fruit d'efforts de l'ensemble constitué par les aéroports de destination, les services du contrôle du trafic aérien et les compagnies aériennes. Nous nous intéressons particulièrement à la modélisation du trafic aérien tout en donnant un aperçu sur l'organisation de l'aéroport vu que cette entité est placée au cœur/centre de déroulement des opérations aéroportuaires.

Un aéroport se compose d'un aérodrome appelé encore *airside* et d'un *landside* qui représente le champ terrestre connecté à l'aéroport, comme représenté à la figure 2.4. Un *airside* à son tour se compose d'un système de pistes entourées de l'espace aérien d'approche et de *taxiways* débouchant sur un complexe rampe/passerelle. Le système de pistes et l'espace aérien avoisinant un aéroport facilitent l'approche finale d'un avion et permettent d'accommoder les opérations d'atterrissage et de décollage. Le complexe rampe/passerelle est utilisé pour le stationnement d'avions après un atterrissage et afin de mener les préparatifs nécessaires avant un décollage. Les *taxiways* permettent aux avions de circuler entre les pistes et le complexe rampe/passerelle en post-atterrissage et pré-décollage, tandis que le *landside* est constitué d'un terminal dédié soit aux passagers, soit au cargo connecté à des systèmes d'accès terrestre (métro, autoroute, ...).

La modélisation de l'aéroport peut être perçue différemment selon le niveau de dé-

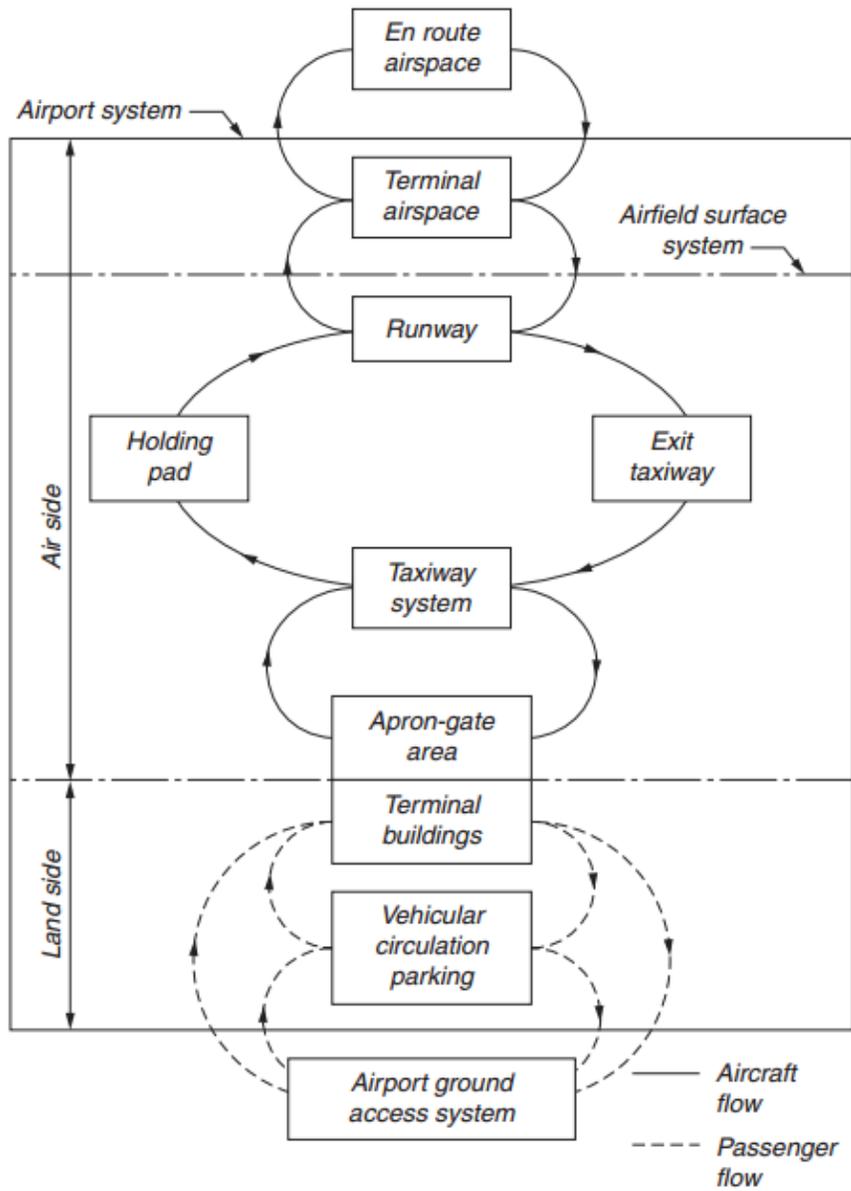


Figure 2.4 : Modélisation du système aéroportuaire [20]

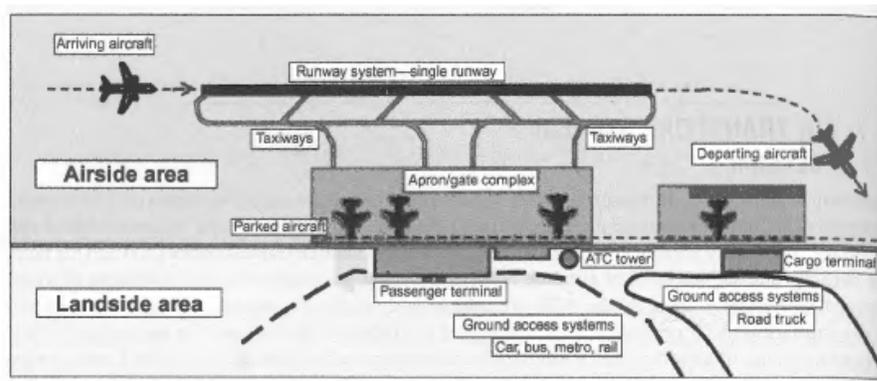


Figure 2.5 : Miniature du système aéroportuaire [39]

tailles requis et peut être ainsi classifiée en deux catégories à savoir macroscopique et microscopique. Selon la méthodologie, les modèles de l'aérodrome peuvent être divisés en modèle analytique et modèle par simulation. Les modèles macroscopiques sont pour la plupart analytiques, bien que parfois, ils peuvent être transformés en simulation, tandis que les modèles microscopiques conduisent à des modèles de simulation sans effort considérable de conversion [29]. Les modèles analytiques consistent en un ensemble de relations mathématiques décrivant les opérations simplifiées de certains éléments de l'aéroport. Ils sont utilisés pour l'évaluation des indicateurs de performance, comme la capacité ou le retard. En contrepartie, les modèles de simulation déplacent des objets individuels (qui sont des avions dans les modèles d'aérodrome) à travers les éléments du simulateur. Nous nous intéressons principalement à la modélisation microscopique de l'aérodrome du côté *airside*. En particulier, nous considérons les interconnexions entre l'espace aérien et le système de pistes afin d'évaluer la capacité de l'aéroport à accommoder les vols, mesurée en termes de nombre d'opérations (atterrissage/décollage) par heure, ainsi que la capacité de chaque piste, définie que le nombre maximum d'avions qu'elle peut traiter par heure, tenant compte de la composition de la flotte aérienne.

Selon qu'ils soient analytiques ou de simulation, les modèles d'aérodrome peuvent être dynamiques ou statiques, stochastiques ou déterministes. Par statique, nous enten-

dons que toutes les arrivées sont connues à l'avance, tandis que pour un modèle dynamique, les arrivées sont révélées en temps réel, habituellement au fur et à mesure de l'apparition des avions sur l'écran radar. Le niveau macroscopique répond d'une façon générale à des questions de planification et de conception approximativement en examinant un éventail de seuils de performance relatifs à chaque facteur [29]. Le niveau microscopique traite de l'aspect opérationnel dans une tentative de restitution fidèle du processus fonctionnel de l'aéroport sous des circonstances réelles. La différence entre les deux approches réside dans la manière de gérer la problématique selon le niveau de détails requis. Par exemple, nous considérons que notre simulateur manipule des avions au niveau de l'espace aérien. Il pourrait donc analyser le séquençage avion par avion comme il peut ne s'intéresser qu'aux taux d'atterrissages dans le séquençage, tel qu'étudié par Jacquillat et Odoni [21]. Quant à l'espace aérien, nous pourrions le considérer dans sa totalité sommairement afin d'acheminer un avion d'un point de départ vers un point de destination. Il est aussi possible de raffiner le modèle en focalisant sur les différents points formant un graphe au sein des zones importantes engendrant le retard à minimiser à savoir l'horizon de gel et la zone TMA.

2.1.2 Contrôle aérien

La discipline mère contrôlant le mouvement aérien s'appelle *Air Traffic Management* (ATM). Elle est chargée de router les avions en vol et de les orienter vers des voies réservées pour un contrôle aisé de leurs vitesses tout en maintenant le respect des minima de séparation entre les appareils. Ce service agit sur le flux d'arrivées d'avions et permet d'assurer la sécurité et respecter la conformité aux dates d'arrivées prévues. Outre les projets européen *SESAR* et nord-américain *NextGen* ayant pour but de moderniser le service du contrôle aérien d'ici 2020, il est envisagé de disposer d'ATM autonome d'ici 2050. Ce dernier requiert moins d'interventions humaines et présente donc moins de risques d'erreurs, et ce grâce à l'automatisation des activités liées au contrôleur aérien [39].

Le contrôle du trafic aérien (ATC : Air Traffic Control) est une sous-fonction de l'ATM responsable du suivi et de l'imposition des écarts de sécurité entre les paires des aéronefs ; il a pour mission de router et contrôler les vols entre les aéroports pendant les différentes phases de vol afin d'en assurer la sécurité et l'efficacité. La mission qui lui est confiée se résume en l'imposition du maintien des contraintes de séparations et l'ordonnement des avions en phase de vol afin de prévenir des retards (efficacité) et mitiger les coûts supplémentaires imposés aux passagers et aux compagnies aériennes (efficacité) [39]. Ce service est également apte à prévenir et éviter les incidents avec une anticipation suivant une fenêtre de temps approximative d'une vingtaine de minutes [8]. L'ATC est caractérisé par l'infrastructure aéroportuaire. Cette dernière est définie par un aéroport et l'espace aérien avec les voies aériennes les connectant. Elle inclut notamment des équipements de soutien de la navigation aérienne et des équipes de contrôleurs aériens. Ces dernières se répartissent sur la tour de contrôle située à l'aéroport et dans des centres de contrôle d'approche et régionaux de croisière situés un peu partout dans le monde.

L'espace aérien est segmenté en secteurs réglementés suivant des conventions et normes émises par l'OACI dont le siège se situe à Montréal. Généralement, il est scindé en un espace aérien contrôlé et un autre non contrôlé (sur demande). Il couvre en principe la surface du territoire d'un pays. Il peut être également subdivisé verticalement et horizontalement en une zone aéroportuaire, région terminale, un espace aérien à basse altitude et un espace à haute altitude [39].

Un avion se déplaçant d'un aéroport d'origine vers un aéroport de destination passe normalement par 5 phases de vol, illustrées à la figure 2.7. Ces phases sont à savoir la phase du décollage, celle de la montée, la phase de croisière dite *en-route* puis la phase de descente incluant la phase d'approche pendant laquelle l'avion suit généralement un itinéraire normalisé d'arrivée propre à l'aéroport de destination et finalement la phase d'atterrissage, et ce en parcourant différents secteurs aériens. Différents centres terrestres sont responsables l'un après l'autre du contrôle du vol. Pour un décollage par exemple,

les contrôleurs sur le sol guident le pilote sur une portée limitée. Ensuite, les contrôleurs en approche prennent la relève et se chargent de continuer le guidage de l'avion pour un rayon déterminé pour passer la relève aux contrôleurs en route, lesquels veillent au bon séquençage des avions et le maintien de la séparation à une haute altitude d'au delà de 25000 pieds. La figure 2.6 illustre l'arrivée d'un avion. Nous nous intéressons dans la suite du mémoire à l'arrivée des avions sur une piste unique destinée exclusivement aux atterrissages. L'opération d'atterrissage est jugée plus critique que le décollage au plan de la sécurité et se montre plus sensible à divers facteurs comme la consommation de carburant, la fatigue du personnel navigant, les conditions météorologiques, etc.

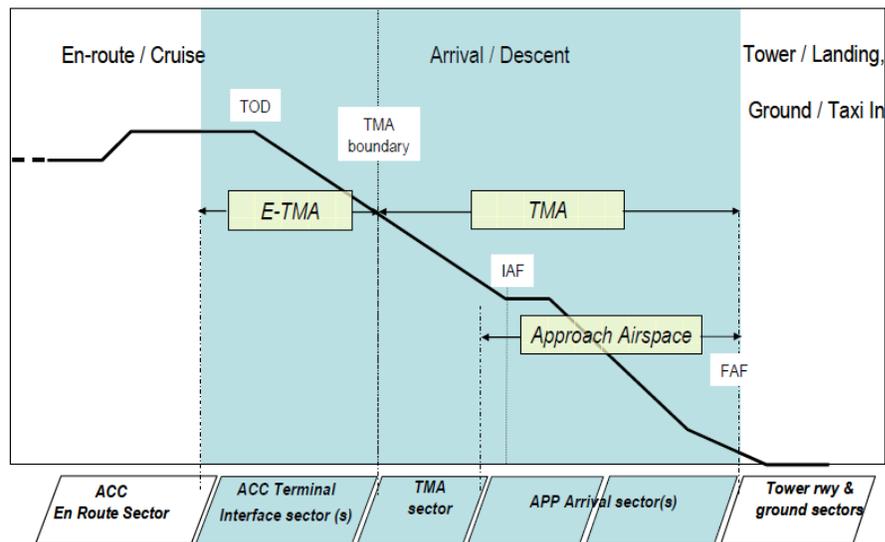


Figure 2.6 : Région de contrôle

2.2 Problématique

Nous abordons dans cette section la problématique de séquençage d'arrivées d'avions qui est un problème de décision NP-difficile. Sa complexité provient de l'asymétrie des valeurs des contraintes de séparation entre deux avions successifs empruntant la même trajectoire [4, 36]. En effet, des réglementations régissent la séparation minimale des

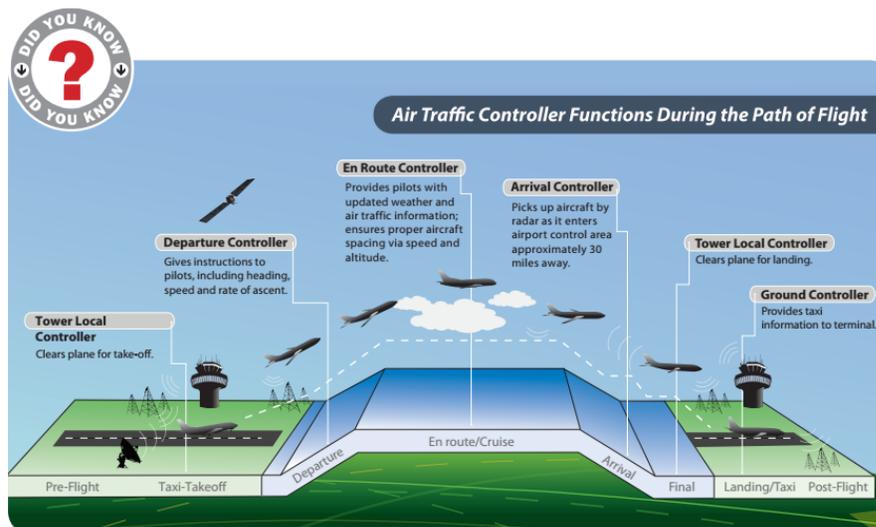


Figure 2.7 : Phases de vol et tâches du contrôleur responsable [1]

avions en vol en raison des turbulences de sillage qu'ils génèrent et qui sont dangereuses, pouvant même causer des abordages entre les aéronefs, voire un écrasement suite à une détérioration de la structure de l'avion. La figure 2.8 illustre la propagation des turbulences de sillage générées par un avion en vol, lesquelles peuvent déstabiliser les avions les traversant. Ces turbulences de sillage sont classées selon différentes catégories, en fonction de leurs intensités, directement liées au type d'avion les produisant. L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) définit principalement quatre catégories d'avions selon la masse maximale au décollage : très forte (*Super Heavy SH*)¹, forte (*Heavy H*), moyenne (*Medium M*), faible (*Light L*).

