dgac

# Détermination de la capacité d'un aéroport

Novembre 2005

direction générale
de l'Aviation civile

**service technique
de l'Aviation civile**

# Détermination de la capacité d'un aéroport


**Organisme commanditaire**

Service des Bases Aériennes
50, rue Henry Farman
75720 Paris Cedex 15

**Organisme auteur**

Service technique de l'aviation civile
31, avenue du Maréchal Leclerc
94381 Bonneuil sur Marne Cedex

**Auteurs**

| | |
|---|---|
| Capacité pistes | Olivier Cateloy |
| Capacité aérogares | Jérôme Rodriguez |



**Mots-clés**

Capacité pistes, capacité aires de stationnement, capacité aérogares, dimensionnement, capacité horaire, capacité déclarée, capacité de programmation, méthodes d'évaluation de la capacité, logiciel algorithmique, logiciel de simulation

**Zone géographique**

Europe, France

**date**

**Novembre 2005**

# Sommaire


Introduction 8

Problématique 10

Guide de lecture 14

1. Qu'est ce que la capacité ? 15

1.1. Définition générale 16

1.2. Maillons aéroportuaires 16

1.2.1. Principaux maillons aéroportuaires 16
1.2.2. Ensemble des maillons aéroportuaires et les flux qu'ils traitent 17
1.2.3. Maillons aéroportuaires concernés par le présent manuel 19

1.3. Capacité technique 19

1.3.1 Capacité technique pour le système de piste(s) 19
1.3.2. Capacité technique pour une aérogare 20

1.4. Capacité déclarée 21

1.4.1. Définition de la capacité déclarée 21
1.4.2. Application de capacité déclarée : la capacité de programmation 21

1.5. Capacité annuelle 22

1.5.1. Capacité annuelle pour les mouvements 22
1.5.2. Capacité annuelle pour les passagers 22

1.6. Relation entre les notions de capacité 22

2. Paramètres majeurs qui influent sur la capacité 23

2.1. Côté piste 24

2.1.1. Analyse des facteurs de premier ordre : évaluation de la capacité horaire technique 25
2.1.1.1. Facteurs de premier ordre du système de piste(s) 26
2.1.1.2. Facteurs de premier ordre des voies de circulation 46
2.1.1.3. Facteurs de premier ordre des postes de stationnement 46
2.1.2. Analyse des facteurs de 2e ordre 47

2.1.3. Analyse des facteurs de 3e ordre 49
2.1.4. Analyse des facteurs de 4e ordre 51
2.1.5. Facteurs influant sur la capacité annuelle en mouvements 52
2.2. Côté aérogare 54
2.2.1. Qualité de service 55
2.2.2. Découpage fonctionnel de l'aérogare passager 55
2.2.2.1. Fonction Trafic 55
2.2.2.2. Fonction commerciale 57
2.2.2.3. Fonction opérationnelle 57
2.2.2.4. Fonction administrative 57
2.2.2.5. Fonction technique 58
2.2.3. Gestion des flux dans une aérogare passager 58
2.2.3.1. Description des flux passagers 58
2.2.3.2. Description des flux des bagages de soute 59
2.2.4. Mode de fonctionnement 61
2.2.5. Analyse des facteurs de premier ordre 61
2.2.5.1. Procédures 61
2.2.5.2. Trafic 62
2.2.5.3. Infrastructures 62
3. Méthodes d'évaluation rapide de la capacité 63
3.1. Côté piste 64
3.1.1. Ordres de grandeurs ou ratio 64
3.1.1.1. Pour le système de piste(s) 64
3.1.1.2. Pour les aires de stationnement 64
3.1.2. Outils 66
3.1.2.1. Principaux types 66
3.1.2.2. Outil analytique ou algorithmique : l'exemple de MACAO pour le système de piste(s) 66
3.1.2.3. Outils de simulation 68
3.1.3. Procédure actuelle d'une étude 70
3.1.3.1. Planification 70
3.1.3.2. Études de coordination 71
3.1.3.3. Types de résultats 71

3.2. Méthodes de calcul de capacité pour une aérogare 73
3.2.1. Paramètres à prendre en compte 73
3.2.1.1. Calcul de la capacité horaire 73
3.2.1.2. Mesure des surfaces 75
3.2.2. Méthode des ratios 77
3.2.2.1. Description 77
3.2.2.2. Capacité annuelle 77
3.2.2.3. Capacité horaire 77
3.2.3. Méthode de simulation 77
3.2.4. Méthode analytique comparative 78
3.2.5. Exemple de calcul de capacité avec la méthode des ratios 79
3.2.5.1. Mesure des surfaces 79
3.2.5.2. Ratios utilisés 80
3.2.5.3. Calcul de la capacité horaire départ 80

4. De la capacité horaire à la capacité annuelle 81

4.1. Formules de la 40e heure 82
4.1.1. Principe 82
4.1.2. Courbe des débits classés 82
4.1.2.1. Constitution de la courbe des débits classés 82
4.1.2.2. Points caractéristiques de la courbe des débits classés 83
4.1.3. Relations entre l'heure de pointe et le trafic annuel 83

4.2. Scénarios avions 84

4.3. Voies de recherche 84
4.3.1. Réactualisation de la relation entre la 40e heure de pointe et le trafic annuel 84
4.3.1.1. Nouvel ajustement sur un échantillon restreint 84
4.3.1.2. Différentiation selon le type de l'aéroport 85
4.3.1.3. Heures glissantes 85
4.3.2. Autres méthodes 85

5. Outils actuels 86
5.1. Principe 87
5.2. Grille d'analyse 87
5.2.1. Caractéristiques du logiciel 87
5.2.1.1. Nature du modèle : méthode analytique/méthode par simulation 87
5.2.1.2. Niveau de détails : macroscopique/microscopique 87
5.2.1.3. Nature des paramètres d'entrée 88
5.2.2. Champ d'application du modèle : zone(s) aéroportuaire(s) concernée(s) 88
5.2.3. Données en entrée 88
5.2.4. Données en sortie 88
5.2.5. Fonctionnement du logiciel — hypothèses principales 88
5.2.6. Souplesse d'utilisation 88
5.2.7. Extensions possibles – flexibilité/modularité 89
5.2.8. Développement (programmation informatique) 89
5.2.9. Distribution — coût du logiciel (licence et formation) 89
5.2.10. Contacts éventuels 89
5.2.11. Éléments d'évaluation 89
5.3. Ensemble des logiciels étudiés 89
Annexe 1 Liste des sigles et acronymes 90
Annexe 2 Définitions de la capacité issues de manuels techniques existants 91
Annexe 3 Procédures mûres recommandées par APATSI 92
Annexe 4 Ensemble des données nécessaires à l'estimation des capacités techniques théoriques avec MACAO 97
Annexe 5 Formulaire type pour l'entrée des données dans MACAO 98
Annexe 6 Fiches d'analyse des logiciels de capacité 101
Annexe 7 Exemple de ratios détaillés 127
Annexe 8 Bibliographie 132

# Introduction

Photothèque STBA/V. PAUL

*Aérogare de Toulouse-Blagnac*

L'objectif de ce manuel est de proposer des méthodes de détermination de la capacité aéroportuaire.

Dans un premier temps, le manuel définira la capacité. Il existe plusieurs définitions de la notion de capacité qui dépendent du niveau stratégique et de la zone aéroportuaire concernée. Une définition générale sera proposée (la capacité aéroportuaire). Comme la notion de capacité s'évalue en général pendant une heure, sera alors définie la capacité horaire technique coté piste et pour les aérogares. La dimension stratégique sera prise en compte dans les définitions de capacité déclarée et de capacité de programmation. Comme l'activité commerciale d'un aéroport s'évalue en général par le trafic annuel, la définition de la capacité annuelle sera précisée.

Dans un deuxième temps, sont présentés les paramètres qui influent sur la capacité côté piste (piste, voies de circulation et aires de stationnement) et sur la capacité des aérogares.

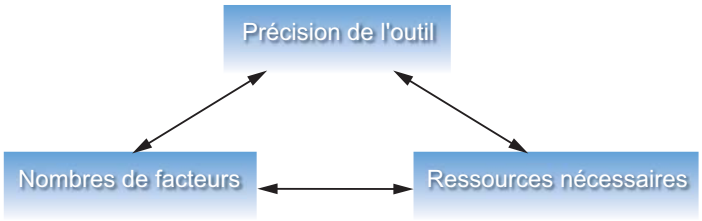
Les paramètres sont classés en quatre groupes, allant du groupe de paramètres de premier ordre à celui de quatrième ordre. Ils reflètent leur niveau d'influence sur la capacité. Le groupe de premier ordre a une influence directe. Le groupe de deuxième ordre a une influence sur le groupe de premier ordre, et ainsi de suite.

L'évaluation de la capacité nécessite d'utiliser des « outils », logiciels ou méthodes, qui décrivent la réalité en prenant en compte un ensemble des facteurs identifiables dans la réalité. Plus le nombre de facteurs est grand, et plus l'analyse est précise. L'outil utilisé nécessite, en revanche, une technicité plus importante et un temps de mise en œuvre plus grand.

Un compromis entre la précision de l'outil, le temps de mise en œuvre et le nombre de facteurs pris en compte doit être trouvé et choisi.

Trois niveaux de détails de méthodes d'évaluation de la capacité sont présentés dans ce manuel.

Lorsque le nombre de paramètres est d'un ou de deux, la méthode des ordres de grandeurs est appliquée. C'est la méthode la plus simple à utiliser. D'importantes variations sont observées pour les aérogares de faibles dimensions. Une meilleure




connaissance du type d'aérogare (avec une application croisée de la méthode comparative) permet de réduire considérablement cette variation.

Pour la détermination de la capacité des aérogares, des ratios peuvent être déterminés par la méthode analytique comparative. Il s'agit alors de repérer dans une sorte de catalogue de fiches descriptives d'aérogares déjà réalisées ou étudiées, celles dont les caractéristiques de trafic et d'exploitation sont les plus voisines du cas que l'on étudie. Par référence à ce catalogue, il est alors possible d'estimer les différentes capacités, et notamment les capacités horaires.

Pour un nombre un peu plus élevé de paramètres, côté pistes sont présentées l'approche par paramètres et la méthode algorithmique.

Pour un nombre élevé de paramètres est présenté pour le côté piste et les aérogares, le principe des outils de simulation.

Les outils actuels d'estimation de la capacité évaluent la capacité mouvements ou passagers pendant une heure. Une méthode utilisée communément afin d'en déduire la capacité annuelle est la formule dite de « la 40e heure ».

D'autres méthodes existent pour déterminer la capacité annuelle côté piste. Elles reposent sur la somme de l'ensemble des mouvements qui peuvent être traités par le système de piste sur la journée. Certaines reposent sur l'élaboration d'un programme des vols représentatif du trafic de l'année.

Une autre consiste à déterminer la capacité des heures de pointe et le volume de trafic aux heures creuses, et est particulièrement adaptée aux aéroports dont le trafic s'organise en hub. En effet, le nombre de mouvements varie en général à chaque heure car il dépend de la structure de la demande (mélange en arrivées et départs, mélange en catégories d'avions). Les nombres d'heures de pointe et d'heures creuses, ainsi que le rapport entre elles déterminent la structure du trafic.

Dans ce manuel, sont présentés et analysés, suivant une grille d'analyse, les outils d'évaluation de la capacité aéroportuaire homologués ou validés à ce jour.