En s'appuyant sur cette catégorisation standardisée, les services de contrôle aérien assurent une séparation minimale entre toutes les paires d'avions en décollage et/ou en atterrissage afin de prévenir tout incident ou éventuel accident qui serait causé par les turbulences de sillage. Ils font donc déplacer les avions selon des fenêtres de temps désignant les intervalles de temps pendant lesquels les avions doivent être opérés (atterrir ou décoller). Le plus souvent, ces fenêtres temporelles sont traitées comme des contraintes

¹La catégorie des très fortes turbulences (*Super Heavy*) contient uniquement le Airbus A380.

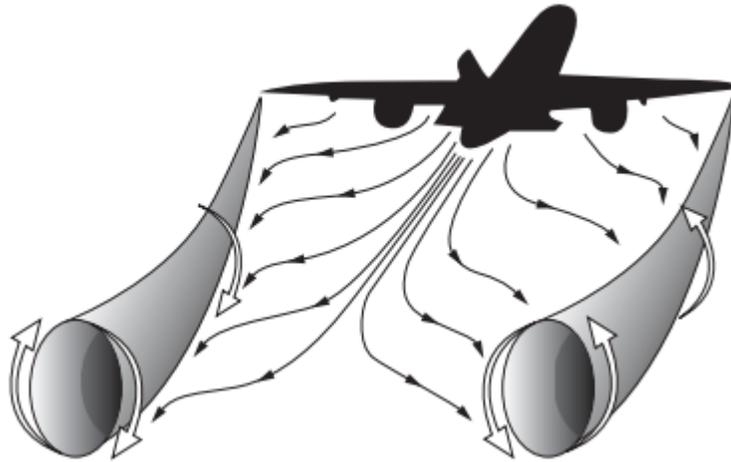


Figure 2.8 : Turbulences de sillage [20]

dures car elles traduisent des limitations physiques de l'avion à accélérer ou décélérer et modifier sa trajectoire. Ceci est particulier au cas d'atterrissage, comme chaque avion possède une heure préférentielle délimitant le seuil de la fenêtre et une heure limite, à laquelle il doit absolument atterrir pour respecter des normes sécuritaires.

Par ailleurs, un phénomène de congestion pourrait se produire quand la demande excède la capacité de l'aéroport ou simplement quand les délais imposés entre les atterrissages et décollages sont plus que nécessaires. Dès lors, il est possible pour le contrôleur aérien d'agir en fonction de la séparation temporelle entre deux avions successifs, dite séparation successive [30], en communiquant des instructions aux pilotes afin de permettre des opérations rapprochées, tout en préservant le seuil minimal de séparation. Nous nous concentrons dans la suite sur les atterrissages, vu qu'ils sont plus critiques que les décollages, comme un avion ne peut être maintenu indéfiniment en vol, alors qu'un décollage peut être plus facilement retardé. Le problème d'ordonnancement des atterrissages d'avions a été largement étudié depuis la publication du premier algorithme de séquençage d'avions [15], il y a plus de quatre décennies. Améliorer l'ordonnancement inclut comme avantages :

- l'augmentation de la résilience du flux et l'efficacité de la piste en raison de la

réduction de l'espace entre les aéronefs, y compris dans des conditions de vent violent élevé, tout en maintenant les mêmes niveaux de sécurité ;

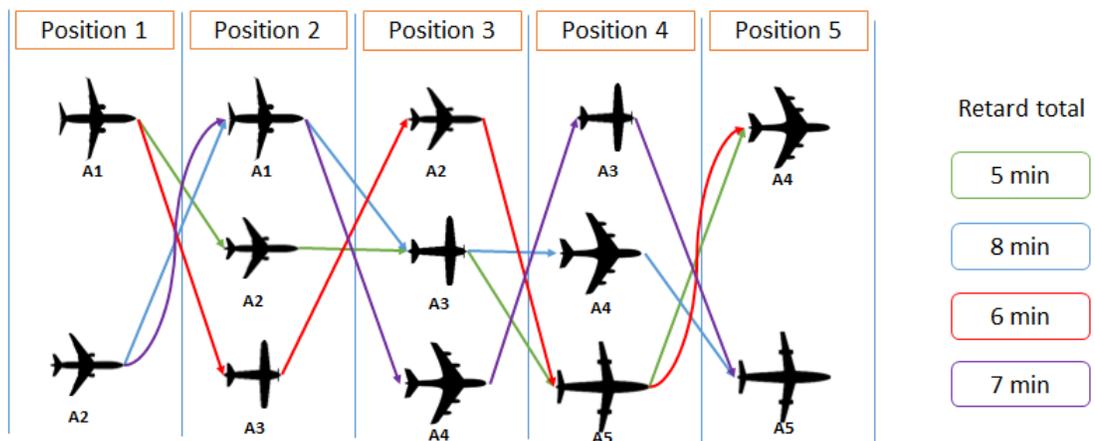
- des temps de vol plus courts, une réduction des retards, des annulations et des coûts d'exploitation conséquents ;
- une réduction globale de la charge de travail du contrôleur aérien grâce à une nouvelle interface homme-machine.

Il existe également maintes autres contraintes opérationnelles et facteurs variables ou figés se rapportant à l'atterrissage, mais qui restent en dehors de la portée de ce mémoire. Pour le volet variable, nous pouvons mentionner par exemple, la modification de la vitesse d'approche sous réserve de ne pas tomber en dessous du seuil minimal de vitesse permettant de maintenir l'avion en vol, essayer de rétrécir la marge de sécurité accompagnant les séparations minimales, tenir compte de la direction et force du vent, mieux appréhender la diversité des avions arrivants, l'éventail des opérations de séquençage des mouvements aériens, l'état et la performance du système du Air Traffic Management et les aléas perturbant les heures d'arrivées prévues. Du côté des facteurs fixes, nous pouvons énumérer notamment le nombre de pistes disponibles, leurs orientations et dispositions géométriques, le type et la localisation des bretelles de sorties de pistes. Or, l'expansion de l'infrastructure aéroportuaire est à éviter car elle est onéreuse. En effet, les coûts qui en résultent sont exorbitants et les délais de construction sont démesurés et sont souvent assujettis à des revérifications, voire même à des reports, ce qui paralyse en partie le mouvement de trafic aérien [29, 30, 39]. À titre d'exemple, le coût du projet d'expansion de l'aéroport "Louis Armstrong" aux États-Unis par un nouveau terminal s'élève à 993 millions de dollars US soit l'équivalent de 1.3 milliards de dollars canadiens et son achèvement a été repoussé pour février 2019 au lieu de sa date d'entrée en service prévue pour octobre 2018. ² Il est ainsi préférable à priori d'optimiser les

²<https://www.nola.gov/mayor/press-releases/2017/20170316-pr-aviation-board-votes-to-expand-and-fin/>

séquences d'arrivées et de décollage.

À titre d'illustration, considérons un ensemble de cinq avions, dénotés A1, A2, A3, A4 et A5, tel que représenté dans la figure 2.9. Ces avions sont de différents modèles et appartiennent à différentes catégories de turbulence de sillage. Nous limitons la modification possible de la position d'un avion à une place dans la séquence d'arrivées. Alors que la séquence initiale A1-A2-A3-A4-A5 conduit à un retard de 8 minutes, la séquence A1-A2-A3-A5-A4 donne un retard minimum de 5 minutes.



Réseau CPS : scénario pour 5 avions et une permutation

Figure 2.9 : Impact de l'ordonnancement sur le retard total

2.3 Outils de gestion d'arrivées d'avions

Nous passons en revue plusieurs contributions ayant pour but d'assister les contrôleurs aériens dans leurs décisions pour guider les avions en vol. De tels outils relèvent principalement du niveau de détail microscopique d'un aéroport. Ils sont conçus dans le but de traiter des problèmes d'ordre tactique et visent une représentation très fidèle des différentes actions qui se déroulent à l'aéroport [29]. Leur rôle est d'assister et informer les contrôleurs sur l'état optimal de la séquence d'atterrissage pour agir en consé-

quence, et ce en dictant des mesures de contrôle pertinentes, en particulier en donnant des consignes d'accélération ou de décélération. Cette intervention se prépare en avance, c'est à dire quand les avions arrivants sont à une certaine distance d'un aéroport de destination [9], et l'attente subie par les avions dans leur phase de croisière, appelée *attente linéaire*, présente un faible coût pour les compagnies aériennes ainsi qu'une charge de travail acceptable pour les contrôleurs. Si à l'arrivée d'un avion à l'IAF, les contraintes d'écart minimums ne sont pas satisfaites, le contrôleur peut agir sur la trajectoire de descente pour l'allonger ou la raccourcir, au prix d'une charge de travail et d'un risque plus élevés. S'il est impossible d'assurer un atterrissage sécuritaire, l'avion est mis en attente circulaire, c'est-à-dire qu'il doit décrire une ou plusieurs boucles au-dessus de l'aéroport, entraînant des retards plus importants et des coûts élevés de consommation de carburant. Dès lors, la mise en attente circulaire est vue comme une action de dernier recours et le contrôle aérien tentera de l'éviter.

Plusieurs outils d'aide à la décision ont été développés et utilisés dans des aéroports. Ils suggèrent des séquences d'atterrissage, réduisant les retards dans l'aéroport de destination et atténuant la charge de travail du contrôleur aérien. Pionner en la matière, le Centre de recherche Ames de la NASA [31] a mis au point dans les années 80 un ensemble d'outils d'aide à la décision, appelé Centre-TRACON Automation System (CTAS), pour une gestion efficace du trafic aérien. Cet outil a été déployé au sein de chaque centre de contrôle aérien régional et est connecté aux différents centres responsables de la région de contrôle dans un programme de coopération avec la FAA. Il fait actuellement l'objet d'une modernisation dans le cadre du projet NextGen prévu pour 2020. Ce système semi-automatisé génère des recommandations de trafic aérien conçues dans la perspective d'augmenter l'efficacité énergétique, réduire les retards et simplifier l'assistance aux contrôleurs aériens[25]. En Europe, il s'agit notamment de COMPAS (Computer Oriented Metering Planning and Advisory Program), qui aide les contrôleurs à planifier et à contrôler le flux du trafic aérien entrant dans la TMA plus efficacement. Les objectifs opérationnels de COMPAS sont d'assurer une meilleure utilisation de la capacité

d'atterrissage disponible. COMPAS a été conçu et testé pour l'environnement du centre ATC de Francfort [25]. En France, le système MAESTRO (Médias pour l'expédition d'aide et le séquençage du trafic avec recherche d'optimisation) a été introduit à Paris, puis remplacé par le gestionnaire d'arrivées AMAN connu aussi comme *Air Manager*, lequel est développé par la société française THALES. Cet outil a comme objectif général de fournir une assistance électronique aux contrôleurs aériens dans la gestion du flux de trafic d'arrivée dans un espace aérien particulier, à des points particuliers, tels que les seuils de piste ou les points IAF, où les heures d'arrivées sont figées. AMAN se base sur les informations de plan de vol et de radar, ainsi que des conditions météorologiques, pour produire des estimations de trajectoires et séquencer les arrivées d'avions. Il suggère également aux contrôleurs des mesures nécessaires pour espacer les avions pour une meilleure utilisation de la capacité de la piste et par souci de sécurité [18]. Nous trouvons aussi le système OSYRIS, développé par la société Barco, qui partage la même philosophie que Maestro et COMPAS. Toutefois, il se distingue par son algorithme de séquençage, comme il utilise une version modifiée de l'algorithme CPS. Cette variante énumère toutes les possibilités de séquençage sous la contrainte CPS [9]. La tendance actuelle des outils d'aide à la décision est d'augmenter leurs rayons d'opération [40], permettant aux contrôleurs d'agir davantage en amont de l'arrivée de l'avion à l'aéroport. Les contrôleurs disposeront ainsi de plus de flexibilité et de possibilités de réajustement de l'ordre de séquençage des arrivées en interceptant les avions plus tôt, et en outre, pourront réduire les attentes circulaires.

2.4 Politiques d'ordonnement

Tel qu'énoncé précédemment, le problème d'ordonnement d'arrivées d'avions est au centre de la problématique étudiée. Ce problème a reçu une grande attention, et nous référons le lecteur à Bennell et al. [5] pour une revue de littérature exhaustive des travaux antérieurs à 2011. Nous reprenons dans la suite les contributions les plus in-

fluentes et présentons quelques développements proposés après 2011. Nous considérons exclusivement une seule piste d'atterrissage bien qu'il existe des travaux abordant plusieurs pistes, croisées ou parallèles, homogènes ou hétérogènes, assurant des opérations simultanées d'atterrissage et de décollage. Nous tâchons par la suite de les classer selon le cas statique, dynamique, déterministe ainsi que stochastique. Nous constatons que la plupart des études se concentrent sur le cas statique déterministe.

2.4.1 FCFS

La politique de séquençage d'arrivées d'avions du premier arrivé premier servi (FCFS : first come first served) est la plus courante et la plus répandue dans les aéroports. En effet, elle est la plus simple à mettre en œuvre et garantit une certaine équité entre les avions en arrivée, bien qu'elle ne garantisse pas une utilisation optimale de la piste [10]. Elle consiste en l'attribution de l'ordre d'atterrissage selon l'ordre d'arrivées à la file d'arrivées. Les contrôleurs aériens sont simplement tenus d'infliger des temps de retard nécessaires afin d'imposer la soumission des pilotes aux contraintes minimales de séparation dépendant des classes des avions consécutifs. Néanmoins, cette politique risque d'amplifier les retards imposés en moyenne sur certains avions suivant le premier avion à faire atterrir, et dès lors ne contribue pas à l'augmentation de la capacité des pistes [12], et n'est toujours pas avantageuse selon la perspective des compagnies aériennes [13].

2.4.2 Constrained Position Shifting (CPS)

Dès 1976, Dear [15] constate qu'il est possible d'améliorer le débit du flux de trafic aérien en agissant sur l'ordre d'arrivée des avions. Toutefois, afin de limiter le nombre de séquences possibles et pour pallier au caractère NP-difficile du problème d'ordonnancement, il suppose qu'un avion ne peut dévier de sa position dans la séquence d'origine (la séquence FCFS) de plus d'un nombre donné de places, appelé Maximum Position Shifting (MPS), par exemple de deux à trois positions [15, 30]. Cette approche est polynomiale par rapport au nombre d'avions et exponentielle en nombre maximal

de changements de positions. Outre la limitation des séquences à considérer, ce principe reflète qu'il est souvent irréaliste de rendre possible des écarts importants par rapport à la séquence nominale pour deux raisons : (i) le système peut limiter le champ d'action de contrôleurs et ces derniers perdent en flexibilité dans le réordonnement des avions, et (ii) des déviations importantes par rapport au séquençement initial pourraient être inacceptables par les compagnies aériennes en raison du viol du principe d'équité. L'approche CPS est conceptuellement intuitive et peut être ajustée pour tenir compte de diverses contraintes opérationnelles [25]. Toutefois, sa mise en œuvre en temps réel est plus complexe comme les arrivées sur l'écran radar ne sont pas connues à l'avance, d'autant plus que la prédiction des heures d'arrivées est perturbée par l'incertitude [40].

2.4.3 Synthèse

Le tableau 2.I résume les contributions s'inscrivant dans le cadre des politiques d'ordonnement d'atterrissages. De prime abord, nous pouvons constater que peu de travaux traitent de l'aspect aléatoire. Par conséquent, les heures d'atterrissages effectives diffèrent de celles prévues par des modèles de prédiction [37] et de celles estimées par les contrôleurs aériens [40]. De plus, excepté la contribution de Bennell et al. [6], peu d'importance a été accordée à l'ordre d'arrivée dynamique en temps réel des avions. Enfin, une limitation commune de ces travaux réside dans une validation restreinte des approches proposées. En particulier, très peu de travaux comparent les politiques d'ordonnement dans un environnement de simulation représentant des conditions plus réalistes. Une comparaison plus détaillée des différentes études est reprise dans la table 2.II, où nous avons employé les abréviations suivantes : stat. pour statique, dyn. pour dynamique, stoch. pour stochastique, prog. pour programmation, algo. pour algorithme, génét. pour génétique, rech. pour recherche, MIP pour mixed integer programming, multi-obj. pour multi-objectif, multi-opér. pour multi-opération, FT pour fenêtre de temps.