Trois types d'outils sont analysés :

- les outils algorithmiques dédiés à la détermination de la capacité aéroportuaire ou de l'un des maillons de l'aéroport (The FAA Airfield Capacity Model, CAMACA, MACAO),
- les outils de simulation dédiés à la détermination de la capacité aéroportuaire ou de l'un des maillons de l'aéroport (The airport machine, ARCTerm, PaxSim, SIMMOD, RAMS+Sol, TAAM, Total AirportSim, OPAL),
- les outils de simulation généralistes (ARENA, AUTOMOD, EMPLANT, FLOWSIM, WITNESS).

## Problématique

Pour connaître le trafic qui peut être traité par un aéroport, il est nécessaire de déterminer la capacité de cet aéroport, c'est-à-dire des éléments (maillons) qui le constituent. « La » capacité d'un aéroport et de ses maillons est donc une « donnée » capitale aussi bien pour le gestionnaire de l'aéroport, que pour l'organisme de tutelle ou encore les compagnies aériennes. C'est à partir de cette « donnée » et au cours de cette étude que pourront être déterminés :

- le trafic que peut traiter l'infrastructure ;
- la date prévisible de saturation de l'infrastructure compte tenu de l'évolution prévue du trafic ;
- les éléments bloquant d'un aéroport, ce qui permettra d'optimiser l'infrastructure ;

Les résultats d'une comparaison d'aéroports américains et européens, qui présente, pour chaque aéroport, des valeurs de capacités pour les mouvements et le nombre de pistes, sont présentés dans les deux tableaux ci-après.

Ces tableaux présentent trois capacités pour les mouvements :

- Les capacités optimales sont des valeurs exprimant un nombre de mouvements d'avion qu'il est possible de traiter pendant une heure dans des conditions qualifiées d'optimales, c'est-à-dire par beau temps permettant des procédures à vue.
- Les capacités réduites sont, quant à elles, obtenues dans des conditions dégradées, c'est-à-dire dans des conditions météorologiques défavorables entraînant des approches aux instruments.
- Les capacités déclarées représentent un nombre d'avions traitables sur la plate-forme pendant une heure. Cette notion est représentée par une valeur fixe, donnée par les gestionnaires d'aéroports et sur la base de laquelle la programmation des vols des compagnies aériennes se fait.

Dans cette approche, nous pouvons déjà constater qu'il existe des définitions différentes reflétant la notion de capacité. Les valeurs ont été relevées dans deux documents officiels différents [1] ce qui explique en partie que la notion de capacité ne s'exprime pas de la même façon. Ainsi, dans la base de données européennes, les valeurs de capacités optimales et réduites ne sont pas données. De même, la capacité déclarée des aéroports américains n'est pas non plus évoquée dans la base de données de la FAA.

---

*1 Pour les aéroports américains : Airport Capacity Benchmark Report 2001, Department of Transport, Federal Aviation Administration.*
*Pour les aéroports européens : European Database of Major Airports in the ECAC States 1998, Annual Report, Eurocontrol.*

| Aéroports des USA | Capacités optimales (mvt/heure) | Capacités réduites (mvt/heure) | Nombre de pistes utilisées simultanément | Configuration |
|---|---|---|---|---|
| Atlanta Hartsfield International | 185-200 | 167-174 | 4 | 2 doublets de pistes parallèles |
| Boston Logan International | 118-126 | 78-88 | 3 | 1 doublet et 1 sécante |
| Baltimore-Washington International | 111-120 | 72-75 | 3 | 2 pistes sécantes et 1 convergente |
| Charlotte/Douglas International | 130-140 | 108-116 | 3 | 2 pistes parallèles et 1 sécante |
| Cincinnati-Northern Kentucky | 123-125 | 121-125 | 3 | 2 pistes parallèles et 1 sécante |
| Denver International | 204-218 | 160-196 | 6 | 4 pistes parallèles et 2 perpendiculaires |
| Dallas-Fort Worth International | 261-270 | 183-185 | 7 | 2 doublets, 1 piste parallèle et 2 convergentes |
| Detroit Metro Wayne County | 143-146 | 136-138 | 5 | 3 pistes parallèles et 2 sécantes |
| Newark International | 92-108 | 74-78 | 3 | 1 doublet et une piste sécante |
| Honolulu International | 120-126 | 60-60 | 3 | 2 pistes parallèles et 1 sécante |
| Houston Bush Intercontinental | 120-123 | 112-113 | 3 | 2 pistes parallèles et 1 convergente |
| New York Kennedy International | 88-98 | 71-71 | 2 | 2 pistes parallèles |
| Las Vegas McCarran International | 84-85 | 52-57 | 2 | 2 pistes parallèles |
| Los Angeles International | 148-150 | 127-128 | 4 | 2 doublets de pistes parallèles |
| New York La Guardia | 80-81 | 62-64 | 2 | 2 sécantes |
| Orlando International | 144-145 | 104-112 | 3 | 1 doublet et 1 piste parallèle |
| Memphis International | 150-152 | 112-120 | 4 | 1 doublet, 1 piste parallèle et 1 convergente |
| Miami International | 124-134 | 95-108 | 3 | 1 doublet et 1 piste parallèle |
| Minneapolis-St. Paul International | 115-120 | 112-112 | 3 | 2 pistes parallèles et 1 sécante |
| Chicago O'Hare International | 200-202 | 157-160 | 5 | 2 pistes parallèles, 2 sécantes et 1 convergente |
| Philadelphia International | 100-110 | 91-96 | 3 | 1 doublet et 1 sécante |
| San Diego Lindbergh Field | 43-57 | 38-49 | 1 | Piste unique |
| San Francisco International | 95-99 | 67-72 | 3 | 1 doublet et 1 sécante |

*Doublet de pistes : deux pistes parallèles dont les axes sont distants de moins de 760m.*
*Pistes parallèles : deux pistes parallèles dont les axes sont distants de plus de 760m.*

| Aéroports européens | Capacité * de programmation (mvt/heure) | Nombre de pistes utilisées | Configuration simultanément |
|---|---|---|---|
| Amsterdam-Schiphol | 108 | 3 | 3 pistes parallèles ou 2 pistes parallèles et 1 convergente |
| Barcelone | nc | 2 | 2 pistes parallèles |
| Berlin-Tegel | 40 | 2 | Doublet |
| Bruxelles-Natinal | 68 | 2 | Pistes sécantes ou 2 pistes parallèles |
| Copenhague | 81 | 3 | Pistes sécantes ou 2 pistes parallèles |
| Corfu | 10 | 1 | Piste unique |
| Faro | 18 | 1 | Piste unique |
| Florence | 12 | 1 | Piste unique |
| Francfort | 76 | 3 | un doublet et 1 sécante |
| Genève-International | 38 | 1 | Piste unique |
| Kos | 6 | 1 | Piste unique |
| Lille | 30 | 1 | Piste unique |
| London-Luton | 30 | 1 | Piste unique |
| London-Stansted | 36 | 1 | Piste unique |
| Londres-Gatwick | 50 | 1 | Piste unique |
| Londres-Heathrow | 80 | 2 | 2 pistes parallèles spécialisées |
| Luxembourg | 35 | 1 | Piste unique |
| Lyon-St Exupéry | 50 | 2 | Doublet |
| Madrid-Barajas | nc | 4 | 2 doublets non parallèles |
| Manchester | 47 | 1 | Piste unique |
| Marseille-Provence | 30 | 2 | Doublet |
| Milan - Malpensa | 58 | 2 | Doublet |
| Milan Linate | 32 | 1 | Piste unique |
| Munich-Franz Josef Strob | 88 | 2 | 2 pistes parallèles banalisées |
| Nantes | 16 | 1 | Piste unique |
| Nice-Côte d'Azur | 49 | 2 | Doublet |
| Paris-Charles de Gaulle | 105 | 3 | Doublet et une piste parallèle |
| Rotterdam | 30 | 1 | Piste unique |
| Strasbourg | 20 | 1 | Piste unique |
| Stuttgart | 35 | 1 | Piste unique |
| Toulouse | 42 | 2 | Doublet |
| Venise | 20 | 2 | Doublet |

*Doublet de pistes : deux pistes parallèles dont les axes sont distants de moins de 760m.*
*Pistes parallèles : deux pistes parallèles dont les axes sont distants de plus de 760m.*
** Ces capacités sont en général revues chaque année par un groupe de travail*

Le tableau suivant présente les fourchettes de capacités déclarées par les aéroports européens. Il est issu du tableau précédent.

| Nombre de piste(s) utilisées simultanément | Valeurs de capacité déclarée |
|---|---|
| Piste unique | 6 à 47 |
| Deux pistes | 20 à 88 |
| Trois pistes | 76 à 108 |

Il apparaît que les valeurs retenues diffèrent entre certains aéroports. Elles dépendent de la stratégie de l'aéroport et de la configuration de son infrastructure. En effet, déclarer une capacité très inférieure à la capacité optimale par beau temps permet de diminuer les retards possibles lorsque les conditions climatiques ne sont pas favorables. En revanche, le nombre de créneaux horaires pouvant être commercialisés est moindre. C'est un choix stratégique que le gestionnaire fait.

Au vue des valeurs précédentes, on peut dire que la capacité optimale par piste spécialisée sur les aéroports principaux américains varie entre 40 et 50 arrivées par heure, et 45 à 50 départs par heure. Elle est semblable sur les aéroports les plus importants d'Europe. Pour ces derniers, la capacité optimale par piste banalisée est comprise entre 50 et 60 mouvements par heure. Par exemple à l'aéroport de Londres-Gatwick, qui possède une piste banalisée, la capacité optimale varie entre 55 et 60 mouvements par heure. A l'aéroport de Munich-Franz Josef Strauss qui possède deux pistes banalisées, elle est de 100 mouvements par heure.

Pour les systèmes de pistes possédant des pistes parallèles spécialisées ou des pistes sécantes ou convergentes, la capacité est moindre. Ainsi, à Londres-Heathrow qui possède deux pistes parallèles spécialisées, la capacité optimale par beau temps est de 90 mouvements par heure. L'aéroport d'Amsterdam-Schiphol qui utilise simultanément trois pistes parallèles ou deux pistes parallèles et une piste convergente, a une capacité optimale de 130 mouvements par heure.

Il faut prendre en compte le nombre de pistes utilisées simultanément et la configuration de l'infrastructure. Pour atteindre des valeurs de capacité élevée obtenue par beau temps, il faut aménager l'infrastructure avec des sorties rapides et alimenter la piste avec une TMA rationalisant les flux d'arrivées et de départs. On peut d'ores et déjà retenir que le système de pistes parallèles banalisées présente la capacité la plus importante avec un niveau de sécurité optimale. Le système de pistes parallèles spécialisée est moins capacitif. Le système de doublet de pistes l'est encore moins. Les systèmes de pistes convergentes ou de pistes sécantes sont les moins capacitifs et les moins sûrs. Ces derniers doivent être évités lorsque l'on prévoit de nouvelles infrastructures. Désormais, les nouveaux projets d'aéroports dans le monde ne concernent que des pistes parallèles ou des ensembles de doublets parallèles. La capacité peut être déterminée pour des durées différentes (capacités horaires ou annuelles), pour des maillons différents (capacité pour les mouvements, capacité pour l'aérogare…).

Parfois des systèmes de pistes présentent des capacités inférieures à ce que l'on peut attendre. Ceci peut s'expliquer par un environnement local peu favorable (topographie…).

Il apparaît que, pour déterminer avec précision la capacité d'un aéroport, une analyse plus détaillée doit être entreprise. Toutefois, le niveau de détail de cette analyse dépend du niveau décisionnel qui aborde la capacité, de l'objet de l'analyse, de la représentation et du niveau des connaissances requises. Cette problématique est représentée par le schéma ci-dessous :

L'analyse de la pertinence d'un investissement, quant à elle, nécessite de représenter les connaissances techniques sous une forme plus globale et synthétique.