	Approches déterministes	Approches stochastiques
Approches exactes	[3, 4, 7, 11, 17, 26, 33, 42]	[19]
Approches heuristiques	[6, 12, 16, 34, 38]	[36, 43]

Tableau 2.I : Classification des politiques de séquençage

Approche	Configuration	Méthode	Multi-opér.	Contraintes	Pistes	Sim.
[3]	Stat.	Prog. Dyn.	Non	CPS	Simple	Non
[4]	Stat.	Job-shop	Non	FCFS	Simple	Non
[12]	Dyn.	Algo. Génét.	Non	FCFS	Simple	Non
[16]	Stat.	Rech. Taboue	Oui	CPS	Simple	Non
[26]	Stat., stoch.	Prog. Dyn.	Oui	CPS	Multiple	Non
[36]	Stat., stoch.	Branch & Bound	Oui	CPS	Multiple	Non
[43]	Stat., stoch.	Multi-obj.	Oui	CPS	Multiple	Oui
[27]	Stat.	Prog. Dyn.	Oui	CPS	Simple	Oui
[11]	Stat.	MIP	Non	Non	Multiple	Non
[21]	Stat.	Prog. Dyn.	Oui	CPS	Simple	Non
[6]	Dyn.	Multi-obj.	Non	FCFS+FT	Simple	Non

Tableau 2.II : Politiques d'ordonnancement des mouvements aériens

CHAPITRE 3

SIMULATEUR

Nous présentons dans ce chapitre les composantes principales permettant de construire un simulateur à événements discrets destiné à évaluer les politiques d'ordonnement considérées dans le chapitre précédent. Un simulateur à événements discrets est conçu en vue de mesurer et évaluer le comportement ainsi que la performance d'un système en termes de mesures de performances. Le simulateur en question décrit dynamiquement un système évoluant au cours du temps au moyen d'un modèle mathématique dont l'état change à des points discrets dans le temps. Ces points particuliers sont ceux auxquels se produit un événement impactant les variables d'état [23]. Par exemple, si nous considérons une simple file d'attente d'avions devant atterrir sur une piste, une arrivée d'un avion rejoignant cette file d'attente est un événement. Le simulateur calcule l'impact de l'arrivée sur le système et modifie en conséquence son état avant d'examiner l'événement d'après. Les variables d'état comprennent l'état de la piste (occupée ou vide), le nombre d'avions dans la file d'attente pour cette piste (le cas échéant) ainsi que leurs heures d'arrivées. À chaque arrivée, nous avons la possibilité de réordonner la file.

3.1 Prototype de simulateur

Dans notre prototype, nous considérons le problème d'ordonnement d'atterrissage sur une seule piste, vue comme un serveur, et nous souhaitons estimer le retard moyen des avions au seuil de la piste, par rapport à leurs heures d'arrivées prévues. Nous nous sommes inspirés initialement de Brentnall et Cheng [10], qui ont comparé plusieurs politiques d'ordonnement dans leur simulateur, sans toutefois considérer de bruit aléatoire sur le temps de vol, et avons adapté leur approche en nous basant sur la modélisation proposée par Torres et Nagle [41], dont le principe est résumé à la figure 3.1. Ces derniers utilisent la théorie des files d'attente et un protocole à deux étapes

- l'heure à laquelle chaque avion accède à la file d'attente d'arrivées (horizon de gel) sachant que le temps de service est nul pour la première file d'attente dédiée à l'ordonnancement où le flux d'arrivées apparaît sur l'écran radar.

Nous utilisons le retard total au seuil de piste comme mesure de performance permettant de discriminer les politiques d'ordonnancement. Il est défini comme :

$$R = \sum_{a \in \mathcal{A}} r_a \quad (3.1)$$

où \mathcal{A} représente l'ensemble des avions considérés, et r_a est le retard de l'avion a , exprimé par :

$$r_a = \max\{0, (L_a - S_a)\}.$$

L_a désigne le temps d'atterrissage de l'avion a et S_a signifie son heure d'arrivée prévue. Il est également possible de calculer le coût total des retards, noté C_r :

$$C_r = \sum_{a \in \mathcal{A}} C_a r_a,$$

où C_a représente le coût associé à l'avion a .

Les retards et coûts moyens s'obtiennent directement en divisant R et C_r par le nombre total d'arrivées dans la simulation, lequel est fixe. Ces arrivées sont générées selon un processus de Poisson conditionnel [2, 3, 41]. Plus précisément, le nombre d'arrivées est fixé sur une période définie de temps, et les instants d'arrivées sont générés uniformément sur la période [41]. Les temps de vol sont supposés déterministes ou stochastiques, auquel cas un bruit aléatoire est ajouté à ces temps.

3.2 Implantation de la politique CPS (S-CPS)

Si l'implantation de la politique FCFS est immédiate puisque les avions atterrissent dans leur ordre d'arrivée à l'IAF, la mise en œuvre de la politique CPS est des plus

complexes. Nous appliquons l’approche de Balakrishnan et Chandran [3], qui proposent de résoudre le problème CPS comme un problème de programmation dynamique déterministe, en ignorant toutefois les contraintes de précédence permettant de privilégier certains avions prioritaires. Ces contraintes peuvent être pertinentes notamment pour tenir compte des connexions entre vols [13]. Nous avons également légèrement adapté l’algorithme CPS en vue de minimiser le retard total au lieu du retard du dernier avion à atterrir.

Notons n le nombre d’avions à ordonner, égal au nombre d’étapes du programme dynamique, chaque étape correspondant à l’atterrissage d’un avion. Soit a_i l’avion atterrissant à l’étape i . L’état à l’étape j correspond à la séquence d’avions déjà ordonnés $\{a_1, \dots, a_{j-1}\}$ et le problème consiste à choisir l’avion a_j répondant à l’équation de Bellman

$$R^*(\{a_1, \dots, a_{j-1}\}) = \min_{a_j} r(\{a_1, \dots, a_{j-1}\}, a_j) + R^*(\{a_1, \dots, a_j\}),$$

où $R^*(\{a_1, \dots, a_j\})$ désigne le coût total optimal subi par les avions $\mathcal{A} \setminus \{a_1, \dots, a_j\}$ conditionnellement à la séquence s’arrivées $\{a_1, \dots, a_j\}$ et $r(\{a_1, \dots, a_{j-1}\}, a_j)$ le retard subi par l’avion a_j . La dimension de l’espace d’états croît néanmoins exponentiellement avec le nombre d’étapes, aussi Balakrishnan et Chandran [2] proposent de résoudre une approximation de ce problème en imposant une contrainte CPS, avec k le décalage maximale de la position d’un avion dans la séquence. Ils proposent de représenter l’état à l’étape j comme la séquence d’atterrissage de l’étape j à l’étape $j+k$, de sorte que le nombre d’états possibles à l’étape j est borné par $(2k+1)!$. La décision consiste à choisir parmi les sous-séquences possibles à l’étape $j+1$. L’avion atterrissant à l’étape $j+1$ est le premier avion de la sous-séquence sélectionnée et le coût additionnel est engendré par le retard subi par l’avion a_{j+1} .

Considérons à titre d’illustration une séquence de 5 avions à ordonner, avec $k=1$. Nous pouvons générer un réseau composé de noeuds contenant les différentes combinaisons possibles d’avions où chaque étape correspond à une position fixe dans la séquence

finale, comme illustré à la figure 3.2. L'ordonnancement optimal consiste à trouver le plus court chemin de l'étape 1 à l'étape 5. En appliquant un algorithme de correction d'étiquettes explorant le graphe en profondeur, il est possible d'identifier rapidement des sous-chemins de longueurs plus grandes que le meilleur chemin connu à une itération de la méthode. Dès lors, il est possible de les exclure en supprimant les arcs émanant du dernier nœud d'un tel sous-chemin, comme illustré à la figure 3.3. Finalement, le plus court chemin est déterminé et la séquence d'atterrissage correspond à la suite des premiers éléments des vecteurs d'état, comme représenté sur la figure 3.4.

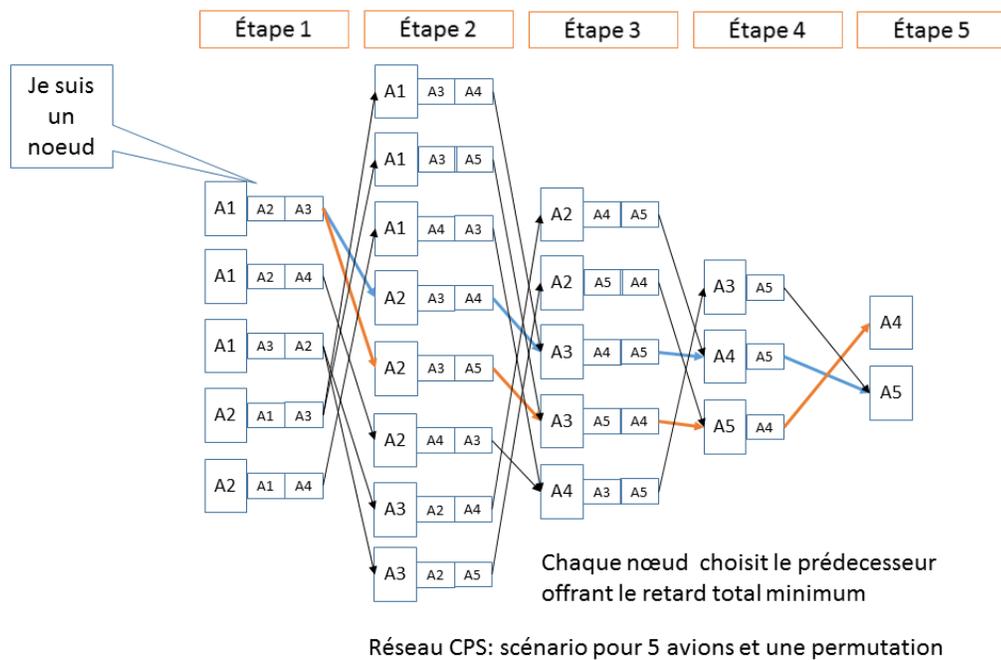


Figure 3.2 : Réseau CPS

La variante CPS implantée agit en amont du simulateur d'événements discrets, en supposant connue la séquence complète d'arrivées, et est à même de produire un estimé du retard total sans devoir recourir à la simulation, lequel estimé est toutefois imparfait en présence de bruit aléatoire sur les temps de vol. Ainsi, la stratégie FCFS est adaptative dans la mesure où elle modifie l'ordre d'atterrissage dans le cas bruité tandis que CPS le

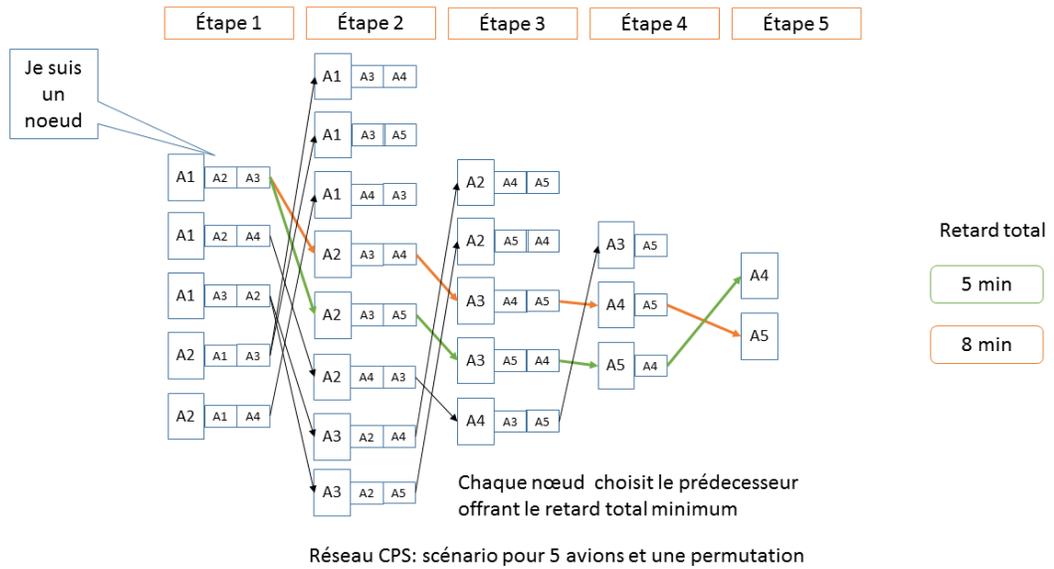


Figure 3.3 : Réseau CPS réduit

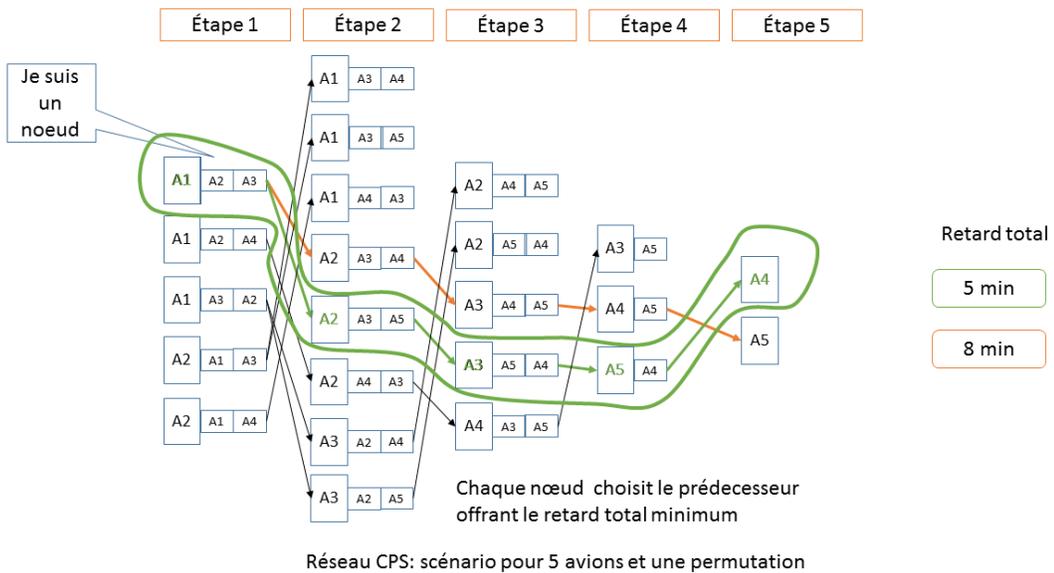


Figure 3.4 : Ordonnancement CPS optimal

fixe d'avance, se basant sur les temps d'arrivées prévus. Nous qualifierons cette stratégie CPS de statique, et la noterons S-CPS. Remarquons également que cette approche ne peut tenir compte des incertitudes sur les temps de vol.

3.2.1 D-CPS

L'approche précédente supposait la séquence d'arrivées totalement connue avant le début de la simulation, ce qui permet l'application de l'algorithme CPS avant celle-ci. En pratique, cependant, l'ordonnancement doit se faire en temps réel, quand les avions apparaissent sur l'écran radar du contrôleur en route, et plus l'avion est proche de la piste, moins il peut ajuster son temps d'arrivée. Nous modélisons le phénomène en définissant un horizon de gel après lequel la position de l'avion ne peut plus être modifiée dans la séquence, et appliquons l'algorithme CPS sur un horizon fuyant, lequel est ajusté à chaque arrivée d'un avion sur l'écran radar. Nous avons supposé dans nos expériences une fenêtre de temps de 25 minutes séparant la zone d'entrée sur le radar de l'horizon de gel, sous l'hypothèse supplémentaire que tous les avions se présentent dans le système avec la même vitesse, et gardent celle-ci fixe jusqu'à la frontière de l'horizon de gel. Cette valeur a été choisie afin d'anticiper partiellement les accroissements prévus d'horizon dans les outils de gestion d'arrivées, jusqu'à deux heures précédant l'heure planifiée d'atterrissage, alors que les outils actuels permettent de considérer les avions environ trente minutes de leur atterrissage. La différence entre les stratégies d'ordonnancement, appelées respectivement statique (S-CPS) et dynamique (D-CPS), est illustrée à la figure 3.5.

Le processus D-CPS est étroitement lié à une architecture de l'espace aérien impliquant deux files d'attente de type G/D/1, comme illustré à la figure 3.6, inspirée de Torres et Nagle [41].