Le présent document a pour objectif d'apporter les éléments techniques suffisants pour répondre aux niveaux décisionnels relatifs au projet et à la coordination et n'aborde pas l'analyse de la pertinence d'un investissement. Il permet ainsi de :

- préciser les paramètres majeurs à prendre en compte ;
- donner une méthode permettant d'évaluer rapidement les ordres de grandeur des capacités d'un système de piste(s) ou d'un ensemble d'aérogare(s) ;
- présenter les outils existants, homologués ou validés à ce jour, pour les études de capacité.

Il prend la forme d'un manuel de référence pour la détermination de la capacité d'un aéroport. Il est issu :

- de synthèses de documents publiés,
- de synthèses de documents propres au STBA rédigés lors d'études locales ou générales antérieures,
- d'analyses de résultats par l'outil algorithmique du STBA (MACAO) estimés pour la présente étude,
- d'une réflexion de synthèse débouchant sur la rédaction de parties nouvelles.

| | **Niveau décisionnel** (objectif de l'étude correspondante) | **Réponse de l'étude** | **Représentation des connaissances requises** | **Niveau des connaissances requises** |
|---|---|---|---|---|
| **Guide** | **Pertinence** (décision d'investissement) | Utilité / faisabilité | Idéaux types | Global |
| | **Projet** (dimensionnement) | Conception | | |
| **Manuel** | **Coordination** (optimisation du fonctionnement) | Utilisation | Expertise | Détaillé |

## Guide de lecture

Le présent document est composé de six parties distinctes précédées de la présente introduction comprenant une synthèse (cf. résumé analytique).

La première partie concerne les définitions générales et plus particulières des capacités côté piste et des aérogares. Y sont notamment abordées les définitions générales de la capacité, de la capacité horaire technique, de la capacité horaire déclarée, et de la capacité annuelle.

La deuxième partie présente les paramètres majeurs qui influent sur la capacité.

La troisième partie expose trois niveaux d'évaluation rapide de la capacité piste : une méthode d'évaluation de la capacité horaire technique moyenne par ordre de grandeurs, une méthode rapide de pondération prenant en compte les principaux facteurs influant sur le niveau de la capacité horaire technique du système de piste(s), et une méthode algorithmique informatisée dont le principe de calcul de la capacité horaire technique du système de piste(s) est exposé dans cette partie. Enfin, la méthode de ratios concernant les aérogares est présentée.

La quatrième partie présente la méthode de la 40e heure permettant d'évaluer la capacité annuelle à partir de la capacité horaire. D'autres méthodes, dont certaines ne sont pas validées, y sont aussi présentées.

La cinquième partie présente les outils, validés à ce jour, d'estimation de la capacité aéroportuaire.

En dernier lieu, sont placées les annexes précédées de la liste des acronymes.

# 1. Qu'est-ce que la capacité ?

Photographie GRAPHIX IMAGES/V. PAUL

*Avion au roulage mis en attente de décoller à l'aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle*

▼

Cette partie a pour objectif de définir la capacité [2] aéroportuaire. Une définition générale sera proposée. Elle peut être appliquée à chacun des maillons aéroportuaires. Ces derniers seront donc décrits. La capacité horaire technique sera par la suite définie pour l'aire de mouvements des avions et pour les aérogares. Nous verrons qu'elle est utilisée en partie pour déterminer la capacité déclarée.

*2 L'annexe 3 présente les définitions de la capacité de manuels techniques concernant la capacité routière ou la capacité aéroportuaire.*

## 1.1. Définition générale

La capacité aéroportuaire est le nombre de demandes qui peut être traité pendant une période donnée par un ensemble d'installation(s) aéroportuaire(s) étant données une qualité de service retenue et la nature et le volume d'offres proposées par l'ensemble des acteurs impliqués.

## 1.2. Maillons aéroportuaires

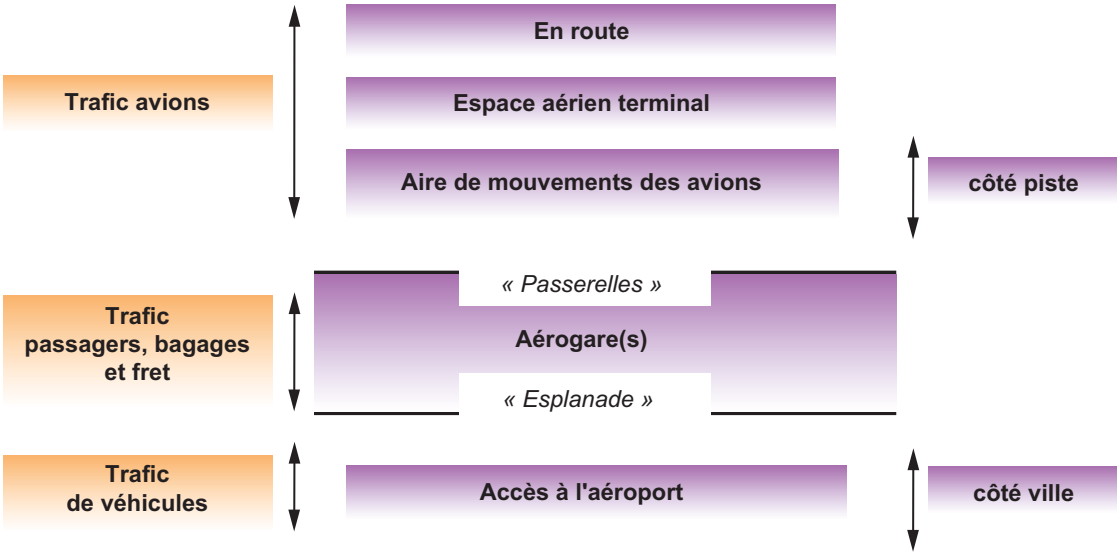
### 1.2.1. Principaux maillons aéroportuaires

L'aéroport est composé de plusieurs maillons. La définition générale peut s'appliquer à chacun d'entre eux afin d'en évaluer la capacité. Il faut au préalable déterminer le type de demandes (passagers, mouvements d'avions, bagages, fret…), la période de temps (l'heure, l'année…), la qualité de service (minutes de retards, densité…), la nature et le volume d'offres (nombre d'équipements, performance des équipements…).

L'organigramme suivant présente les principaux maillons constituant la chaîne du transport aérien. Nous considérons que les maillons aéroportuaires sont les composants de l'aéroport ou au voisinage de l'aéroport qui permettent le traitement des avions et de ses éléments transportés: passagers, bagages et fret.

Photothèque STBA/V. PAUL

*Aéroport de Lyon-Saint-Exupéry*



Photographie GRAPHIX IMAGES/V. PAUL

*Gare TGV et accès à l'aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle*

Chaque maillon a ses propres caractéristiques physiques et ses procédures. Certains maillons permettent le traitement de débit d'avions, de passagers, de bagages et/ou de fret. D'autres constituent un moyen de transformation de flux d'un élément en un autre (cf. schéma détaillé page 18).

Ainsi, on distingue souvent le côté piste qui concerne l'aire de mouvements des avions (cf. schéma page18), de l'aérogare et du côté ville qui concerne les accès à l'aéroport.

### 1.2.2. Ensemble de maillons aéroportuaires et les flux qu'ils traitent

Le schéma page 18 détaille les maillons principaux du schéma précédent et précise les flux de demandes traités (avions, passagers, bagages et fret).

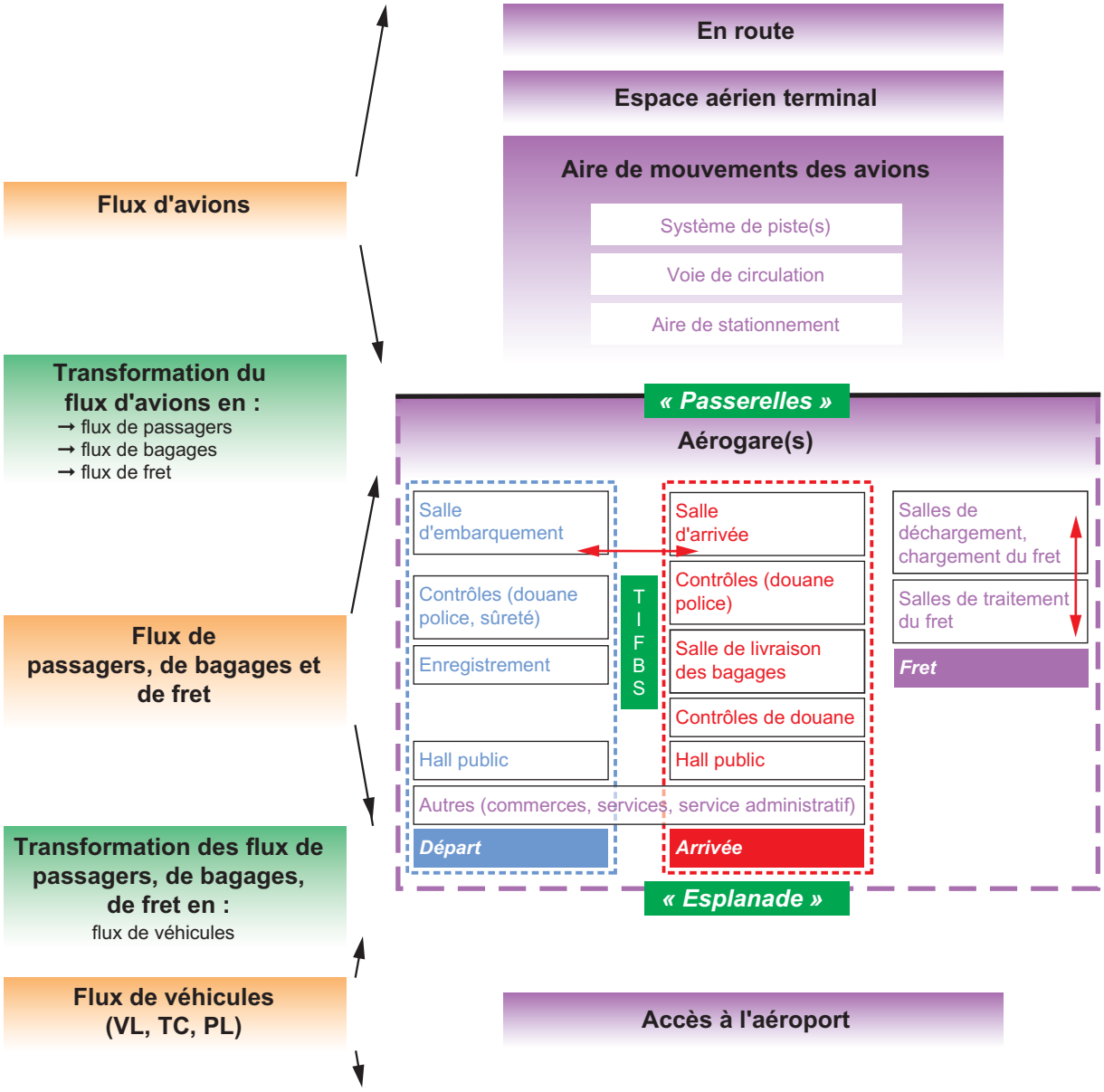
L'aire de mouvements des avions est constituée du système de piste(s), des voies de circulation et des aires de stationnement. Ces éléments permettent le traitement du flux des avions arrivant, décollant ou survolant l'aéroport.

Le maillon « aérogare » est décomposé en sous-maillons, ou modules, permettant de traiter quatre types de flux de passagers, de bagages et de fret :

- le flux des arrivées des passagers et des bagages (en rouge),
- le flux des départs des passagers et des bagages (en bleu),
- le flux des passagers, des bagages et du fret en correspondance dans le cas d'un fonctionnement en hub (matérialisé par les flèches rouges),
- le flux des arrivées et des départs du fret (en violet).

Des sous-maillons, ou modules, (en vert) constituent un moyen de transformation de flux d'éléments en un flux d'autres éléments, dont les principaux sont :

- la « **passerelle** » : c'est le moyen de transformer un flux d'avions en flux de passagers, de bagages et/ou de fret (et réciproquement). Elle peut être au contact, comme les passerelles télescopiques en prolongement du bâtiment de l'aérogare. Ou bien, elle peut être éloignée et dans ce cas, la transformation se fait à l'aide soit d'un autre véhicule (bus ou apparaux nécessaires au transfert de bagages et de fret), soit sans véhicule (à pieds),
- l' « **esplanade** » : ce sous-module (dont le terme ici reflète davantage un concept de transformation de flux) permet de transformer réciproquement les flux de passagers, bagages et fret en véhicules terrestres tels que les véhicules légers (particuliers, de location et taxis), les transports en commun (bus, autocars, liaisons ferrées telles que tramway, RER et trains) et les poids lourds (transport de fret). Il regroupe des sous-maillons, tels que les parcs de stationnement pour véhicules légers (particuliers, de location et taxis) et de transport en commun (bus et autocars), et des infrastructures spécifiques (gares de trains, de RER et de tramway),
- le **tri et inspection filtrage des bagages de soute** (TIFBS) : ce module de traitement des bagages concerne les arrivées (lien entre les avions et les salles de livraison des bagages), les départs (tri et inspection filtrage des bagages entre l'enregistrement et les avions) et les correspondances (tri et distribution des bagages entre les avions).




*Ensemble des principaux maillons aéroportuaires, des flux qu'ils traitent, de leurs sous-maillons ou modules et des sous-maillons (en vert) permettant de transformer un flux d'éléments (avions, passagers, bagages, fret) en un flux d'autres éléments*

### 1.2.3. Maillons aéroportuaires concernés par le présent manuel

Ce manuel traite de la capacité de l'aire de mouvements des avions et des aérogares. Ne sont donc pas traitées les capacités de l'en-route (traitée par la DSNA), et de l'accès à l'aéroport.

Il ne traite pas non plus de la capacité fret de l'aéroport, même si certaines définitions et paramètres ayant un impact sur le niveau de capacité peuvent s'y appliquer. Toutefois, l'analyse de la capacité de l'aire de mouvements prend en compte le trafic fret, car elle porte sur les mouvements d'avions et donc inévitablement sur les avions mixtes ou cargo qui le transportent.

Photothèque STBA/V. PAUL

*L'esplanade du terminal 2 de l'aéroport de Nice-Côte-d'Azur*

## 1.3. Capacité technique

La définition générale permet de déduire les définitions de la capacité pour les différents maillons. Comme il a été dit au paragraphe 1.2. Les maillons aéroportuaires, ce manuel ne traite que du système de piste et des aérogares [3]. Les définitions seront approfondies pour ces deux ensembles de maillons.

Compte tenu de la nature des paramètres influençant le niveau de capacité, la période de temps retenu pour l'évaluation de la capacité en général est l'heure.

### 1.3.1. Capacité horaire technique pour le système de piste(s)

Le système de piste regroupe la piste, les voies de circulation et les aires de stationnement.

Pour la piste, la capacité horaire technique est le débit horaire maximal d'aéronefs qui peut être écoulé pendant une heure au cours d'une période de pointe, en considérant ses pratiques d'utilisation, en respectant les règles de circulation aérienne en vigueur, et compte tenu d'un retard acceptable pour les opérateurs.

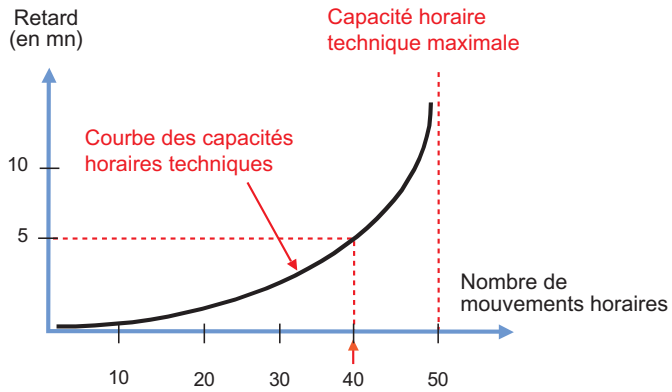
Le niveau de retard reflète la qualité du service. Il est déterminé localement sur chaque aéroport. Le retard évoqué dans cette définition est issu de la saturation de la piste. Les 71 autres causes de retard (problèmes techniques, agents en escale, etc.) ne sont pas prises en compte.

*3 Excepté les « passerelles », l' « esplanade », le TIFBS, et l'accès à l'aéroport.*

Les retards apparaissent lorsque le nombre horaire de mouvements d'avions à traiter devient supérieur à la capacité horaire technique. La relation entre capacité horaire technique et retard se représente par le profil de courbe représenté ci-après :

La capacité horaire technique maximale est le débit horaire maximal d'aéronefs qui peut être écoulé pendant une heure, en considérant des pratiques d'utilisation favorables, en respectant les règles de circulation aérienne en vigueur, et sans prendre en compte la qualité de service.

La capacité horaire technique maximale est une limite atteinte lorsque la qualité de service n'est pas prise en compte, c'est-à-dire lorsque le niveau de retard est très élevé.




Capacité horaire technique pour un retard de 5 mn

### 1.3.2. Capacité technique pour une aérogare

Par définition, la capacité horaire technique pour une aérogare représente le débit de passagers et de bagages qui peuvent être écoulés par une aérogare pendant l'unité de temps retenu en respectant les contraintes de sûreté, une qualité de service et en intégrant son mode de fonctionnement.

Le niveau de qualité de service dépend de :

- du temps d'attente et de traitement aux différents points de passage (voir paragraphe 2.2.3),
- des surfaces allouées par passager aux différents points d'attente (voir paragraphe 2.2.3 et 3.2),
- de la lisibilité et compréhensibilité des circulations pour les passagers,
- des services commerciaux offerts.

Pour les aérogares, il existe plusieurs capacités horaires :

- Cp ou capacité totale, comprend l'ensemble des passagers à l'arrivée et au départ,
- Cd ou capacité départ, comprend l'ensemble des passagers au départ quel que soit le régime du vol,
- $Cd_{nat}$ ou capacité départ national, comprend les passagers au départ et sur un vol dit national,
- $Cd_{int}$ ou capacité départ international, comprend les passagers au départ et sur un vol dit international,
- Ca ou capacité arrivée, comprend l'ensemble des passagers à l'arrivée quel que soit le régime du vol,
- $Ca_{nat}$ ou capacité arrivée national, comprend les passagers au départ et sur un vol dit national,
- $Ca_{int}$ ou capacité arrivée international, comprend les passagers à l'arrivée et sur un vol dit international.

Ces différentes capacités ne sont pas forcément égales et les capacités au départ ou à l'arrivée en régime national sont souvent supérieures aux capacités départ ou arrivée respectivement.

Ainsi, pour une salle d'embarquement mesurant 100 $m^2$ et pouvant être utilisée soit entièrement en régime national (ou international), soit en étant séparée en deux parts égales (l'une pour les vols nationaux et l'autre pour les vols internationaux), et en prenant les niveaux de qualité de service suivant : 1 $m^2$/pax [4] pour les passagers en régime national et 2 $m^2$/pax en régime international, les différentes capacités horaires arrivées seront :

Cd = 50/1 + 50/2 = 75 pax/h [5]

Cdnat = 100/1 = 100 pax/h

Cdint = 100/2 = 50 pax/h

À ces capacités qui ne concernent que le passager en tant que tel il convient d'ajouter le hall public de l'aérogare devant accueillir des accompagnants au départ ou des attendants à l'arrivée. Ces modules qui ont un caractère de convivialité non nécessaire au bon traitement du passager stricto sensu peuvent être considérées ou non comme dimmensionnantes par le gestionnaire.

4 *$m^2$/pax : nombre de $m^2$ par passagers*
5 *pax/h : nombre de passagers traités en une heure*

| Salle en régime national uniquement | Salle en régime international uniquement | Salle en régime mixte | |
|---|---|---|---|
| | | Zone nationale | Zone internationale |
| $Cd_{nat}$ = 100pax/h | $Cd_{int}$ = 50pax/h | Cd = 75pax/h | |

## 1.4. Capacité déclarée

### 1.4.1. Définition de la capacité déclarée

La capacité déclarée est fixée par les autorités aéroportuaires. Elle représente le débit d'aéronefs ou de passagers que l'aéroport est en mesure d'accepter toute l'année, en prenant en compte l'ensemble des éléments de la chaîne aéroportuaire ainsi que les contraintes extérieures (environnement…), et compte tenu d'un certain niveau de qualité de service. Elle est exprimée en mouvements d'aéronefs ou de passagers sur une période de temps qui peut être l'heure.

La capacité déclarée est une valeur choisie parmi les valeurs de capacité technique possibles. Les aéroports peuvent choisir de placer la capacité déclarée plus ou moins près de la capacité optimale en indiquant aux compagnies aériennes que le retard sera de telle ou telle valeur. Les aéroports sont en mesure de supporter une capacité technique supérieure à certains moments de la journée lorsque les paramètres sont favorables. Elle détermine notamment le volume de créneaux horaires qui peuvent être proposés aux compagnies aériennes.

### 1.4.2. Application de capacité déclarée : la capacité de programmation

La capacité de programmation est le nombre maximal de vols programmés par les compagnies aériennes sur une période de temps donnée, choisi en concertation avec le gestionnaire, les compagnies aériennes et un comité indépendant de coordination. Au cours de cette concertation, la période de temps est choisie. C'est un multiple de 5 minutes et c'est au maximum une heure.

Sur un aéroport où la demande de trafic excède la capacité pendant une certaine période de la journée, un processus attribuant, suivant certaines règles, aux compagnies aériennes des créneaux horaires, heures prévues de décollage ou d'atterrissage, peut être mis en place sur la base d'une capacité de programmation limitée. L'aéroport est alors coordonné. Ce processus est régi par un organisme indépendant qualifié de coordonnateur.

Si la demande excède le niveau de capacité sur toute la journée, la coordination s'applique sur l'ensemble de la journée, et l'aéroport est qualifié d'entièrement coordonné. Sinon, on dit que l'aéroport est simplement coordonné. Le règlement communautaire CEE -95/93 du 18 janvier 1993 régit la mise en place et le suivi de la coordination sur un aéroport.

Ce processus évite que le niveau de retards devienne trop important sur une période assez longue de la journée. La qualité de service offerte aux compagnies aériennes et donc aux passagers reste acceptable.

La programmation des vols devra par la suite tenir compte du niveau fixé : le nombre de mouvements ne pourra excéder la capacité horaire de programmation (ce niveau est généralement fixé sur une plage d'environ 10 à 20 minutes).