L'arrivée d'un avion dans la zone radar suit un processus de Poisson conditionnel au nombre d'arrivées, comme décrit précédemment. L'avion qui arrive est inséré dans une première file d'attente, dont le service correspond au passage à l'horizon de gel, avec un

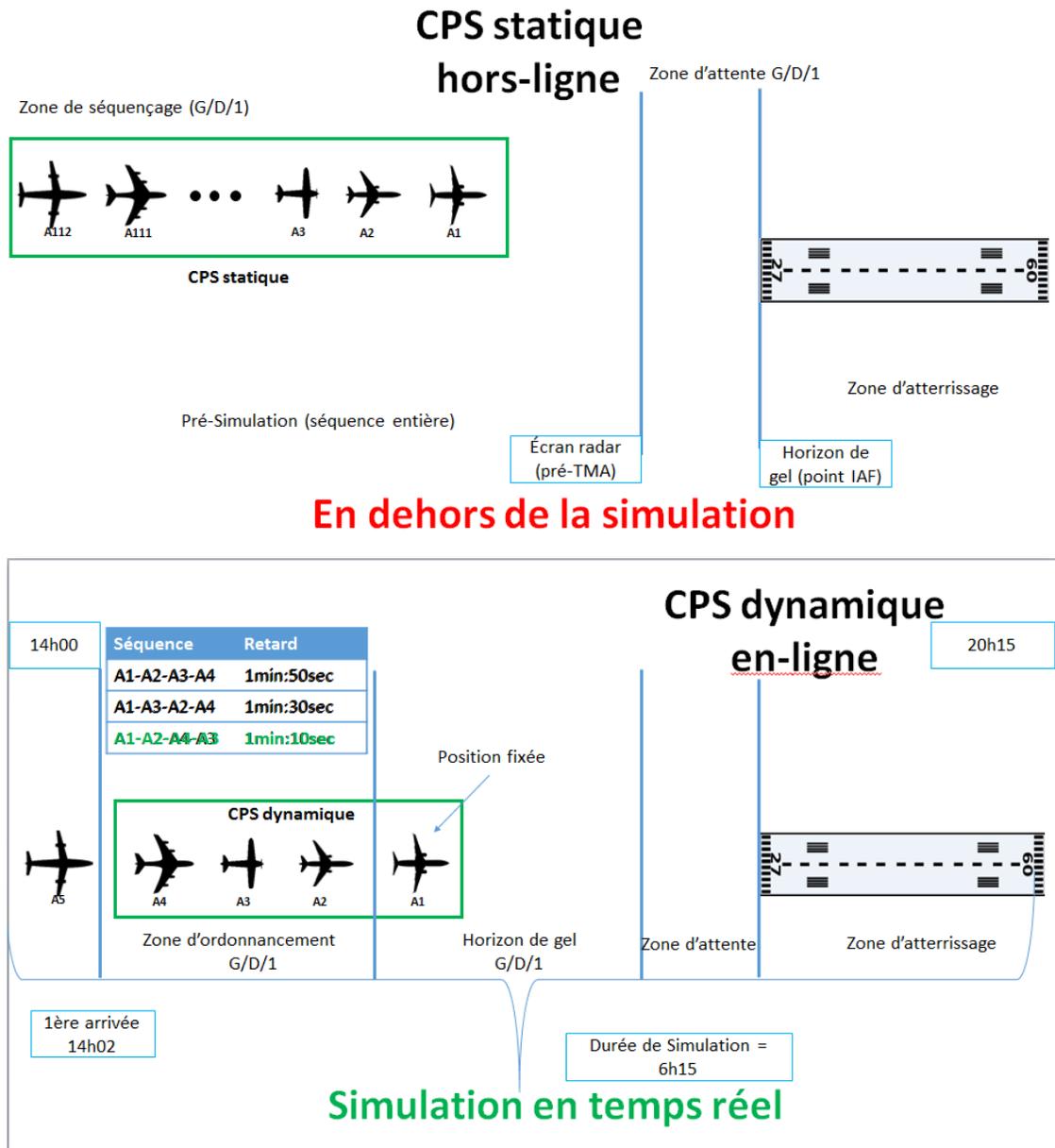


Figure 3.5 : Ordonnements statique et dynamique

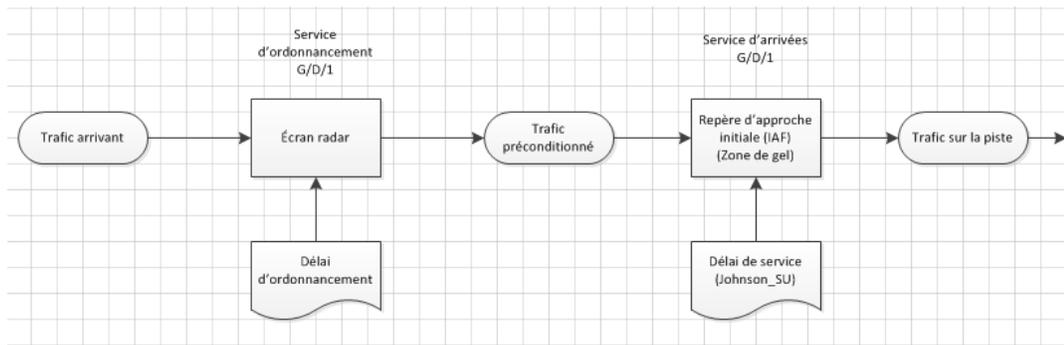


Figure 3.6 : Modèle de file d'attente des arrivées

temps de service instantané. Nous appliquons l'algorithme S-CPS à la liste des arrivées, en affectant à chaque avion de la liste comme heure d'arrivée à l'IAF celle obtenue lors de l'application précédente de S-CPS, exception faite de l'avion qui vient juste d'arriver, qui a comme heure d'arrivée prévue celle que nous trouvons dans les données. Les coûts et retards se calculent cependant en utilisant les déviations par rapport aux heures d'arrivées prévues dans les plan de vol. En outre, nous devons veiller à maintenir la contrainte de séparation minimale entre le premier avion de la file et tout avion situé après l'horizon de gel, ou en pratique, l'avion après l'horizon de gel qui en demeure le plus proche. À la fin d'exécution de S-CPS, chaque avion se voit attribuer une nouvelle heure d'arrivée à l'IAF.

À l'arrivée d'un avion à l'horizon de gel, son statut change : son ordre d'atterrissage ne peut plus être modifié. Nous le sortons de la liste des avions permutable et nous le plaçons à la fin d'une seconde liste G/D/1, reprenant les avions non permutable, et donc le service correspond à l'atterrissage sur la piste. Comme dans [16], nous supposons le temps de service comme constant et valant une minute. Ce temps de service se matérialise par la durée de la phase d'atterrissage, c'est à dire la période s'étalant entre le toucher des roues au sol de la piste, à la libération de celle-ci. Le temps d'attente d'un avion dans cette seconde liste correspond à la différence entre le temps de passage à l'horizon de gel et le temps attribué pour l'atterrissage, auquel nous pourrions ajouter un

bruit aléatoire pour refléter les incertitudes sur le plan de vol.

CHAPITRE 4

EXPÉRIENCES NUMÉRIQUES

Dans ce chapitre, nous présentons des résultats préliminaires liés au problème d'ordonnancement d'arrivées d'avions, ainsi que les outils retenus pour la mise en place d'un simulateur évaluant des politiques d'ordonnancement d'atterrissages. Les expériences sont menées dans un contexte d'horizon fini, et ont pour but d'exhiber la pertinence du prototype de simulateur par rapport à nos besoins, en se basant sur des données réelles et artificielles.

Plusieurs stratégies proposées dans la littérature sont considérées. Tout d'abord, nous distinguons un contexte statique pour lequel la séquence entière d'arrivées est figée et supposée connue à l'avance à l'encontre du cas dynamique, pour lequel la séquence initiale des avions est révélée progressivement au cours du temps. Ensuite, nous faisons la lumière sur le cadre de séquençage dynamique où les avions ne peuvent être pris en compte opérationnellement que lorsqu'ils apparaissent sur l'écran radar du contrôleur. Il est à noter que la séquence d'arrivées est modifiable en temps réel pour ce mode de séquençage. Plusieurs mesures de performances sont utilisées afin de discriminer entre les politiques d'ordonnancement, et une étude de l'impact du bruit aléatoire dans le contexte d'arrivée en présence d'incertitudes a été menée. Par ailleurs, nous avons relâché certaines hypothèses par souci de simplification. En particulier, nous nous sommes restreints au problème de séquençage d'arrivées en excluant les départs du jeu de données de base, adapté de l'étude de [16].

Dans un premier temps, nous détaillons le contexte technique et le cadre dans lequel ont été effectuées les expériences tout en rappelant la nature de la problématique traitée et les algorithmes de séquençage sélectionnés. Par la suite, nous présentons le jeu de données utilisées, le réglage des paramètres du simulateur, ainsi que notre méthode de validation.

4.1 Mise en oeuvre technique

Le simulateur a été implanté dans le langage open-source Julia¹, bénéficiant de diverses bibliothèques mathématiques accessibles. Il offre la possibilité de modifier au besoin des statistiques et de simulation. Nous avons eu recours à la bibliothèque SimJulia pour implanter le simulateur par événements discrets et avons tiré profit des bibliothèques connexes comme la bibliothèque RandomStreams² qui implémente le générateur de nombres aléatoires MRG32k3a [24], incluant les suites et les sous-suites.

Nous avons également enrichi la bibliothèque Distributions par l’ajout de l’implantation de la loi continue univariée de Johnson dans ses deux variantes SU et SB en raison de sa flexibilité d’adaptation vis à vis des données. De plus, nous avons utilisé le paquet "OnlineStats" pour l’intégration des collecteurs statistiques (voir p.e. [23], chapitre 3). Ce dernier offre la possibilité d’estimation des moments des distributions observées jusqu’à l’ordre 4. Nous avons également exploité le panel des méthodes de la bibliothèque "StatsBase", facilitant entre autres le calcul de quantiles et de la fonction de répartition empirique.

4.1.1 Données

Nous avons employé et adapté, dans nos expériences, des données réelles prélevées de l’aéroport de Linate de Milan, et rendues publiquement disponibles à l’adresse <http://or.dei.unibo.it/library>. Ces instances spécifient notamment la catégorie de turbulence de sillage, le type du mouvement (atterrissage ou décollage), les temps estimés d’atterrissages et de décollages. Seuls des avions de catégories “moyenne” et “faible”, décrites à la section 2.2 sont présents dans les données. En outre, nous avons converti les contraintes de séparation spatiales contenues dans des matrices dans le jeu de données d’origine en des séparations temporelles vu que notre objectif est de réduire le retard cumulatif sur l’ensemble des avions. De plus, nous avons collecté des

¹<http://www.julialang.org>

²<https://github.com/prsteele/RandomStreams.jl>

vitesse d'approche de la totalité des avions après avoir mené des recherches ciblées au contexte aérospatial sur des sites tiers spécialisés.

Les coûts considérés par Furini et al. [16] intègrent la consommation de kérosène et le nombre de sièges occupés par avion. Le temps d'occupation de la piste est considéré fixe et la durée de service à l'atterrissage vaut une minute, ce qui correspond au temps de service dans des conditions météorologiques propices, mais il peut également être étendu en cas de conditions météorologiques défavorables [30].

Nous avons synchronisé l'horloge de notre simulateur avec l'heure d'arrivée du premier avion au seuil de la piste, soit à 14h. En ce faisant, nous avons converti toutes les heures d'arrivées en minutes écoulées depuis le début de la simulation pour un suivi plus simple de l'évolution des événements. L'horizon de simulation est ainsi fixé à 375 minutes.

Sur la base de ce jeu de données réelles, nous avons également généré des données artificielles afin de consolider le comportement de la simulation vis-à-vis des mesures de performance, et valider les résultats. Dans un premier temps, nous avons maintenu le nombre et le type des avions se présentant à l'aéroport de destination au cours de la journée. Cependant, nous leur avons attribué des temps d'arrivées aléatoires. Plus précisément, nous supposons que les avions arrivent à la frontière de l'horizon de gel selon un processus de Poisson conditionnel au nombre d'arrivées [41]. De nombreux auteurs présument en effet que les avions se présentent à la région de contrôle (TMA) suivant un processus de Poisson [2, 3, 9, 10]. Toutefois, en pratique, le nombre d'avions devant atterrir au cours de la journée est habituellement connu à l'avance par les contrôleurs aériens. Ces derniers disposent d'ores et déjà des plans de vols marquant les heures prévues d'arrivées d'avions, ce qui rend le processus de Poisson conditionnel au nombre d'arrivées. La modélisation de l'approche retenue est similaire à l'implémentation proposée par Torres et Nagle [41].

4.1.2 Paramétrage du simulateur

En particulier, en vue de justifier le recours à la distribution qui permet de générer le retard survenant aux heures d'arrivées prévues, nous avons repris l'hypothèse avancée par Tielrooij et al. [40]. Cette dernière stipule que les variables matérialisant le retard sont aléatoirement indépendantes et identiquement distribuées. En outre, selon la même étude sus-mentionnée, les données du retard utilisées suivent une distribution de Johnson SU, laquelle est notamment commune dans le contexte de simulation [14]. Tielrooij et al. [40] ont analysé la prévision de l'incertitude sur les heures d'arrivées et ont examiné la correspondance entre les paramètres de la loi de probabilité de Johnson SU et un jeu de données réelles collectées à l'aéroport d'Amsterdam-Schipol.

À partir de nos expériences, nous avons ajusté les paramètres de la loi de Johnson SU de manière à produire une variation sur les temps d'arrivée à la frontière de l'IAF de plus ou moins 30 secondes, comme préconisé par Xue et Zelinski [43]. Plus précisément, nous avons utilisé le vecteur de paramètres $(\gamma, \delta, \lambda, \xi) = (0, 3.5, 1, 0)$ dans la fonction de répartition de la Johnson SU

$$F(x) = \gamma + \delta \sinh^{-1} \left(\frac{x - \xi}{\lambda} \right).$$

4.1.3 Génération des arrivées

Rappelons que le processus d'arrivées étudié dans ce mémoire est un processus de Poisson conditionnel au nombre d'arrivées des avions à l'aéroport de Linate de Milan. De ce fait, en nous inspirant de l'approche présentée par Torres et Nagle [41], nous avons subdivisé l'horizon de simulation en des sous-intervalles au sein desquels l'ensemble d'arrivées est fixé, mais les instants d'arrivées sont aléatoires.

Le nombre d'arrivées au sein d'un intervalle j peut être converti en un taux d'arrivée

λ_j dans la séquence originale d'observations comme suit :

$$\lambda_j = \frac{\#\mathcal{A}_j}{T_{\text{last},j} - T_{0,j}}, \quad (4.1)$$

où $\#\mathcal{A}_j$ constitue le nombre d'arrivées, $T_{\text{last},j}$ représente l'instant d'arrivée du dernier avion de la séquence et $T_{0,j}$ réfère au temps d'arrivée du premier avion.

Les bornes des intervalles ont été déterminées à partir d'un examen visuel sur le graphique des arrivées cumulées en fonction du temps, tel que le montre la figure 4.1. Une approximation linéaire par morceaux a été établie afin de situer les points qui se rapprochent le plus dans le but d'en estimer des taux d'arrivée. Chaque segment correspond à un taux d'arrivée constant résultant de la division du nombre d'arrivées par le temps écoulé jusqu'à la dernière arrivée au sein de l'intervalle, tel qu'explicité par (4.1). Quatre intervalles ont été retenus, dont les caractéristiques sont résumées dans la table 4.I.