Depuis octobre 1996, une association appelée COHOR, regroupant les compagnies aériennes françaises utilisant les plates-formes d'Orly et de Roissy/CDG, assure le rôle de coordonnateur. L'harmonisation de toutes les coordinations nationales s'effectue lors de conférences bi-annuelles organisées par l'IATA en juin et novembre. Les créneaux horaires sont attribués aux compagnies aériennes sur la base des capacités de programmation.

ADP et la DGAC établissent à chaque saison (été et hiver) la capacité horaire de programmation des aéroports d'Orly et de Roissy-CDG sur la base de données opérationnelles.

En province, les aéroports de Nice, Lyon et Bâle-Mulhouse sont des aéroports à facilitation d'horaire, c'est à dire qu'ils ne sont pas coordonnés complètement sur l'ensemble de la journée.

## 1.5. Capacité annuelle

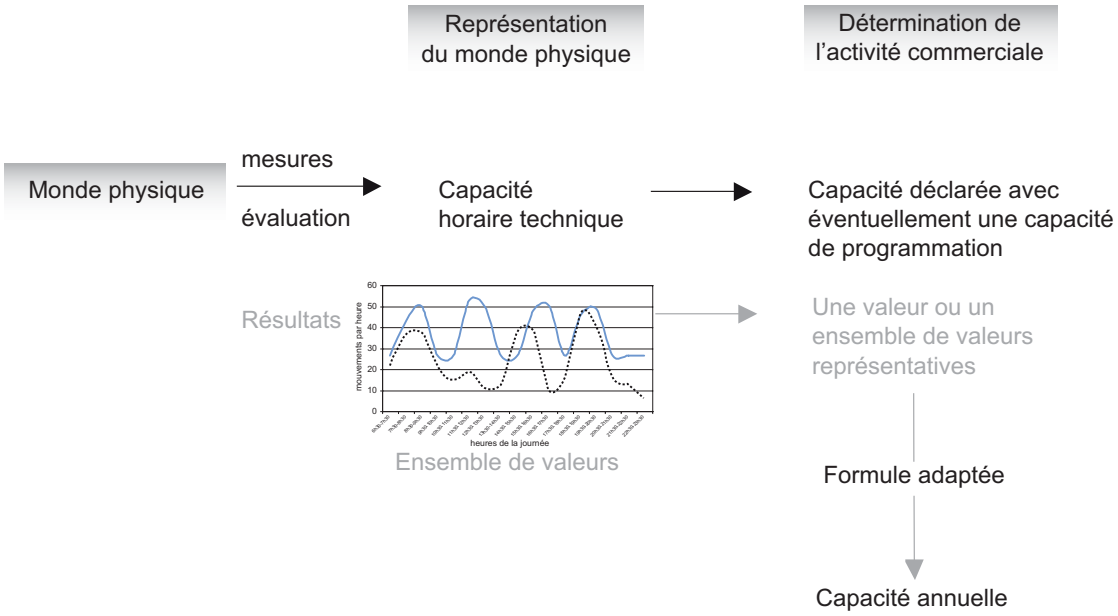
### 1.5.1. Capacité annuelle pour les mouvements

C'est le débit annuel maximal d'aéronefs qui peut être écoulé par le système de piste(s) au cours d'une année, en considérant ses pratiques d'utilisation, et compte tenu du respect des règles de sécurité et d'un retard des vols acceptable pour les opérateurs.

### 1.5.2. Capacité annuelle pour les passagers

C'est le débit annuel maximal de passagers qui peut être écoulé par un aéroport au cours d'une année, en considérant ses pratiques d'utilisation, compte tenu d'un certain niveau de qualité de service et dans le respect des règles de sécurité et de sûreté.

## 1.6. Relation entre les notions de capacité



# 2. Paramètres majeurs qui influent sur la capacité

▼

Dans le présent manuel, la capacité n'est étudiée que du côté piste (comprenant le système de piste(s), les voies de circulation et les aires de stationnement) et des aérogares. Cette partie a pour objectif de présenter les paramètres qui influent sur la capacité de ces systèmes.

Photothèque STBA/V. PAUL

*aéroport de Nice-Côte-d'Azur*

Les paramètres sont classés en quatre groupes, allant du groupe de paramètres de premier ordre à celui de quatrième ordre. Les groupes ont été établis en fonction du niveau d'influence des paramètres sur la capacité. Le groupe de premier ordre a une influence directe. Le groupe de deuxième ordre a une influence sur le groupe de premier ordre, et ainsi de suite.

De manière générale, la capacité dépend du temps minimum nécessaire au traitement des éléments qui entrent dans l'un des systèmes et de la fréquence d'apparition dans ce système. Ce temps et cette fréquence dépendent de paramètres classés dans le groupe dit de premier ordre. Ils seront présentés pour chacun des systèmes. La manière dont ils influencent le niveau de capacité sera analysée.

Pour les groupes de deuxième à quatrième ordres, seules les principales problématiques seront évoquées.

La méthode la plus commune de calcul de la capacité se fait sur une heure. L'analyse des paramètres sera faite de manière à expliquer leur influence sur cette unité de temps. Les facteurs qui influent sur la capacité annuelle seront décrits au paragraphe 2.1.5. Cette analyse synthétisera au niveau annuel leur influence évoquée dans la description des principales problématiques de chacun des groupes de facteurs décrits dans les paragraphes 2.1.2. à 2.1.4.

## 2.1. Côté piste

De manière générale, la capacité dépend du temps minimum nécessaire au traitement des éléments qui entrent dans l'un des systèmes et de la fréquence d'apparition dans ce système. Les systèmes retenus côté piste concernent le système de piste(s), les voies de circulation et les aires de stationnement. Les éléments concernent les aéronefs. Dans ce présent manuel, l'analyse portera sur les avions, et non sur les hélicoptères, même si le principe reste le même.

Pour le côté piste, le temps minimum de traitement ou temps d'occupation du système sera par la suite appelé :

- temps d'occupation de piste (TOP) pour les systèmes de piste(s),
- temps d'occupation des voies de circulation pour les voies de circulation,
- temps d'occupation des aires de stationnement pour les aires de stationnement.

La fréquence d'apparition dans un système est le nombre d'avions qui se présentent pendant une unité de temps :

- à l'atterrissage ou au décollage sur le système de piste(s),
- à l'entrée dans le réseau des voies de circulation lors du roulage,
- à l'entrée dans les aires de stationnement lors du traitement au sol des avions.

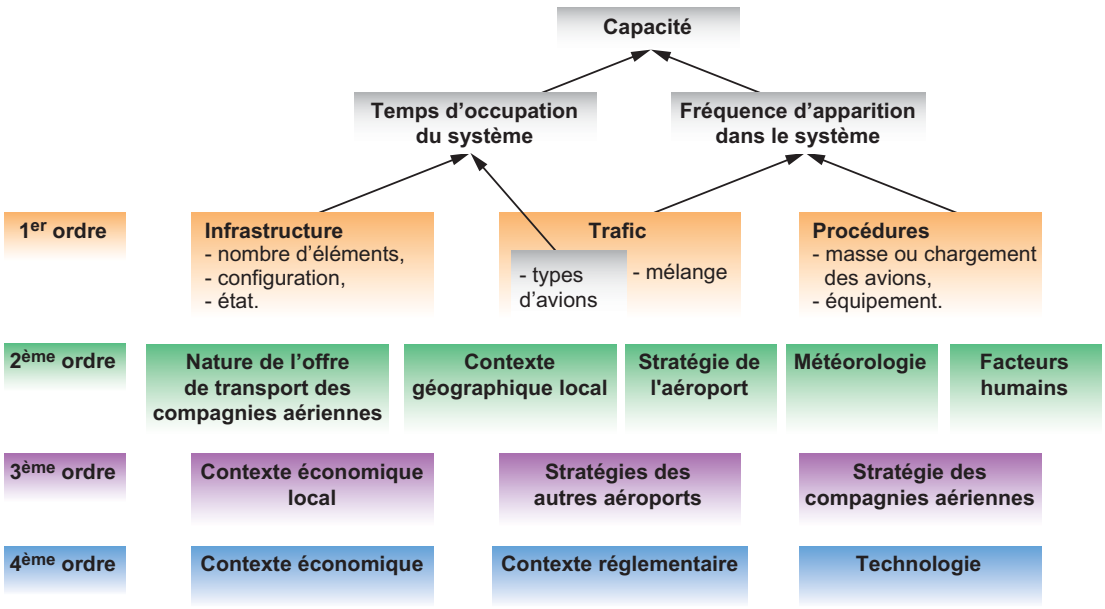
À l'issue du traitement, et après un temps égal au temps minimum nécessaire au traitement (appelé aussi temps d'occupation du système), l'avion sort du système. Il a alors fini :

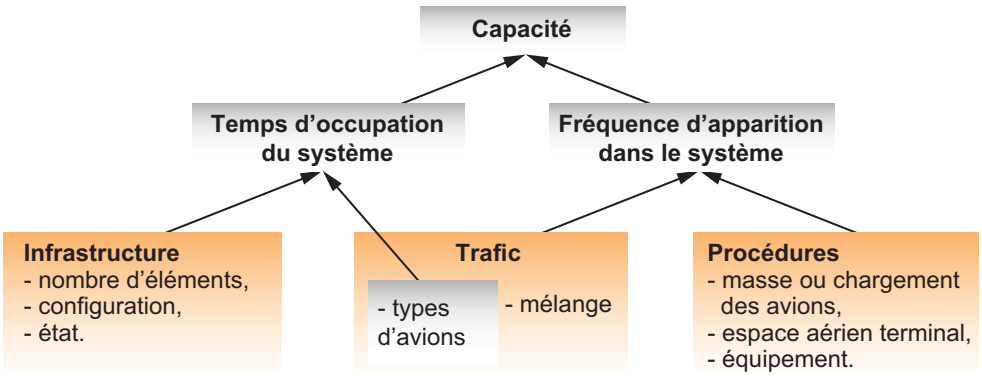
- de décoller ou d'atterrir,
- de rouler pour entrer sur la piste ou sur les aires de stationnement,
- de stationner pour commencer le roulage qui le mène à la piste de décollage.

L'organigramme précédant présente l'ensemble des groupes de paramètres qui ont une influence sur le niveau de capacité côté piste.

Les facteurs de premier ordre regroupent les composants techniques qui ont un impact direct sur le temps d'occupation du système et sur la fréquence d'apparition dans le système. Ce sont les facteurs sur lesquels le planificateur [6] peut agir, dans la limite des règles de sécurité.

*6 nous retenons comme définition du « planificateur » la personne morale ou physique qui établit la planification des infrastructures et de l'activité, ainsi que les documents nécessaires, compte tenu de la stratégie de l'ensemble des acteurs concernés.*






Les facteurs de deuxième ordre ont une influence directe sur les facteurs de premier ordre. Ils relèvent en partie du planificateur et de la stratégie de l'aéroport concerné.

Les facteurs de troisième et quatrième ordres ont une influence sur, respectivement, les facteurs de deuxième et troisième ordres. Ils relèvent de stratégies plus globales (au moins au niveau national).

Le niveau d'influence du planificateur s'amoindrit du 1er au 4e ordre et dépend du niveau d'influence du planificateur (local ou national).

Dans les paragraphes suivants, l'organigramme général présenté page précédente, ainsi que les influences entre facteurs, sont détaillées par niveau d'ordre.

### 2.1.1. Analyse des facteurs de premier ordre: évaluation de la capacité horaire technique

Les facteurs de premier ordre regroupent les composants techniques qui ont un impact direct sur le temps d'occupation du système (piste(s), voies de circulation ou aire(s) de stationnement) et sur la fréquence d'apparition dans le système. Ce sont les facteurs sur lesquels le planificateur peut agir le plus.