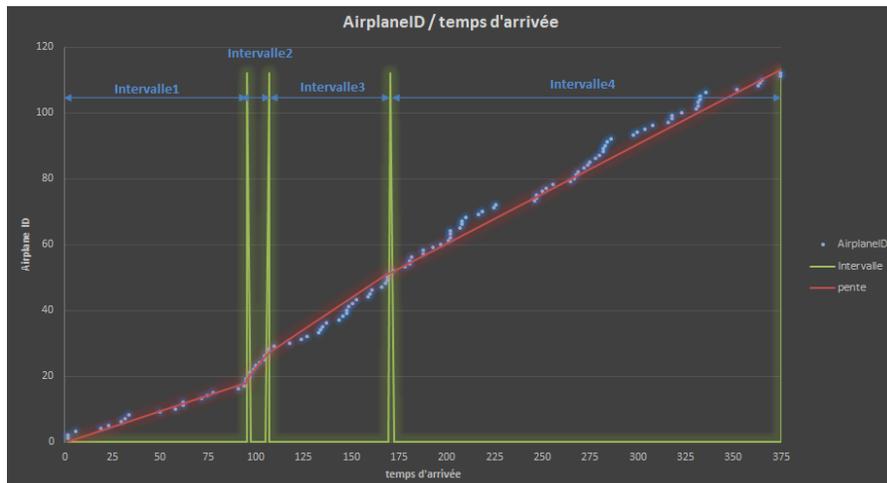


Figure 4.1 : Modèle du processus d'arrivées approximatif de Poisson

Une fois les intervalles fixés et que le taux d'arrivée soit déterminé pour chaque intervalle, nous générons les arrivées. Pour cela, nous tirons n uniformes sur la durée de l'intervalle, où n est le nombre d'arrivées pendant les intervalles. Chaque tir représente une arrivée, et nous attribuons à l'avion correspondant à la i^e arrivée la classe du i^e avion

Intervalle	Index	Intervalle	Taux
1	[1,18]	[0,94]	0.19
2	[19,26]	[95,106]	0.73
3	[27,50]	[107,169]	0.39
4	[51, 112]	[170, 375]	0.30

Tableau 4.I : Taux d'arrivée par intervalles

dans la séquence originale d'arrivées. En d'autres termes, nous gardons les mêmes arrivées que dans les données originales, mais modifions aléatoirement les temps d'arrivée.

Nous supposons que les avions apparaissent sur l'écran radar 45 minutes avant leur arrivée prévue à l'IAF. La séquence d'avions est ordonnançable entre la zone séparant leur passage par l'écran radar jusqu'à la frontière de la zone de gel où le contrôleur cesse toute opération de re-séquencement. Cette hypothèse permet de garantir la satisfaction de la contrainte des écarts de séparation minimum.

Le temps d'attente se calcule comme la différence entre le temps de passage prévu à l'IAF et le temps effectif d'arrivée à l'IAF. Le collecteur statistique à l'IAF est en mesure d'enregistrer le délai potentiel supplémentaire qu'absorbe l'avion en raison du bruit aléatoire généré hormis le retard infligé par le contrôleur afin de respecter les délais de séparation à l'atterrissage.

4.2 Comparaisons de politiques

Nous présentons dans cette section la fonction objectif décrivant le retard total subi par la séquence d'avions, que la politique d'ordonnancement cherche à minimiser approximativement. Dans un second temps, nous comparons la performance de politiques de séquençage sur des données réelles et des données simulées en présence et en absence du bruit. La fonction de coût retenue est le retard total (3.1), i.e. la somme des retards, exprimée par la différence entre le temps d'atterrissage et le temps planifié d'arrivée.

Nous comparons les trois politiques S-CPS, D-CPS et FCFS, en termes du retard total, en présence et en absence de bruit sur l'heure d'arrivée, ainsi que du retard moyen

par avion. Par conséquent, nous avons un ensemble de 6 scénarios à analyser. Nous considérons dans un premier temps la séquence des données d'origine, et dans un second temps les performances des algorithmes d'ordonnement sur des données simulées. En présence de bruit aléatoire, les comparaisons se font sur 10 simulations. La comparaison entre les trois politiques d'ordonnement abordées a été établie en les confrontant deux à deux à partir de variables aléatoires communes [23], en générant des suites distinctes pour les différentes variables concernées [24]. Nous avons également cherché à limiter l'erreur de couverture des intervalles de confiance construits en ayant recours à la loi de probabilité de Student.

4.2.1 Comparaison sur des données réelles

Nous présentons à présent les principaux résultats obtenus en comparant les politiques d'ordonnement FCFS, S-CPS et D-CPS sur des données réelles.

Dans un contexte exempt de bruit, nous ne pouvons pas effectuer une analyse statistique poussée lors de la simulation opposant les politiques d'ordonnement FCFS, S-CPS ou D-CPS car nous n'avons qu'une observation. Nous n'avons donc pas besoin de répliquer la simulation non plus. Il est à noter toutefois que D-CPS et S-CPS ont quasiment le même comportement en absence de bruit à une permutation près. Elles peuvent donc être considérées confondues par la stratégie mère les chapeautant, à savoir CPS. Par conséquent, nous avons noté que FCFS a enregistré un retard total de 32,946 minutes alors que CPS, par ses deux variantes S-CPS et D-CPS, a engrangé un retard de 31,974 minutes, marquant un gain global sur le retard total de 0,972 minutes par rapport à FCFS.

Pendant, en termes de coût de retard ³, la politique FCFS présente la moindre valeur valant 126,93 tandis que S-CPS et D-CPS affichent des coûts respectifs de 134,08 et 136,08. La différence observée sur les coûts s'explique par une permutation pénalisante

³Pour une idée approfondie sur l'unité utilisée pour la caractérisation de coût, il est conseillé de consulter l'article de Furini et al. [16].

entre deux avions qu’implique D-CPS mais pas S-CPS.

En présence du bruit, le retard total moyen sur 10 simulations enregistré avec la politique FCFS est de 30,24 minutes contre un retard total moyen de 36,65 minutes par S-CPS et 35,93 minutes pour D-CPS. Le retard par avion est indiqué dans la table 4.II et la différence de performance entre les politiques est résumée par la table 4.III. Nous pouvons ainsi observer qu’en présence de bruit, tous les avions accusent un retard plus important sous les politiques S-CPS et D-CPS qu’avec la politique FCFS. Ce résultat montre que cette politique est la plus fiable parmi les autres, conformément à ce qui avait précédemment rapporté par Brentnall et Cheng [10]. Des résultats plus détaillés pour FCFS et S-CPS sont fournis à l’annexe II.

Politique	Retard moyen	Min	Max	IC
FCFS	0,27	0,2	0,33	[0,24 ; 0,3]
S-CPS	0,33	0,26	0,41	[0,29 ; 0,36]
D-CPS	0,32	0,25	0,4	[0,29 ; 0,36]

Tableau 4.II : Retard par avion en présence de bruit

Différence	Moy	Min	Max	IC
FCFS–S-CPS	-0,06	-0,08	-0,026	[-0,07 ; 0,05]
FCFS–D-CPS	-0,05	-0,07	-0,012	[-0,07 ; 0,04]

Tableau 4.III : Différence de retard par avion en présence de bruit

4.2.1.1 Comparaison entre des données simulées

Les mêmes analyses ont été conduites sur des données simulées, construites comme décrit précédemment 4.2.1. Les statistiques de retard par avion sont résumées dans le tableau 4.IV, tandis que les différences de performance entre les politiques sont présentées dans le tableau 4.V montrant que les politiques S-CPS et D-CPS sont préférables à FCFS en absence de bruit sur l’heure d’arrivée à l’IAF. Par contre, en présence de bruit, FCFS est à nouveau, comme sur les données réelles, la politique la plus performante.

Politique	Retard moyen	Min	Max	IC
FCFS	0,30	0,18	0,49	[0,24 ; 0,37]
S-CPS	0,29	0,18	0,45	[0,23 ; 0,35]
D-CPS	0,29	0,18	0,45	[0,23 ; 0,35]
FCFS+bruit	0,30	0,18	0,48	[0,24 ; 0,37]
S-CPS+bruit	0,33	0,20	0,48	[0,27 ; 0,38]
D-CPS+bruit	0,33	0,21	0,48	[0,27 ; 0,38]

Tableau 4.IV : Statistiques sur les 10 simulations

Différence	Moy	Min	Max	IC
FCFS–S-CPS	0,01	0	0,04	[0 ; 0,02]
FCFS–D-CPS	0,01	0	0,04	[0 ; 0,02]
FCFS–S-CPS avec bruit	-0,02	-0,07	-7,21E-05	[-0,04 ; -0,01]
FCFS–D-CPS avec bruit	-0,02	-0,08	2,4E-03	[-0,04 ; -0,01]

Tableau 4.V : Comparaison sur les 10 simulations

Afin de nous assurer de la crédibilité de nos résultats, nous avons reproduit l'expérience sur 10 jeux additionnels de données simulées et ce en absence aussi bien qu'en présence du bruit. Pour chacun des jeux de données, nous comparons les politiques FCFS et S-CPS. Les résultats détaillés sont repris en annexe III. Sur 10 simulations, en absence de bruit, la performance de la politique S-CPS dépasse celle de FCFS en termes de réduction de retard à 8 reprises avec un net avancement. Pour les 2 répétitions restantes, les deux politiques ont une performance égale. Néanmoins, malgré le gain enregistré en termes de retard total, deux parmi les 10 simulations affichent une détérioration du coût associé aux retards, et ce en raison des différents types d'avions. En effet, le coût des retards, considéré dans notre étude comme une simple mesure de performance, dépend directement de la classe d'avions comme suggéré dans [16]. En présence du bruit, nous déduisons que la politique FCFS est plus robuste que les autres stratégies d'ordonnement, comme suggéré par Brentnall et Cheng [10].

CHAPITRE 5

CONCLUSION

Ce mémoire a pour objectif d'illustrer l'intérêt de la simulation à événements discrets sur horizon fini dans la validation de politiques d'ordonnancement d'arrivées d'avions. Il a aussi pour but de souligner l'importance de la prise en compte du bruit lors de la comparaison de différentes stratégies d'ordonnancement dans l'optique d'offrir un prototype d'outil d'aide à la décision aux contrôleurs aériens. À cette fin, nous avons implémenté deux algorithmes classiques de la littérature de séquençage d'arrivées d'avions, à savoir la stratégie FCFS et le CPS-statique, dénoté S-CPS, par programmation dynamique [2], et nous l'avons étendue dans un cadre dynamique par horizon fuyant, variante que nous avons appelée D-CPS.

Nous avons ensuite procédé à une comparaison par simulation des trois politiques sur base du retard total des atterrissages sur des données réelles ainsi que des données simulées, avec et sans bruit aléatoire sur les temps de vol. Il s'est avéré que les politiques S-CPS et D-CPS sont plus performantes en moyenne que la politique FCFS en termes de réduction du retard total en absence de bruit, mais que FCFS était la politique la plus avantageuse en présence de bruit, en phase avec ce qui avait été avancé par [10]. Les performances des politiques S-CPS et D-CPS étaient comparables, avec un léger avantage pour D-CPS en présence de bruit.

Une des alternatives pour mitiger l'effet de l'incertitude est de concevoir une approche multi-étapes en considérant plusieurs points de décisions. Ceci pourrait être réalisé dans un premier temps en concevant une politique qui tient compte de l'incertitude, obtenue par exemple en optimisant l'ordonnancement par programmation stochastique.

Une conception plus flexible d'expérimentations en termes de variation du taux de bruit selon des distributions différentes avec une analyse de sensibilité du facteur le plus influent sur les retards est envisageable pour accorder plus de confiance dans nos résultats

et en déterminer les failles, s'il y a lieu. Nous notons aussi que les résultats obtenus par notre prototype de simulation concernent un jeu de données précis [16] et ont donc une portée limitée. Nous avons également fait l'hypothèse stipulant que les avions évoluent dans un seul espace aérien contenant un seul flux d'arrivées d'avions, sans distinction de routes aériennes. De plus, nous avons fait l'hypothèse que l'aéroport de destination possède une seule piste d'atterrissage.

Plusieurs axes de développement pourraient faire l'objet de travaux futurs, notamment par l'ajout d'autres politiques d'ordonnancement. Nous pourrions aussi améliorer la formulation du processus d'arrivée en permettant à un avion d'arriver dans une autre fenêtre de temps que celle prévue initialement. Nous pourrions par exemple tirer aléatoirement le nombre d'avions dans chaque intervalle, sous la contrainte que la somme des nombres d'avions par intervalle est égale au nombre total d'avions dans la séquence et affecter leurs types sur l'ensemble de la séquence. De plus, il serait possible de tenir compte d'avantage de contraintes opérationnelles telles que les fenêtres de temps sur les heures d'arrivées. Nous pourrions aussi mesurer l'impact des avances des arrivées en plus des retards dans la fonction objectif. Il est également recommandé d'assurer la prise en charge des arrivées jusqu'au seuil de piste plutôt que sur la zone IAF pour respecter une modélisation suffisamment réaliste de l'espace aérien ensemble avec la région de contrôle TMA selon un niveau de détail plus fin. Nous pouvons également étudier le cas d'arrivées d'avions avec plusieurs pistes d'atterrissages/décollages et en investiguer la taxonomie et évaluer son impact sur les opérations de décollage/atterrissage. En particulier, il serait pertinent d'étudier le cas de la dépendance et de l'hétérogénéité des pistes à usage mixte impliquant départs et arrivées ensemble. Nous pouvons aussi analyser l'effet de la prise en charge des cas d'atterrissage d'urgence ainsi que des vols court-courriers, affectant le séquençage d'une façon dynamique en apparaissant sur le radar après l'horizon de gel, ce qui pourrait affecter l'ordonnancement établi préalablement. Nous pouvons également nous intéresser au problème de décollage en plus des atterrissages, ainsi que plusieurs points IAF, au lieu d'un seul, réduisant potentiellement les

retards de maintien dans des circuits d'attente avoisinant l'aéroport.

Il n'est pas non plus écarté d'examiner la distribution du bruit aléatoire et de la valider sur des données empiriques cibles en incluant plusieurs hypothèses en temps réel qui contribuent au retard éventuel d'arrivée d'un avion au point IAF. Nous pourrions aussi songer à adopter la technique de l'apprentissage machine utile pour une meilleure prédiction de la trajectoire. Ceci exigerait d'avoir en notre possession suffisamment de données relatives aux heures d'arrivées effectives d'avions ainsi que des conditions de vol (conditions météorologiques, vitesse réelle, poids de l'avion, etc.), assorties d'un modèle de prédiction de trajectoire pour entraîner ses paramètres. La question de l'adoption de l'apprentissage machine se pose surtout à la frontière de l'horizon de gel comme l'ordonnancement est alors fixé sur la base des prévisions de trajectoire.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Federal Aviation Administration. 2016 performance and accountability report. Report technique, U.S. Department of Transportation, Washington D.C., USA, 2016.
- [2] Hamsa Balakrishnan et Bala Chandran. Scheduling aircraft landings under constrained position shifting. Dans AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Keystone, CO, USA, 2006. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [3] Hamsa Balakrishnan et Bala Chandran. Algorithms for scheduling runway operations under constrained position shifting. Operations Research, 58(6):1650–1665, 2010.
- [4] John E. Beasley, Mohan Krishnamoorthy, Yazid M. Sharaiha et David Abramson. Scheduling aircraft landings – the static case. Transportation Science, 34(2):180–197, 2000.
- [5] Julia A. Bennell, Mohammad Mesgarpour et Chris N. Potts. Airport runway scheduling. 4OR, 9(2):115–138, 2011.
- [6] Julia A. Bennell, Mohammad Mesgarpour et Chris N. Potts. Dynamic scheduling of aircraft landings. European Journal of Operational Research, 258(1):315–327, 2017.
- [7] Dimitris Bertsimas, Guglielmo Lulli et Amedeo Odoni. An integer optimization approach to large-scale air traffic flow management. Operations Research, 59(1): 211–227, 2011.
- [8] Michael Jacob Bloem. Optimization and analytics for air traffic management. phd-thesis, Stanford University, 2015.

- [9] Adam R. Brentnall. Aircraft Arrival Management. Thèse de doctorat, University of Southampton, Southampton, United Kingdom, 2006.
- [10] Adam Robert Brentnall et Russell C. H. Cheng. Some effects of aircraft arrival sequence algorithms. Journal of the Operational Research Society, 60(7):962–972, 2009.
- [11] Dirk Briskorn et Raik Stolletz. Aircraft landing problems with aircraft classes. Journal of Scheduling, 17(1):31–45, 2014.
- [12] Salvatore Capri et Matteo Ignaccolo. Genetic algorithms for solving the aircraft-sequencing problem : the introduction of departures into the dynamic model. Journal of Air Transport Management, 10(5):345–351, 2004.
- [13] Gregory C. Carr, Heinz Erzberger et Frank Neuman. Fast-time study of airline-influenced arrival sequencing and scheduling. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 23(3):526–531, 2000.
- [14] Christine S.M. Currie et Russell C.H. Cheng. A practical introduction to analysis of simulation output data. Dans R. Pasupathy, S.-H. Kim, A. Tolk, R. Hill et M. E. Kuhl, éditeurs, Proceeding of the 2013 Winter Simulation Conference, pages 328–341. IEEE Press, 2013.
- [15] Roger G. Dear. The dynamic scheduling of aircraft in the near terminal area. Rapport technique FTL Report R76-9, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 1976.
- [16] Fabio Furini, Martin Philip Kidd, Carlo Alfredo Persiani et Paolo Toth. Improved rolling horizon approaches to the aircraft sequencing problem. Journal of Scheduling, 18(5):435–447, 2015.