Les principaux facteurs ayant un impact direct sur le niveau de la capacité technique sont:

- l'infrastructure: nombre, configuration et état des éléments (piste(s), sortie(s), voies de circulation, aire(s) de stationnement)
- le trafic: nature, mélange entre les catégories d'avions, mélange entre arrivées et départs,
- les procédures: elles concernent les éléments qui induisent un espacement temporel ou spatial des avions. Certaines sont réglementaires et nécessaires pour des raisons de sécurité. D'autres sont dépendantes des caractéristiques locales et des contraintes opérationnelles. Elles dépendent notamment de l'organisation des flux d'arrivées et de départs dans l'espace aérien terminal, et du niveau d'équipement de l'aéroport (radar, radar sol, ILS...).

### 2.1.1.1. Facteurs de premier ordre du système de piste(s)

Le nombre d'avions traités par le système de piste(s) pendant une heure dépend du temps résultant de l'espacement entre avions en raison des procédures réglementaires et du temps d'occupation de piste(s).

Les facteurs de premier ordre qui ont une influence sur le temps d'occupation de piste et sur la fréquence d'atterrissages et de décollages sont décrits pour les trois types de séquences suivantes :

- pour une séquence d'avions qui atterrissent,
- pour une séquence d'avions qui décollent,
- pour une séquence d'avions qui enchaînent tour à tour atterrissages et décollages.

La description des facteurs de premier ordre de chaque séquence sera faite pour les principaux types de systèmes de pistes suivants :

- système de piste unique,
- système de pistes parallèles :
  - doublet de pistes : pistes parallèles rapprochées,
  - pistes parallèles éloignées,
- système de pistes convergentes,
- système de pistes sécantes.

#### 2.1.1.1.1. Différents systèmes de piste(s) envisagés

Les différents systèmes de pistes envisagés dans le présent manuel sont :

- système de piste unique,
- système de pistes parallèles :
  - doublet de pistes : pistes parallèles rapprochées,
  - pistes parallèles éloignées.
- système de pistes convergentes,
- système de pistes sécantes.

Photothèque STBA/V. PAUL

*L'aire de manœuvre de l'aéroport Nice-Côte-d'Azur*

##### 2.1.1.1.1.1. Système de piste unique

Ce système de piste n'est constitué que d'une seule piste sur laquelle se font les atterrissages et les décollages.

##### 2.1.1.1.1.2. Systèmes de pistes parallèles

Les doublets de pistes parallèles sont caractérisés, d'une part par l'écartement de l'axe de pistes (doublet rapproché ou éloigné), d'autre part par l'utilisation prévue des pistes (doublet de pistes spécialisées, doublet banalisé, doublet de pistes de catégories différentes, utilisées à vue ou aux instruments). Les fonctionnements décrits pour le système de pistes parallèles sont valables pour les systèmes de pistes quasi-parallèles, c'est-à-dire pour les systèmes dont les pistes sont convergentes avec un angle de moins de 15°. Dans la suite du document, les fonctionnements décrits pour les systèmes parallèles sont tacitement valables pour les systèmes de pistes quasi-parallèles.

Il existe deux principaux types de systèmes parallèles :

- doublet de pistes : pistes parallèles rapprochées,
- pistes parallèles éloignées.

Photothèque STBA/A. PARINGAUX

*Les pistes sécantes de l'aéroport de Bâle-Mulhouse*

Photothèque STBA/A. PARINGAUX

*Les pistes sécantes de l'aéroport de Saint-Denis-Gillot*

#### 2.1.1.1.1.3. Systèmes de pistes sécantes

Ces systèmes de pistes sont constitués de deux pistes sécantes.

#### 2.1.1.1.1.4. Modes d'exploitation possibles des systèmes de pistes parallèles

**Pistes parallèles banalisées**

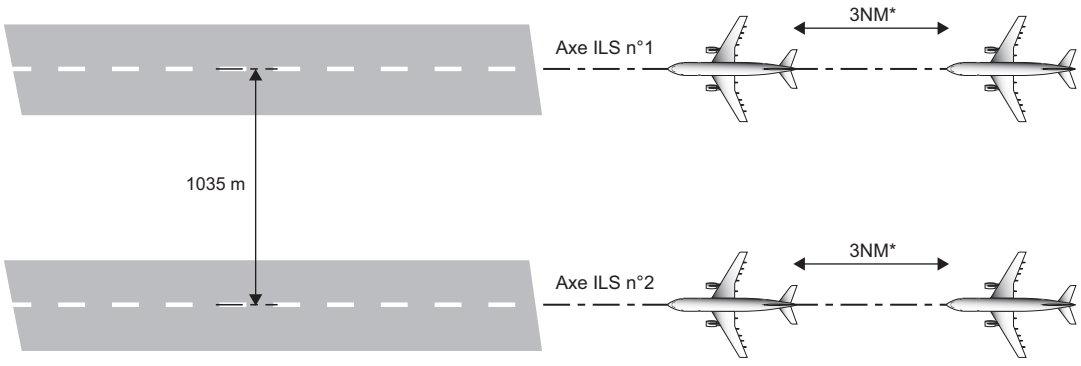
Les atterrissages et les décollages s'effectuent indifféremment sur l'une ou l'autre piste.

Parmi les fonctionnements possibles d'un système de pistes parallèles banalisées, trois modes sont identifiés. Leur utilisation dépend de la distance entre les axes de pistes (cf. 2.1.1.1.1.5. Les caractéristiques des systèmes de pistes parallèles):

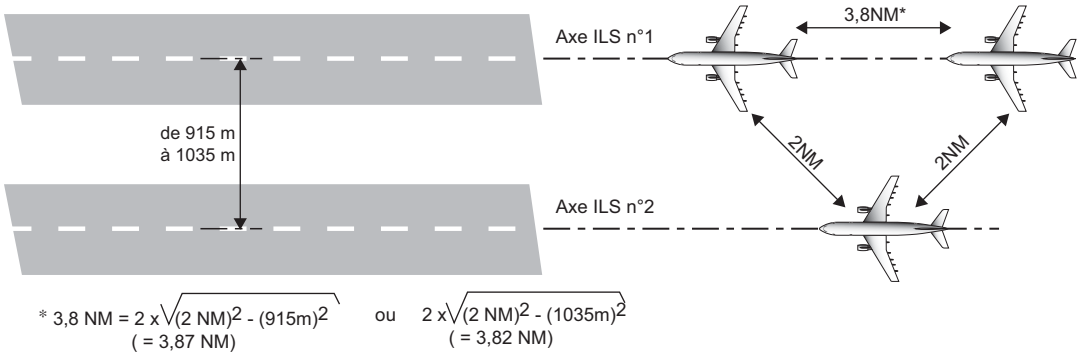
Mode 1: approches indépendantes. Il s'agit d'approches effectuées simultanément en direction de pistes parallèles sans que les avions utilisant les ILS adjacents soient soumis à une séparation radar minimale.

La séparation entre avions ne concerne que les avions se trouvant sur un même axe ILS (séparation standard entre avions suivant la masse maximale au décollage).

Mode 2: approches interdépendantes. Il s'agit d'approches effectuées simultanément en direction de pistes parallèles avec imposition d'une séparation radar minimale aux avions utilisant les ILS adjacents.




** Les espacements de 3NM sont ceux respectés pour les raisons de turbulences de sillages ou de séparation radar. Ils sont indicatifs dans ces schémas mais sont supérieurs entre des avions de tonnages différents cf. RCA 3 — paragraphe 5.6.6.2.1.). Ils peuvent être réduits à 2,5 NM dans certaines conditions (cf. procédures n°8 de l'annexe 5 : procédures mûres recommandées par APATSI).*




La séparation entre avions concerne les avions se trouvant sur un même axe ILS (séparation standard entre avions suivant la masse maximale au décollage) et les avions sur les axes ILS adjacents. Dans ce dernier cas, la séparation est de 2NM.

Mode 3 : départs indépendants. Il s'agit des départs simultanés d'avions décollant dans le même sens à partir de pistes parallèles.

**Système de pistes spécialisées**

L'une des pistes du système est réservée exclusivement aux atterrissages tandis que l'autre n'est utilisée que pour les décollages. Cette spécialisation peut être valable quel que soit le QFU (dans ce cas, la piste réservée aux atterrissages peut être plus courte) ou associée à un QFU. Elle constitue le quatrième mode d'exploitation d'un système de pistes parallèles (mode 4).

**Système de pistes parallèles de catégories différentes**

La piste principale est destinée à une certaine catégorie d'aéronefs (commerciaux, rapides, réacteurs, etc.). La piste secondaire est destinée aux autres catégories. Cette disposition de pistes est fréquemment adoptée sur les aérodromes où l'aviation légère est importante.

#### 2.1.1.1.1.5. *Caractéristiques des systèmes de pistes parallèles*

Les spécifications physiques sont données par l'annexe 14-volume 1 de l'OACI, et repris dans le CHEA.

**Pistes parallèles éloignées**

Les recommandations suivantes caractérisent les pistes parallèles éloignées. Dans ce cas, les atterrissages et les décollages ont lieu simultanément.

Dans les conditions spécifiées dans les PANS-ATM (Doc4444) et dans les PANS-OPS (Doc8168), volume 1, il est recommandé que la distance minimale entre les axes de piste soit de :

- 1035 m, 1310 m, 1525 m (selon l'équipement radar) pour les approches parallèles indépendantes ;
- 915 m pour les approches parallèles interdépendantes ;
- 760 m pour les départs parallèles indépendants ;
- 760 m pour les mouvements parallèles sur les pistes spécialisées.

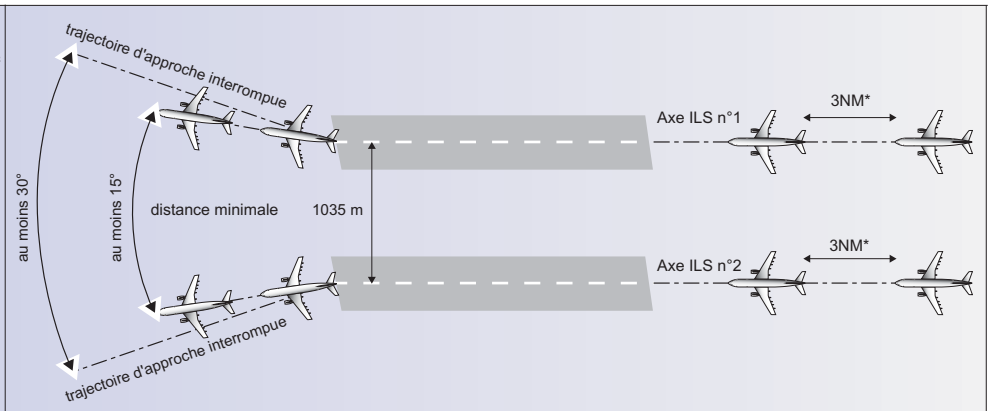
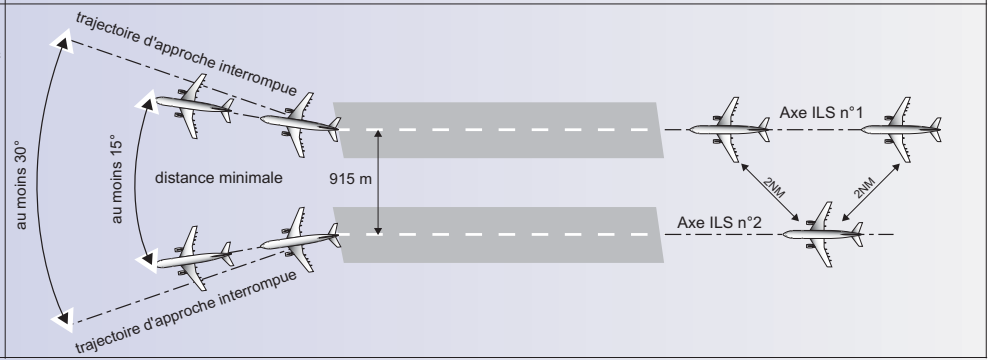
Dans le cas des mouvements parallèles sur pistes spécialisées, la distance minimale spécifiée :

- peut-être réduite de 30 m par tranche de 150 m de décalage de la piste d'arrivée vers l'amont, jusqu'à un minimum de 300 m ;
- devrait être augmentée de 30 m par tranche de 150 m de décalage de la piste d'arrivée vers l'aval.

Lorsque les distances entre axes de pistes sont conformes aux recommandations précédentes, les contraintes opérationnelles (aides de radionavigation et trajectoires) sont les suivantes :

- Des pistes parallèles peuvent être utilisées pour des départs aux instruments indépendants de la façon suivante :
  - les trajectoires de départ divergent d'au moins 15 degrés immédiatement après le décollage ;
  - on dispose d'un radar de surveillance approprié, capable d'identifier les aéronefs à moins de 2 km (1,0 NM) de l'extrémité de la piste ;
  - des procédures opérationnelles ATS garantissent que la divergence prescrite pour les trajectoires de départ est assurée.
- Des approches parallèles indépendantes peuvent être effectuées sur des pistes parallèles, sous réserve des conditions suivantes :

*Pistes parallèles éloignées*

| | | |
|---|---|---|
| - approches indépendantes,<br>- décollages indépendants,<br>- décollages et atterrissages simultanés.<br><br>Le fonctionnement peut être spécialisé. | Mode<br>1<br>3<br>4 |  |
| - approches interdépendantes,<br>- décollages indépendants,<br>- décollages et atterrissages simultanés.<br><br>Le fonctionnement peut être spécialisé. | Mode<br>2<br>3<br>4 |  |

- si la distance entre les axes des pistes est inférieure à 1310 m mais égale ou supérieure à 1035 m, on dispose d'un radar secondaire de surveillance (SSR) approprié, avec une précision minimale en azimut de 0,06 degré (un sigma), une période de mise à jour de 2,5 secondes ou moins et un affichage haute résolution offrant une fonction de prévision des positions et une fonction d'alerte en cas d'écart ; ou

- si la distance entre les axes de pistes est inférieure à 1525 m mais égale ou supérieure à 1310 m, un SSR dont les spécifications sont différentes de celles qui précèdent peut être utilisé s'il est déterminé que cela ne compromettrait pas la sécurité des opérations aériennes ; ou

- si la distance entre les axes de piste est égale ou supérieure à 1525 m, on dispose d'un radar de surveillance approprié, avec une précision minimale en azimut de 0,3 degré (un sigma) et une période de mise à jour de 5 secondes ou moins.

- les trajectoires d'approche interrompue divergent, l'une par rapport à l'autre, d'un angle au moins égal à 30 degrés.

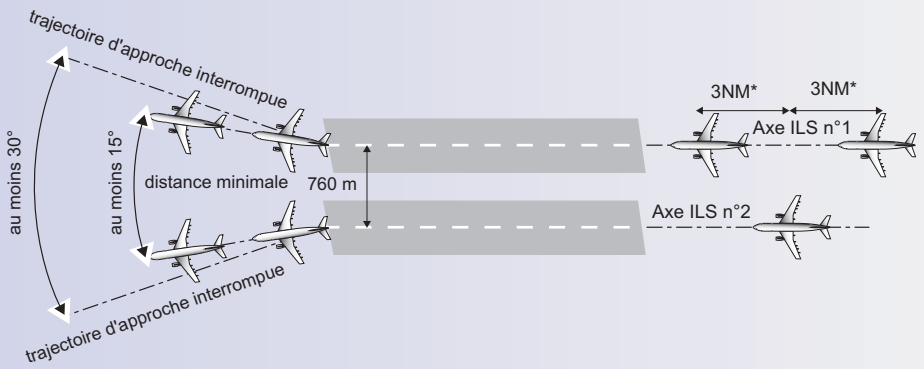
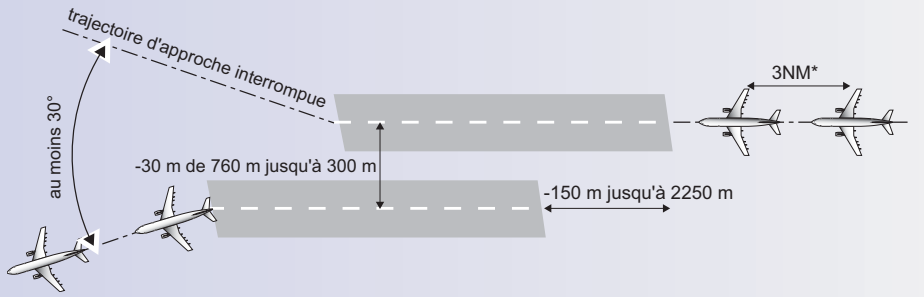
- Pour la famille de doublets de pistes éloignées d'au moins 760 m, permettant des mouvements parallèles sur pistes spécialisées, les contraintes opérationnelles (radar et trajectoires) suivantes doivent aussi être respectées.:

  - la trajectoire de départ nominale diverge d'au moins 30 degrés, immédiatement après le décollage, par rapport à la trajectoire d'approche interrompue de la procédure d'approche adjacente.

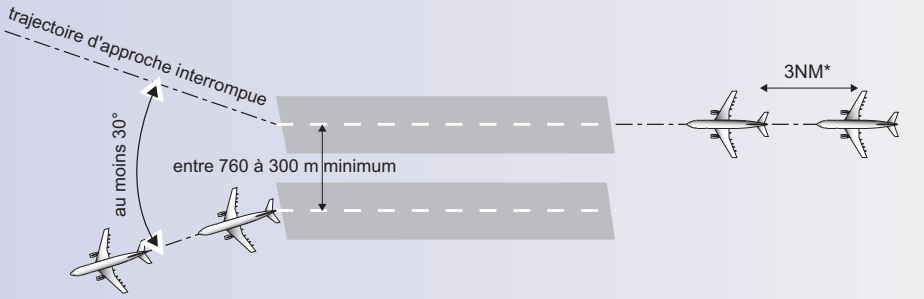
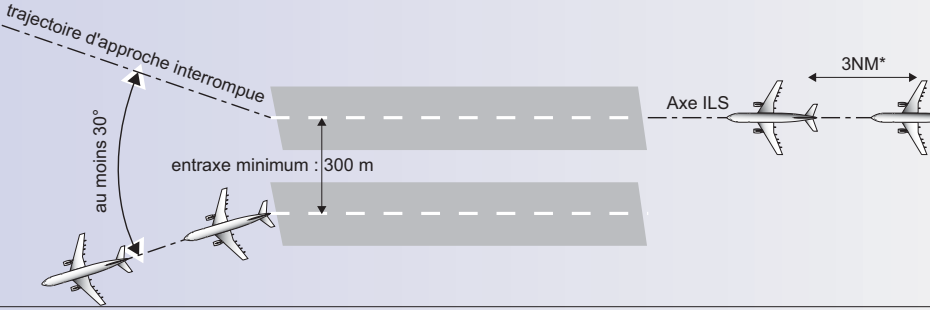
**Doublet rapproché**

En deçà des limites fixées précédemment, le doublet de pistes est dit rapproché. Dans certaines conditions d'exploitation permettant de réduire les espacements entre avions (cf. description de la réduction des espacements aux 2.1.1.1.2.2., 2.1.1.1.3.2. et 2.1.1.1.4.), les atterrissages et les décollages peuvent avoir lieu simultanément. En revanche, si les contrôleurs dans la tour ne voient pas les avions en finale et les avions au décollage, les atterrssages et les décollages ne peuvent pas avoir lieu simultanément.

Les tableaux suivants présentent l'ensemble des contraintes physiques et opérationnelles inhérentes à chaque type de système de pistes parallèles (éloignés ou rapprochés, et les modes d'exploitation possibles modes 1 à 4).

| | Mode | |
|---|---|---|
| - approches dépendantes,<br>- décollages indépendants,<br>- décollages et atterrissages simultanés. | 3 |  |
| Le fonctionnement peut être spécialisé. | 4 | |
| Le fonctionnement est spécialisé :<br>- approches sur une piste,<br>- décollages sur l'autre piste,<br>- décollages et atterrissages simultanés | 4 |  |

*Doublet rapproché*

| | Mode | |
|---|---|---|
| Le fonctionnement est spécialisé :<br>- approches sur une piste,<br>- décollages sur l'autre piste,<br>- décollages et atterrissages dépendants | 4 |  |
| Application de la réduction des espacements<br>Le fonctionnement est spécialisé :<br>- approches sur une piste,<br>- décollages sur une piste,<br>- décollages et atterrissages indépendants | Mode<br>4 |  |

** Les espacements de 3NM sont ceux respectés pour les raisons de turbulences de sillages ou de séparation radar. Ils sont indicatifs dans ces schémas mais sont supérieurs entre des avions de tonnages différents (cf.RCA 3 - paragraphe 5.6.6.2.1.). Ils peuvent être réduits à 2,5 NM dans certaines conditions (cf. procédures n°8 de l'annexe 5 : procédures mûres recommandées par APATSI*

#### 2.1.1.1.2. Les facteurs de premier ordre pour une séquence d'avions atterrissant

##### 2.1.1.1.2.1. L'influence de l'infrastructure et des performances des avions : détermination du temps d'occupation de piste (TOP)

Le temps d'occupation de piste(s) (TOP) à l'atterrissage est le temps compris entre les deux évènements suivants :

1. l'avion passe au-dessus du seuil de piste,
2. l'avion quitte la piste et passe le point situé à 90 [7] mètres de l'axe de piste (il dégage les servitudes).

Nous allons voir que le TOP dépend de l'infrastructure et des caractéristiques des avions qui fréquentent la piste.

1er cas : la distance de freinage est inférieure à la distance entre le seuil de piste et la bretelle de sortie

Le schéma 1 donne la décomposition du temps d'occupation de piste à l'arrivée.

On peut distinguer :

- le temps nécessaire à la distance d'atterrissage,
- le temps de roulage jusqu'à la bretelle de sortie,
- le temps de roulage pour la sortie (sur la bretelle).

La distance d'atterrissage est donnée par les constructeurs d'avion. Elle dépend de la masse de chargement de l'avion, de sa vitesse d'approche, et du freinage [8].

Le temps de roulage jusqu'à la bretelle de sortie et le temps de roulage pour la sortie dépendent de la vitesse de roulage de l'avion et de la position de la bretelle de sortie.

2e cas : la distance de freinage est supérieure à la distance entre le seuil de piste et la bretelle de sortie

Le schéma 2 présente un cas extrême de positionnement de bretelle lorsque la distance d'atterrissage est plus grande que la distance entre le seuil de piste et la bretelle de sortie. C'est-à-dire que le freinage de l'avion n'est pas suffisant pour lui permettre de sortir à la bretelle en question. Ce cas a lieu lorsqu'il y a peu de bretelles de sortie ou qu'elles sont mal positionnées pour l'avion considéré.