- [17] Ahmed Ghoniem, Farbod Farhadi et Mohammad Reihaneh. An accelerated branch-and-price algorithm for multiple-runway aircraft sequencing problems. European Journal of Operational Research, 246(1):34–43, 2015.
- [18] Julien Guepet. Optimization of airport operations : stand allocation, ground routing and runway sequencing. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France, 2015.
- [19] Andreas Heidt, Hartmut Helmke, Manu Kapolke, Frauke Liers et Alexander Martin. Robust runway scheduling under uncertain conditions. Journal of Air Transport Management, 56:28–37, 2016.
- [20] Robert Horonjeff, Francis X. McKelvey, William J. Sproule et Seth B. Young. Planning & Design of airports. McGraw-Hill, New York, NY, USA, 5 édition, 2010.
- [21] Alexandre Jacquillat et Amedeo R. Odoni. An integrated scheduling and operations approach to airport congestion mitigation. Operations Research, 63(6):1390–1410, 2015.
- [22] Aram Karagueuzian, Guillaume Rodier et Daniel Sallier. World airport traffic forecasts 2016–2040. Rapport technique, Airports Council International, Montreal, QC, Canada, 2016.
- [23] Averill M. Law. Simulation Modeling & Analysis. McGraw-Hill, New York, NY, USA, 5 édition, 2015.
- [24] Pierre L’Ecuyer. Good parameters and implementations for combined multiple recursive random number generators. Operations Research, 47(1):159–164, 1999.
- [25] Hanbong Lee. Tradeoff evaluation of scheduling algorithms for terminal-area air traffic control. Mémoire de maîtrise, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 2008.

- [26] Alexander Lieder et Raik Stolletz. Scheduling aircraft take-offs and landings on interdependent and heterogeneous runways. Transportation Research Part E : logistics and transportation review, 88:167–188, 2016.
- [27] Waqar A. Malik et Yoon C. Jung. Exact and heuristic algorithms for runway scheduling. Dans 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Washington, D.C., USA, 2016. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [28] Larry Meyn et Heinz Erzberger. Airport arrival capacity benefits due to improved scheduling accuracy. Dans AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference, Arlington, VA, USA, 2005. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [29] Bojana Mirkovic et Vojvode Stepe. Airfield modelling–state of the art. Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, Safety DoAaAT, 2011.
- [30] Richard de Neufville, Amedeo R. Odoni, Peter Belobaba et Tom G. Reynolds. Airport Systems : Planning, Design and Management. McGraw-Hill, New York, NY, USA, 2 édition, 2013.
- [31] Frank Neuman et Heinz Erzberger. Analysis of sequencing and scheduling methods for arrival traffic. Rapport technique NASA-TM-102795, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, USA, 1990.
- [32] Tae H. Oum et Xiaowen Fu. Concurrence et interactions entre aéroports, services de transports aériens et ferroviaires, chapitre Influence des aéroports sur la concurrence dans le transport aérien : regard sur les performances des aéroports et les relations verticales entre aéroports et compagnies aériennes. OCDE, 2009.
- [33] Marcella Samà, Andrea D’Ariano, Paolo D’Ariano et Dario Pacciarelli. Opti-

- mal aircraft scheduling and routing at a terminal control area during disturbances. Transportation Research Part C, 47:61–85, 2014.
- [34] Marcella Samà, Andrea D’Ariano, Francesco Corman et Dario Pacciarelli. Metaheuristics for efficient aircraft scheduling and re-routing at busy terminal control areas. Transportation Research Part C, 80:485–511, 2017.
- [35] Cristoph Schinwald, Kay O. Plötner et Mirko Hornung. Evaluation of airport capacity measures. Dans AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, Grapevine, TX, USA, 2017. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [36] Gustaf Sölveling et John-Paul Clarke. Scheduling of airport runway operations using stochastic branch and bound methods. Transportation Research Part C, 45: 119–137, 2014.
- [37] Gustaf Sölveling, Senay Solak, John-Paul Clarke et Ellis Johnson. Runway operations optimization in the presence of uncertainties. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 34(5):1373–1382, 2011.
- [38] Maarten J. Soomer et Geert Jan Franx. Scheduling aircraft landings using airlines’ preferences. European Journal of Operational Research, 190(1):277–291, 2008.
- [39] Dusan Teodorovic et Milan Janic. Transportation Engineering : Theory, Practice and Modeling. Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom, 2016.
- [40] Maarten Tielrooij, Clark Borst, Marinus M. Van Paassen et Max Mulder. Predicting arrival time uncertainty from actual flight information. Dans Proceedings of the 11th USA/Europe air traffic management research and development seminar, 2015.
- [41] Sergio Torres et Gaurav Nagle. Analysis of prediction uncertainty in interval management. Dans 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, pages 31–51, Washington D.C., USA, 2016.

- [42] Min Wen, Jesper Larsen et Jens Clausen. An exact algorithm for aircraft landing problem. Rapport technique IMM-Technical Report-2005–12, Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 2005.
- [43] Min Xue et Shannon Zelinski. A stochastic scheduler for integrated arrival, departure, and surface operations in los angeles. Dans 15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Dallas, TX, USA, 2015. American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Annexe I

Résultats de FCFS et S-CPS

Nous illustrons dans cette partie quelques résultats illustratifs sous les politiques FCFS et S-CPS. Nous présentons dans cette annexe les écarts d'inter-arrivées, les retards des avions et les coûts résultants obtenus avec les données réelles. Notons que le terme inter-arrivée se définit comme la différence entre deux arrivées effectives au seuil de la piste.

Les temps sont exprimés en minutes, sauf mention contraire. Nous pouvons observer que les retards ainsi que les coûts augmentent en présence du bruit aléatoire.

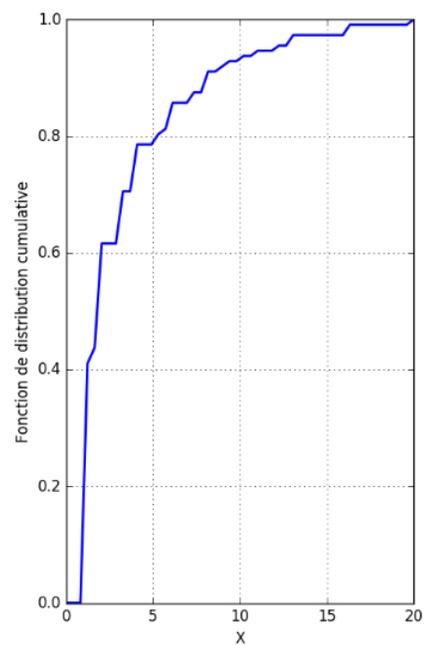
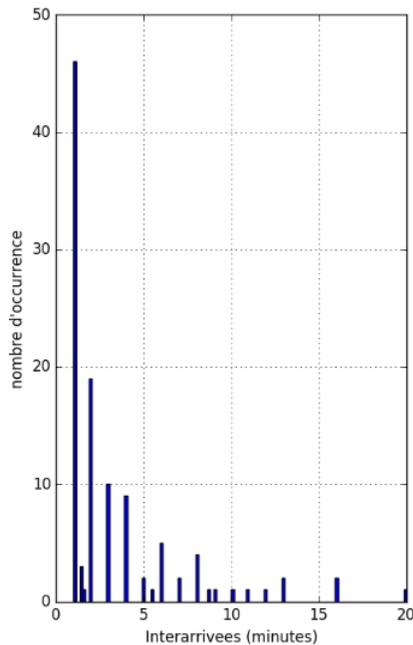


Figure I.1 : Fréquence des inter-arrivées sous FCFS

Figure I.2 : Fonction de répartition des inter-arrivées sous FCFS

La courbe I.27 montre la similarité des résultats obtenus en terme d'heures d'arrivées pour les données réelles (en bleu) et les données simulées (en rouge).

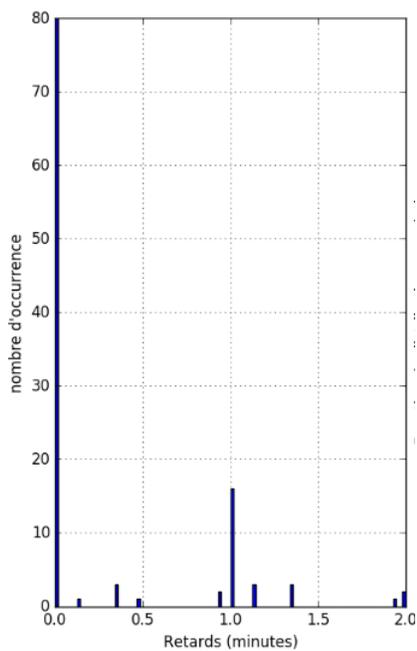


Figure I.3 : Fréquence des retards sans bruit sous FCFS

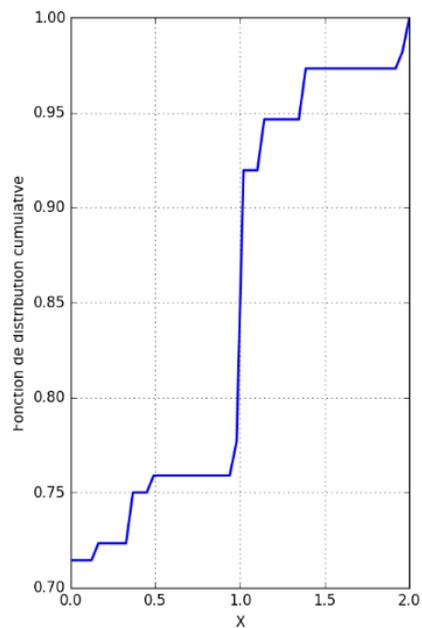


Figure I.4 : Fonction de répartition des retards sans bruit sous FCFS

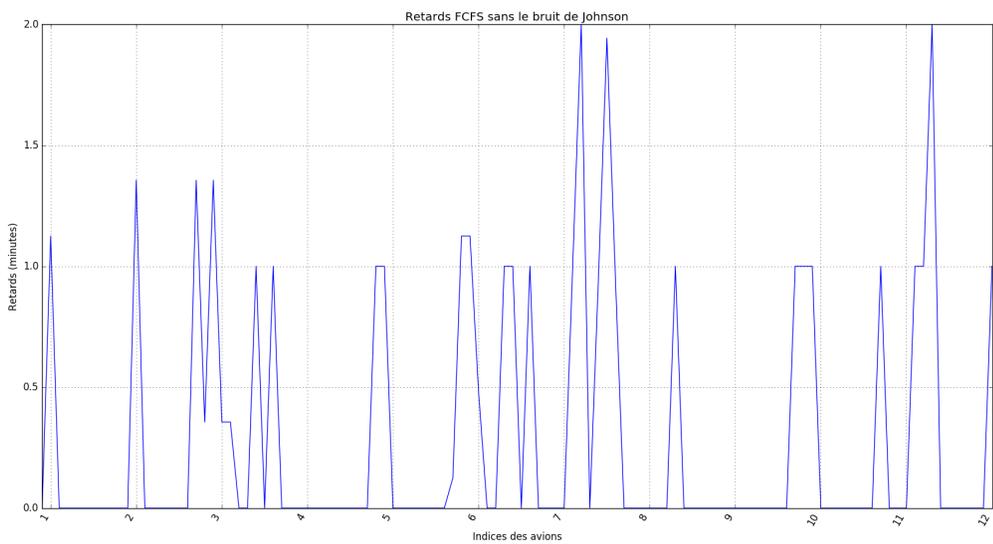


Figure I.5 : Retards par avion sans bruit sous FCFS

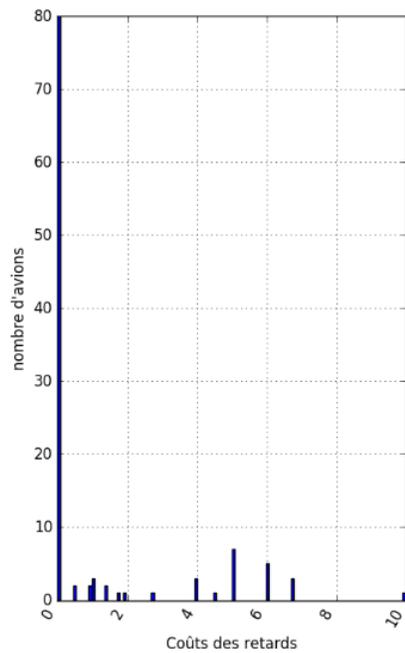


Figure I.6 : Fréquence des coûts sans bruit sous FCFS

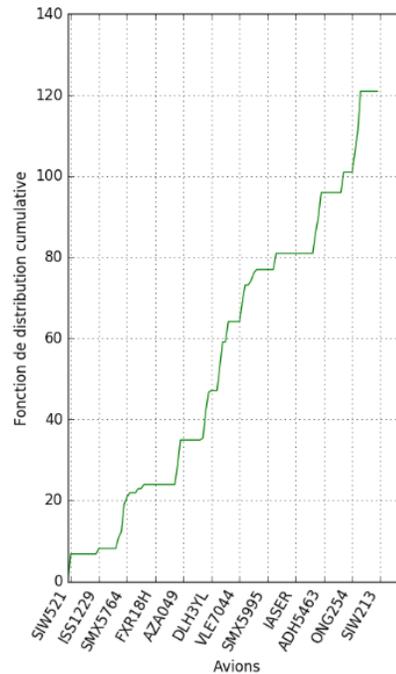


Figure I.7 : Fonction de répartition des coûts sans bruit sous FCFS

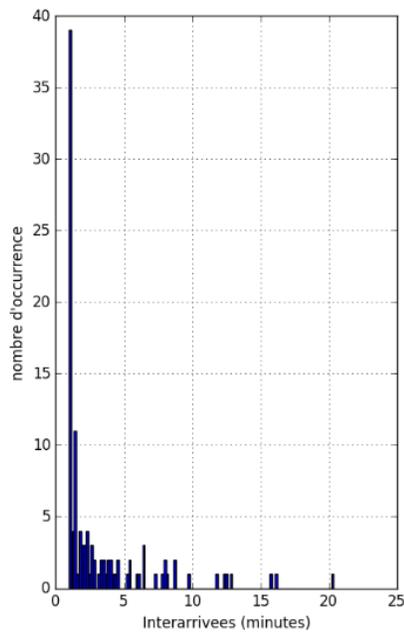


Figure I.8 : Fréquence des inter-arrivées avec bruit sous FCFS

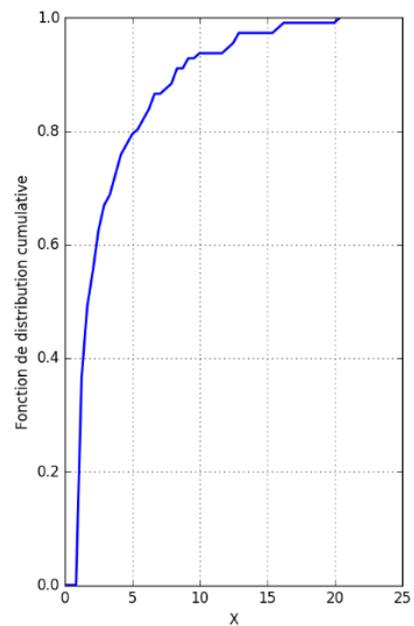


Figure I.9 : Fonction de répartition des inter-arrivées avec bruit sous FCFS

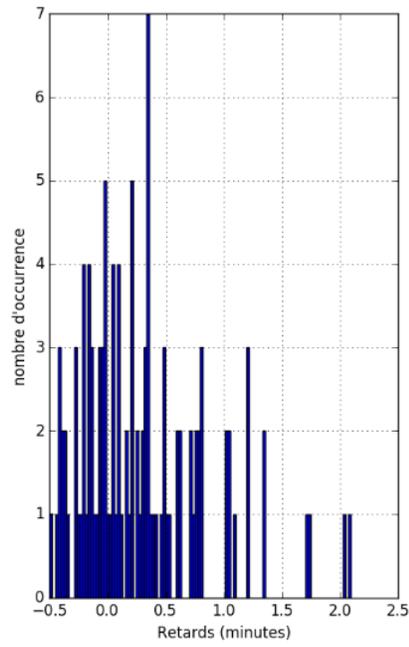


Figure I.10 : Fréquence des retards sous FCFS

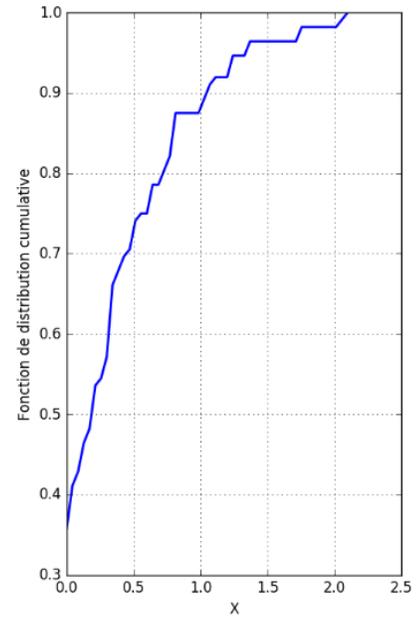


Figure I.11 : Fonction de répartition des retards sous FCFS

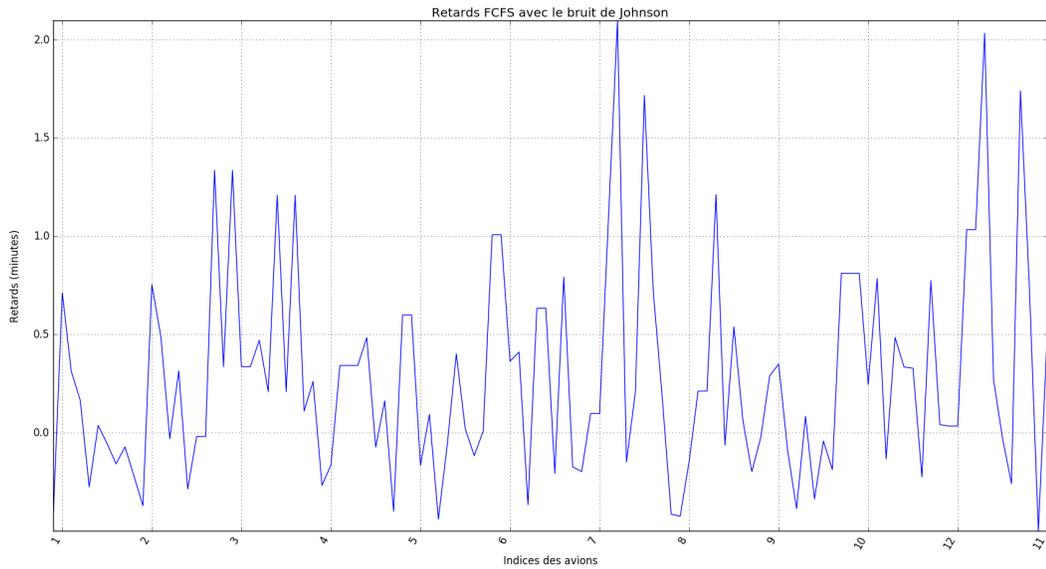


Figure I.12 : Retards par avion avec bruit sous FCFS

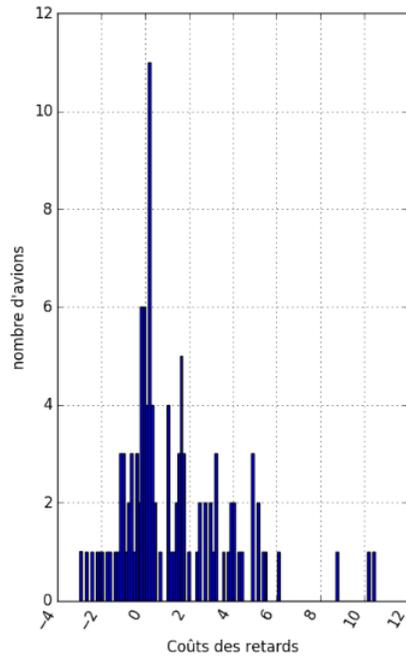


Figure I.13 : Fréquence des coûts sous FCFS avec bruit

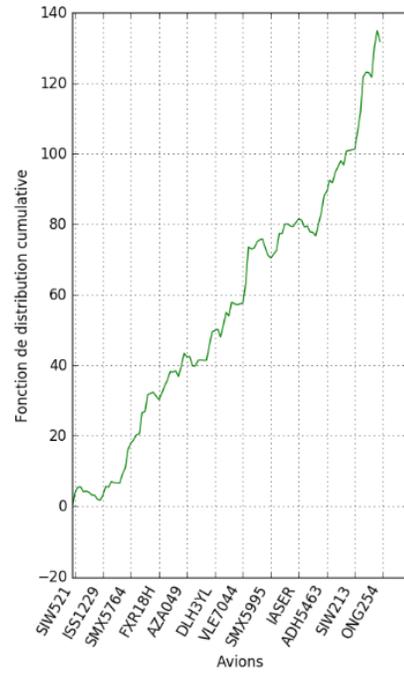


Figure I.14 : Fonction de répartition des coûts sous FCFS avec bruit

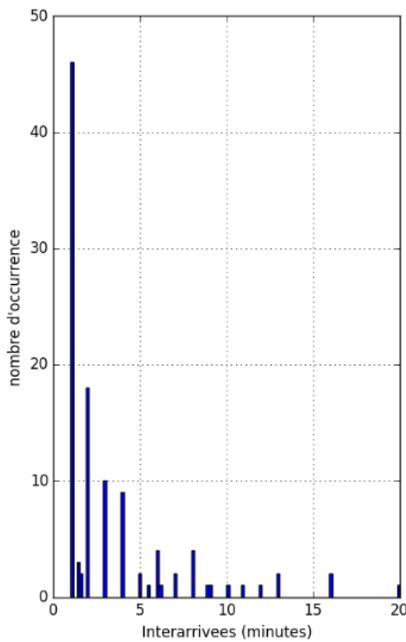


Figure I.15 : Fréquence des inter-arrivées sous S-CPS sans bruit

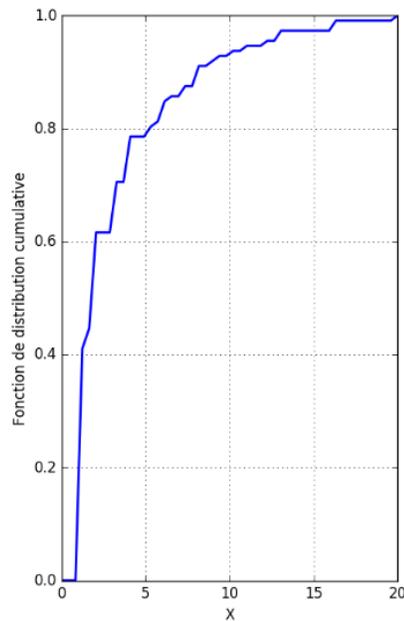


Figure I.16 : Fonction de répartition des inter-arrivées sous S-CPS sans bruit

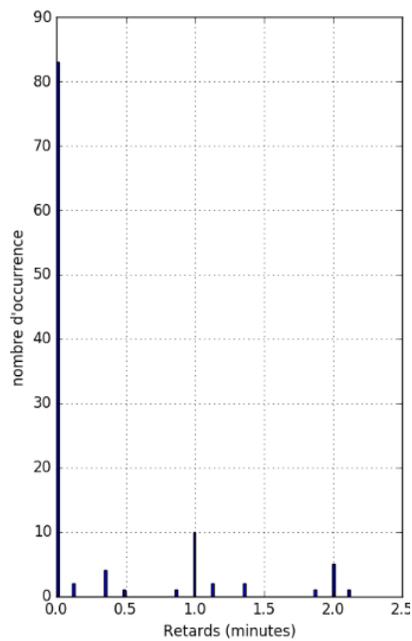


Figure I.17 : Fréquence des retards sans bruit sous S-CPS

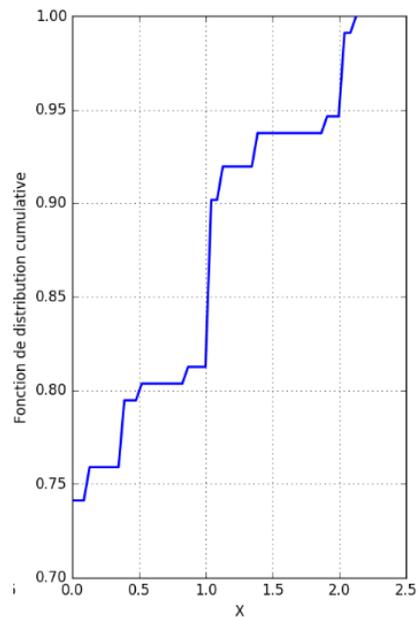


Figure I.18 : Fonction de répartition des retards sans bruit sous S-CPS

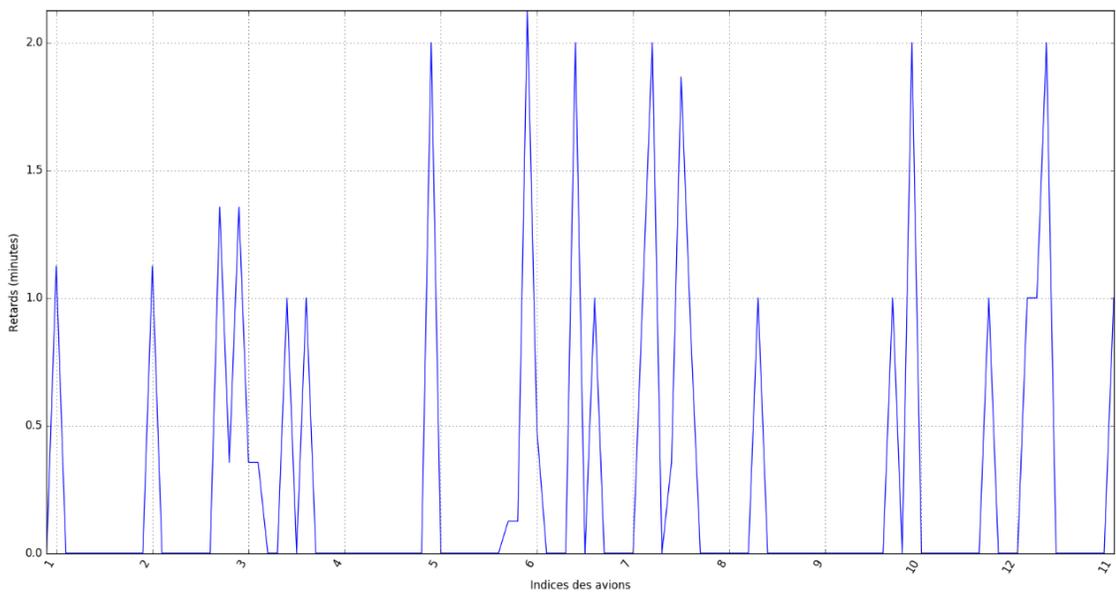


Figure I.19 : Retards S-CPS par avion sans bruit

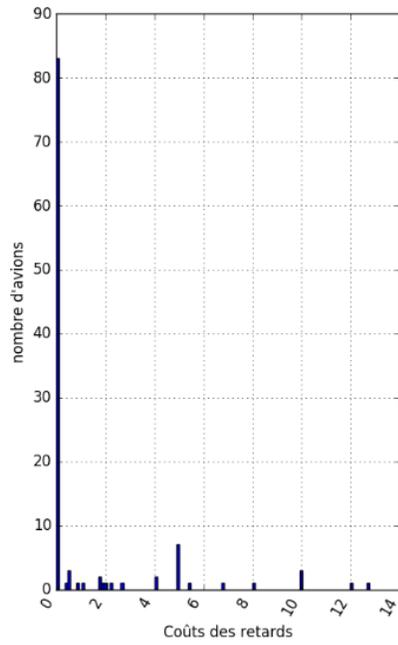


Figure I.20 : Fréquence des coûts sous S-CPS sans bruit

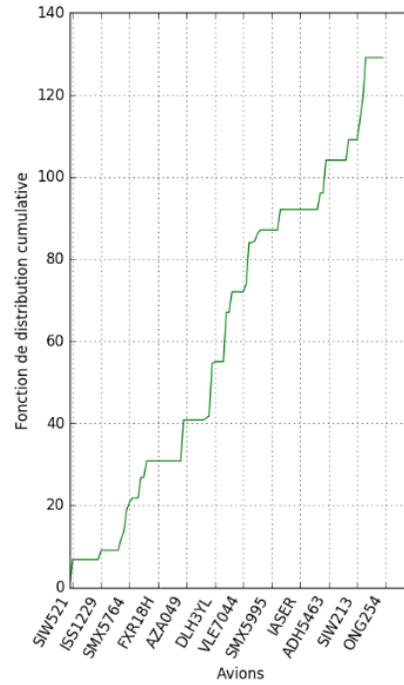


Figure I.21 : Fonction de répartition des coûts sous S-CPS sans bruit

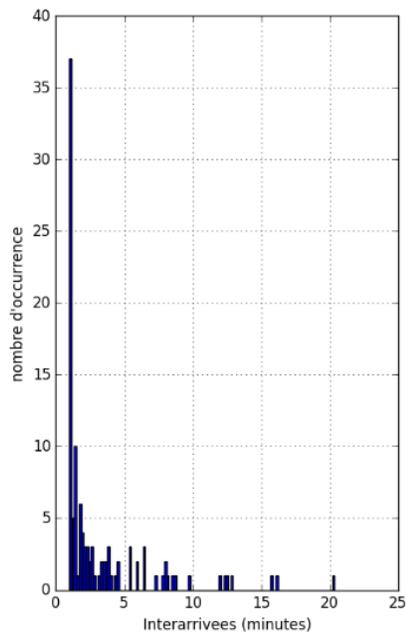


Figure I.22 : Fréquence des inter-arrivées avec bruit sous S-CPS

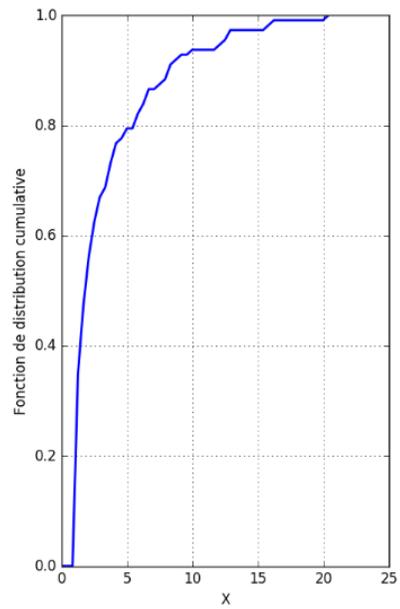


Figure I.23 : Fonction de répartition des inter-arrivées avec bruit sous S-CPS

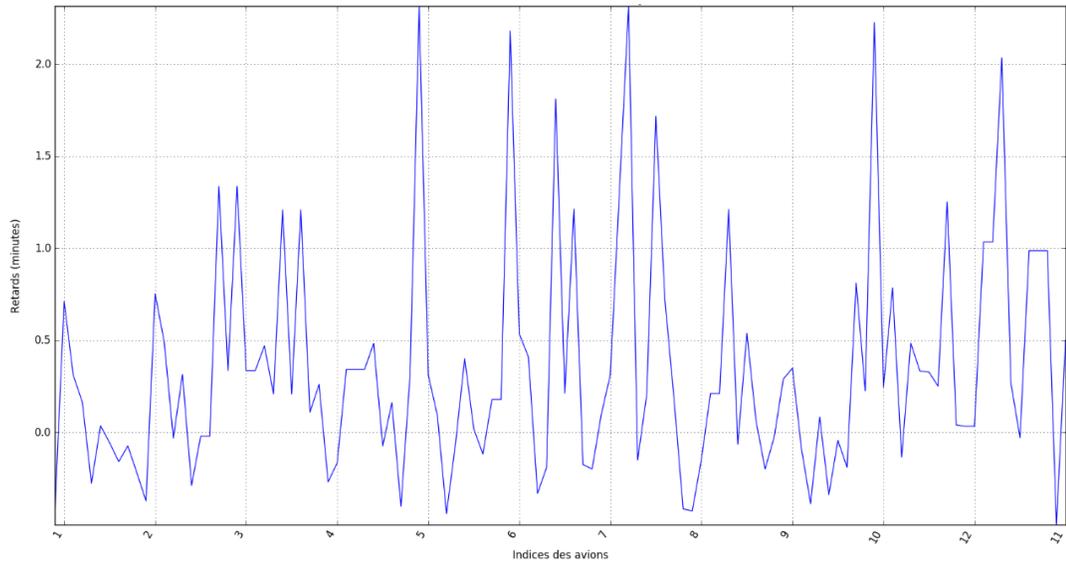


Figure I.24 : Retards par avion avec bruit sous S-CPS

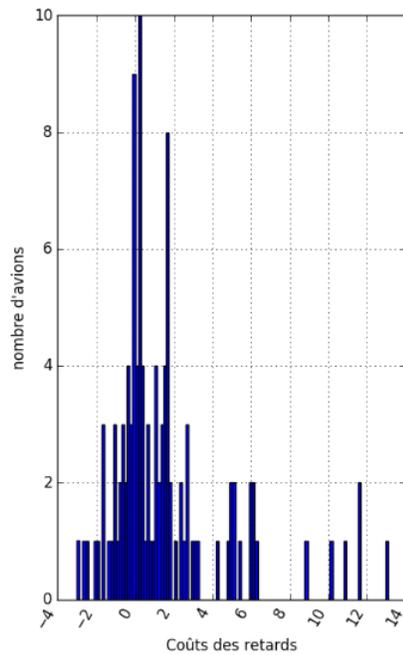


Figure I.25 : Fréquence des coûts avec bruit sous S-CPS

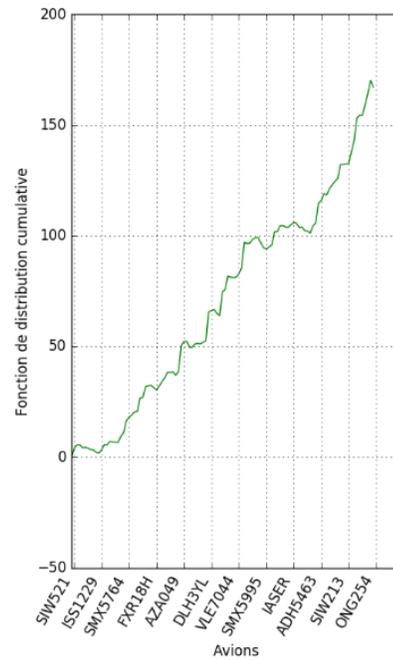


Figure I.26 : Fonction de répartition des coûts avec bruit sous S-CPS

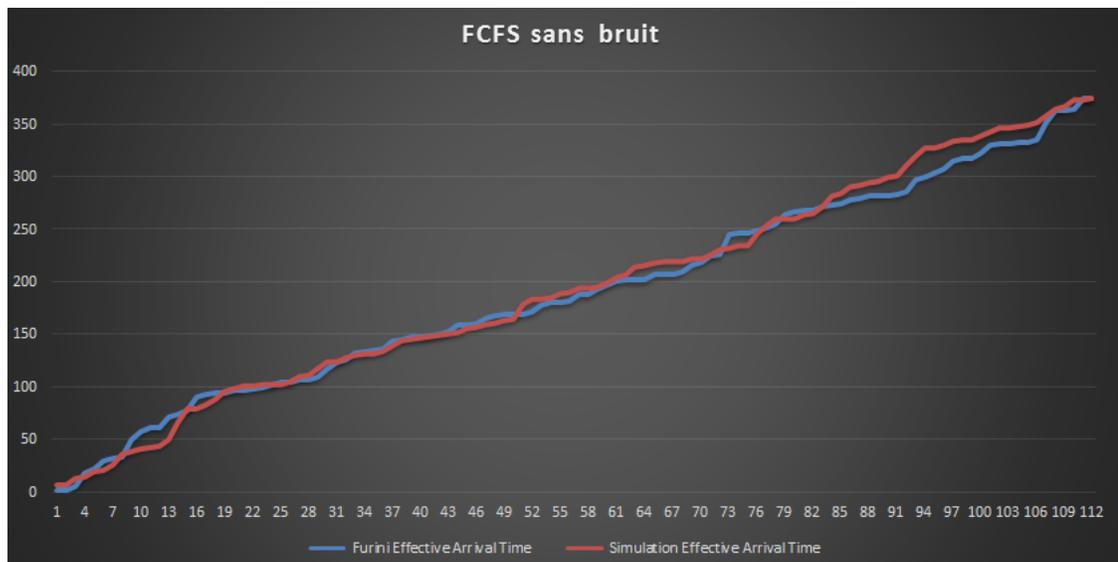


Figure I.27 : FCFS sur des données réelles et simulées sans bruit

Annexe II

FCFS versus S-CPS sur les données réelles

Nous reprenons dans cette annexe les résultats détaillés des expériences numériques menées sur les données réelles, avec les politiques d'ordonnancement FCFS et S-CPS, avec et sans bruit aléatoire sur les heures d'arrivées. Dans les tableaux, nous utilisons les abréviations ID pour "Identifiant", IC pour "Intervalle de Confiance", Min pour "minimum", Max pour "maximum", Moy pour "moyenne" et σ pour écart-type. Nous pouvons constater que si la politique S-CPS est plus efficace en l'absence de bruit aléatoire, FCFS est préférable dans chacune des simulations effectuées en intégrant un bruit de simulation.

Politique	Retard total	Coût	Min	Max	Moy	σ
FCFS	32,95	126,93	0	2	0,29	0,52
S-CPS	31,97	134,08	0	2,13	0,29	0,57

Tableau II.I : Statistiques d'une simulation par avion sur les données réelles

Politique	Retard total	Coût	Min	Max	Moy	σ	IC
FCFS+bruit	30,25	118,96	0,20	0,33	0,27	0,03	[0,24 ; 0,3]
S-CPS+bruit	36,65	155,12	0,26	0,41	0,33	0,04	[0,29 ; 0,36]

Tableau II.II : Statistiques des 10 simulations sur les données réelles

ID	Politique	Retard total	Coût	Min	Max	Moy	σ	IC
1	FCFS+bruit	32,20	134,40	-0,50	2,10	0,29	0,54	[0,19 ; 0,39]
	S-CPS+bruit	39,19	169,65	-0,50	2,31	0,35	0,63	[0,23 ; 0,47]
2	FCFS+bruit	28,35	116,43	-0,76	2,16	0,25	0,59	[0,14 ; 0,36]
	S-CPS+bruit	31,25	135,64	-0,76	2,39	0,28	0,65	[0,16 ; 0,40]
3	FCFS+bruit	31,74	119,07	-0,94	2,24	0,28	0,57	[0,18 ; 0,39]
	S-CPS+bruit	36,87	160,20	-0,89	2,24	0,33	0,65	[0,21 ; 0,45]
4	FCFS+bruit	31,78	121,04	-1,09	2,18	0,28	0,59	[0,17 ; 0,40]
	S-CPS+bruit	38,83	154,75	-1,09	2,49	0,35	0,70	[0,21 ; 0,48]
5	FCFS+bruit	28,55	106,48	-0,75	2,12	0,25	0,55	[0,15 ; 0,36]
	S-CPS+bruit	34,77	144,59	-0,81	2,51	0,29	0,67	[0,17 ; 0,42]
6	FCFS+bruit	28,05	111,08	-0,81	2,51	0,25	0,62	[0,13 ; 0,37]
	S-CPS+bruit	45,98	191,90	-0,57	2,55	0,41	0,64	[0,29 ; 0,53]
7	FCFS+bruit	36,97	136,27	-0,57	2,34	0,33	0,56	[0,23 ; 0,44]
	S-CPS+bruit	45,98	191,90	-0,57	2,55	0,41	0,64	[0,29 ; 0,53]
8	FCFS+bruit	31,87	138,83	-0,74	1,94	0,28	0,53	[0,18 ; 0,39]
	S-CPS+bruit	38,59	162,94	-0,65	2,59	0,34	0,64	[0,22 ; 0,47]
9	FCFS+bruit	30,95	119,71	-0,70	2,36	0,28	0,57	[0,17 ; 0,38]
	S-CPS+bruit	38,90	165,03	-0,55	2,36	0,35	0,65	[0,23 ; 0,47]
10	FCFS+bruit	22,02	86,30	-1,02	2,36	0,20	0,57	[0,09 ; 0,30]
	S-CPS+bruit	29,43	125,28	-1,02	2,37	0,26	0,65	[0,14 ; 0,39]

Tableau II.III : Détails de comparaison entre FCFS et S-CPS sur les données réelles avec 10 simulations en présence du bruit

Annexe III

Comparaison des politiques FCFS et S-CPS sur des données simulées

Cette annexe reprend les résultats détaillés des expériences numériques menées avec dix jeux de données simulées, avec les politiques d'ordonnancement FCFS et S-CPS, avec et sans bruit aléatoire sur les heures d'arrivées.

ID	Politique	Retard	Coût	Min	Max	Moy	σ
1	FCFS	32,08	119,92	0	2,80	0,29	0,58
	S-CPS	31,01	120,85	0	3,79	0,28	0,64
	FCFS+bruit	36,70	124,78	-0,43	3,14	0,33	0,71
	S-CPS+bruit	38,76	149,32	-0,43	4,05	0,35	0,71
2	FCFS	24,20	100,22	0	1,98	0,22	0,46
	S-CPS	24,20	98,22	0	2,92	0,22	0,53
	FCFS+bruit	19,72	86,59	-0,64	1,90	0,18	0,50
	S-CPS+bruit	23,13	93,32	-0,64	3,26	0,21	0,60
3	FCFS	36,88	155,12	0	3,03	0,33	0,60
	S-CPS	35,08	139,97	0	3,39	0,31	0,61
	FCFS+bruit	36,17	148,35	-1,10	3,80	0,32	0,69
	S-CPS+bruit	38,78	159,16	-0,61	3,63	0,35	0,69
4	FCFS	30,68	137,34	0	2,42	0,27	0,50
	S-CPS	30,68	142,34	0	2,69	0,27	0,53
	FCFS+bruit	37,37	145,67	-1,04	2,61	0,33	0,65
	S-CPS+bruit	39,46	163,77	-1,04	2,88	0,35	0,61
5	FCFS	42,06	182,86	0	4,38	0,38	0,78
	S-CPS	41,44	177,11	0	4,38	0,37	0,79
	FCFS+bruit	39,30	166,65	-0,71	4,52	0,35	0,84
	S-CPS+bruit	40,87	167,99	-0,71	4,52	0,36	0,85
6	FCFS	32,19	133,26	0	1,93	0,29	0,47
	S-CPS	31,51	126,39	0	3,04	0,28	0,54
	FCFS+bruit	27,91	112,27	-0,73	2,05	0,25	0,59
	S-CPS+bruit	36,05	144,43	-0,58	3,56	0,32	0,67
7	FCFS	20,39	72,59	0	1,77	0,18	0,41
	S-CPS	19,91	65,34	0	2,60	0,18	0,42
	FCFS+bruit	25,37	97,88	-0,50	1,64	0,23	0,49
	S-CPS+bruit	27,77	98,72	-0,47	2,54	0,25	0,52
8	FCFS	30,80	138,55	0	3,30	0,27	0,55
	S-CPS	29,73	132,14	0	4,30	0,27	0,56
	FCFS+bruit	34,11	168,19	-0,74	3,51	0,30	0,67
	S-CPS+bruit	35,88	168,55	-0,74	4,50	0,32	0,66
9	FCFS	54,45	219,98	0	3,26	0,49	0,79
	S-CPS	50,03	204,53	0	3,88	0,45	0,81
	FCFS+bruit	53,52	204,91	-0,70	3,75	0,48	0,89
	S-CPS+bruit	53,53	205,97	-0,70	4,45	0,48	0,91
10	FCFS	33,12	130,12	0	3,03	0,30	0,57
	S-CPS	31,95	128,30	0	3,44	0,29	0,59
	FCFS+bruit	30,83	129,10	-1,03	2,94	0,28	0,65
	S-CPS+bruit	30,83	124,14	-1,02	3,35	0,28	0,64

Tableau III.I : Comparaison entre FCFS et S-CPS sur des données simulées

ID	Politique	Retard	Coût	Min	Max	Moy	σ
1	FCFS	32,08	119,92	0	2,80	0,29	0,58
	D-CPS	31,01	116,85	0	3,79	0,28	0,62
	FCFS+bruit	36,70	124,78	-0,43	3,14	0,33	0,71
	D-CPS+bruit	38,76	145,32	-0,43	4,05	0,35	0,69
2	FCFS	24,20	100,22	0	1,98	0,22	0,46
	D-CPS	24,20	98,22	0	2,92	0,22	0,53
	FCFS+bruit	19,72	86,59	-0,64	1,90	0,18	0,50
	D-CPS+bruit	23,13	93,32	-0,64	3,26	0,21	0,60
3	FCFS	36,88	155,12	0	3,03	0,33	0,60
	D-CPS	35,08	139,97	0	3,39	0,31	0,61
	FCFS+bruit	36,17	148,35	-1,10	3,80	0,32	0,69
	D-CPS+bruit	38,78	159,16	-0,61	3,63	0,35	0,69
4	FCFS	30,68	137,34	0	2,42	0,27	0,50
	D-CPS	30,68	142,34	0	2,69	0,27	0,53
	FCFS+bruit	37,37	145,67	-1,04	2,61	0,33	0,65
	D-CPS+bruit	39,46	163,77	-1,04	2,88	0,35	0,61
5	FCFS	42,06	182,86	0	4,38	0,38	0,78
	D-CPS	41,44	177,11	0	4,38	0,37	0,79
	FCFS+bruit	39,30	166,65	-0,71	4,52	0,35	0,84
	D-CPS+bruit	40,87	167,99	-0,71	4,52	0,36	0,85
6	FCFS	32,19	133,26	0	1,93	0,29	0,47
	D-CPS	31,77	132,13	0	2,05	0,28	0,51
	FCFS+bruit	27,91	112,27	-0,73	2,05	0,25	0,59
	D-CPS+bruit	36,53	150,84	-0,58	2,67	0,33	0,65
7	FCFS	20,39	72,59	0	1,77	0,18	0,41
	D-CPS	19,91	65,34	0	2,60	0,18	0,42
	FCFS+bruit	25,37	97,88	-0,50	1,64	0,23	0,49
	D-CPS+bruit	27,77	98,72	-0,47	2,54	0,25	0,52
8	FCFS	30,80	138,55	0	3,30	0,27	0,55
	D-CPS	29,73	132,14	0	4,30	0,27	0,56
	FCFS+bruit	34,11	168,19	-0,74	3,51	0,30	0,67
	D-CPS+bruit	35,88	168,55	-0,74	4,50	0,32	0,66
9	FCFS	54,45	219,98	0	3,26	0,49	0,79
	D-CPS	50,03	204,53	0	3,88	0,45	0,80
	FCFS+bruit	53,52	204,91	-0,70	3,75	0,48	0,89
	D-CPS+bruit	53,53	207,97	-0,70	4,45	0,48	0,90
10	FCFS	33,12	130,12	0	3,03	0,30	0,57
	D-CPS	31,95	128,30	0	3,44	0,29	0,57
	FCFS+bruit	30,83	129,10	-1,02	2,94	0,28	0,65
	D-CPS+bruit	30,56	124,40	-1,02	3,35	0,27	0,63

Tableau III.II : Comparaison entre FCFS et D-CPS sur des données simulées

Politique	Retard moyen	Coût	Min	Max	Moy	σ	IC
FCFS	33,68	139	0,18	0,49	0,30	0,08	[0,24 ; 0,37]
S-CPS	32,55	133,52	0,18	0,45	0,29	0,08	[0,23 ; 0,35]
D-CPS	32,58	133,99	0,18	0,45	0,29	0,08	[0,23 ; 0,35]
FCFS+bruit	34,10	138,44	0,18	0,48	0,30	0,08	[0,24 ; 0,37]
S-CPS+bruit	36,51	147,54	0,21	0,48	0,33	0,07	[0,27 ; 0,38]
D-CPS+bruit	36,53	148	0,21	0,48	0,33	0,07	[0,27 ; 0,38]

Tableau III.III : Statistiques sur les 10 simulations