Dans ce cas, la décomposition du temps d'occupation de piste à l'arrivée devient :

- le temps nécessaire pour parcourir la distance d'atterrissage,
- le temps de roulage jusqu'à la bretelle de sortie, se décomposant en :
  - temps de roulage jusqu'à la raquette de retournement,
  - temps de demi-tour,
  - temps de roulage entre la raquette et la bretelle de sortie,
- le temps de roulage pour la sortie (sur la bretelle).

Le TOP peut alors être très important puisqu'un demi-tour prend entre 50 et 60 secondes, et que la vitesse de roulage sur piste est comprise entre 8 à 15 kts, soit 4 à 8 mètres par seconde.

Photothèque STBA/V. PAUL

*Avion à l'atterrissage sur l'aéroport de Nice-Côte-d'Azur*

Les principaux paramètres présentés ici sont donc :

- la distance de freinage de l'avion qui dépend de la masse, de la vitesse d'approche, des performances au freinage et de la vitesse de sortie,
- la position de la bretelle de sortie,
- la configuration de la sortie : sortie droite ou rapide.

La possibilité de diminuer le TOP pour augmenter ou adapter la capacité technique dépend du point de vue et de l'objectif de l'analyse (point de vue de la planification aéroportuaire et point de vue opérationnel).

**D'un point de vue de la planification aéroportuaire,** la distance de freinage est une donnée sur laquelle on ne peut agir vraiment. Il est possible de

*7 Les 90 mètres retenus concernent le dégagement des servitudes pour l'exploitation des pistes aux instruments en catégories I. Cette distance est de 75 mètres pour les pistes utilisées à vue, et de 150 mètres pour l'exploitation des pistes aux instruments en catégorie II et III.*

*8 Nous verrons au paragraphe 2.1.2. L'analyse des facteurs de 2e ordre que le freinage dépend aussi de l'état de la piste (météorologie) et des recommandations des compagnies en matière de confort du passager à l'atterrissage (facteurs humains).*

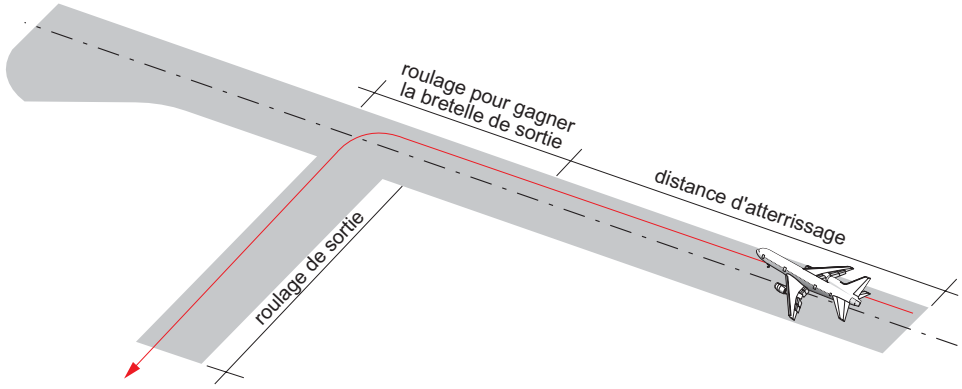



*Schéma 1*

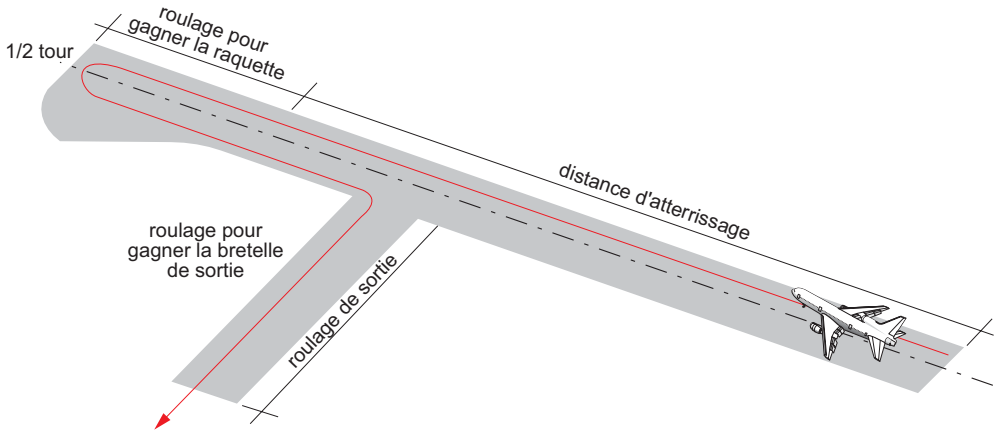



*Schéma 2*

la diminuer en envisageant une bretelle de sortie rapide. La vitesse de sortie de l'avion est alors plus élevée, et la distance nécessaire entre le poser des roues et la sortie est donc plus courte. Les vitesses de dégagement sur une sortie rapide sont d'environ 30 kts sur piste sèche, même si elles permettent en théorie des vitesses de 50 kts. Par temps humide, elle est d'environ 15 kts. Les vitesses pratiquées sur une piste droite varient de 5 à 10 kts. Sinon le planificateur a peu de marge de manœuvre sur les performances des avions.

Il peut en revanche diminuer le TOP en prévoyant la construction d'une sortie à une distance suffisamment grande pour que l'avion puisse l'emprunter sans qu'il ait à faire demi-tour. Dans ce cas, il doit prévoir de la situer à une distance du seuil de piste supérieure à la distance de freinage de l'avion considéré. Cette distance peut aussi être optimale en réduisant le plus possible le temps de roulage pour gagner la sortie.

Cet exercice ne peut être fait que pour un type d'avions. Il est donc préférable de positionner une bretelle de sortie pour un avion de catégorie bien définie. En général, les trois types d'avions retenus sont : les avions de type turbo-propulseurs (ATR42, Emb120), les jets (Emb145, CRJ, A320, B737…) et les gros porteurs (B747, A340…).

Une infrastructure bien optimisée présente en général trois sorties rapides positionnées à environ 1300/1 500, 1 700/1900 et 2 100/2400 mètres du seuil de piste.

En conclusion et pour un planificateur :

1. le positionnement des bretelles de sortie est très important pour minimiser le TOP. La localisation d'une bretelle devrait permettre de :

- éviter les configurations représentées par le schéma 2 (p. 34) afin d'éviter les demi-tours sur piste,

- minimiser le temps de roulage pour gagner la bretelle de sortie dans la configuration représentée par le schéma 1 (p. 33).

2. par ailleurs, la forme de la bretelle de sortie et notamment l'utilisation de sortie rapide permettent de :

- diminuer la distance d'atterrissage,

- diminuer le temps de roulage de sortie en raison d'une vitesse de sortie plus élevée.

Ces recommandations dépendent de l'infrastructure, et notamment de la distance entre piste et voies de circulation qui doit être suffisante pour permettre aux avions de décélérer.

**D'un point de vue opérationnel**, lorsque l'infrastructure ne peut évoluer mais que les sorties sont relativement bien placées, il est nécessaire d'émettre des recommandations aux pilotes afin qu'ils utilisent la sortie la mieux adaptée aux performances de leur avion. Ainsi, en diminuant la distance d'atterrissage et le temps de roulage pour gagner la bretelle de sortie, ils contribuent à diminuer le TOP (cf. 2.1.2. analyse des facteurs de 2e ordre, paragraphe facteurs humains). Sur certains aéroports européens, des groupes de travail techniques avec les pilotes permettent de les sensibiliser au TOP et de leur recommander l'utilisation des bretelles optimales.

#### 2.1.1.1.2.2. Influence des procédures et des caractéristiques des avions : détermination de la fréquence d'atterrissages pour une piste dédiée aux atterrissages

##### 2.1.1.1.2.2.1. Cas général

Les procédures sont les règles, imposées aux pilotes, qui induisent des séparations temporelles ou spatiales entre avions pour assurer leur sécurité et éviter les collisions. Certaines sont réglementaires, d'autres propres à la plate-forme. Cette partie présente celles qui influent sur la capacité côté piste pour une piste dédiée aux atterrissages. L'influence des procédures est la même pour chacune des pistes dédiées aux atterrissages d'un doublet éloigné banalisé, pour la piste dédiée aux atterrissages d'un doublet éloigné spécialisé, d'un doublet rapproché spécialisé et d'un système de pistes

Photothèque STBA/V. PAUL

*Bretelle de sortie rapide de l'aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle*

sécantes ou convergentes de plus de 15°. Dans le cas d'un doublet éloigné banalisé, la fréquence d'atterrissages est double de celle d'une seule piste dédiée aux atterrissages.

Les principales procédures réglementaires, et nécessaires pour des raisons de sécurité, sont :

- les espacements nécessaires pour les turbulences de sillage,
- l'espacement radar.

Les principales procédures liées au contexte local, et dépendantes aussi des règles de sécurité, sont :

- la longueur d'approche finale,
- la limite d'autorisation d'atterrir,
- le verrou.

**Les procédures réglementaires**

Les procédures réglementaires sont édictées par le Règlement de la Circulation Aérienne — fascicule n° 3 (RCA3).

Les minima d'espacement résultant des turbulences de sillage à appliquer entre deux aéronefs en vol sont exprimés en temps (minutes ou secondes). Si l'aéroport est équipé d'un radar, ils peuvent alors être appliqués en distance (nautical miles-NM).

Les minima d'espacement résultant des turbulences de sillage à appliquer entre deux aéronefs en vol, et donc à l'arrivée sont explicités dans le tableau suivant et sont issus du Règlement de la Circulation Aérienne-fascicule n° 3 paragraphe 5.6.6.2.1 (RCA3 - 5.6.6.2.1.).

Les minima d'espacement résultant des turbulences de sillage à appliquer entre deux aéronefs au départ sont différents (cf. détails au paragraphe 2.1.1.1.3.2.).

Lorsque l'aéroport est équipé d'un radar, ces espacements sont remplacés par des séparations radar exprimées en NM (RCA3 - 10.6.5.2.4) :

**Les caractéristiques locales en matière de procédures**

La **longueur d'approche finale** est la trajectoire que les avions suivent afin d'atteindre le seuil de piste. Son origine est en général située à une distance comprise entre 6 et 10 NM du seuil de piste. Les séparations pour turbulences de sillage s'appliquent entre les avions sur cette trajectoire.

La **limite d'autorisation d'atterrir** est un point situé à environ 2 NM sur la trajectoire d'approche finale à partir duquel l'avion est autorisé à atterrir et devient prioritaire sur l'utilisation de la piste.

Le **verrou** est un point fictif situé en amont du seuil de piste sur la trajectoire d'approche finale à partir duquel les arrivées sont prioritaires. L'espacement minimal à appliquer entre un avion à l'atterrissage et un avion au départ correspond à la distance entre le verrou et le seuil de piste. En d'autres termes, il est positionné de façon à ce qu'un avion autorisé à décoller ou à traverser la piste ait dégagé la piste au moment où l'avion à l'atterrissage arrive à la limite d'autorisation d'atterrir. Dans ce cas, ce dernier peut recevoir sa clairance d'atterrissage dans la mesure où la piste est dégagée (conformément au RCA3 - 5.6.6.1 : il ne doit pas être délivré de clairance d'atterrissage à un aéronef tant que l'aéronef qui le précède n'a pas franchi l'extrémité de piste ou amorcé un virage). La clairance de décollage ou de traversée de piste est donnée tant que l'avion à l'atterrissage n'a pas atteint le verrou.

L'avion à l'approche parcourt la longueur d'approche finale avec sa propre vitesse d'approche qui dépend du type d'avion. À partir du point de toucher des roues, il décélère jusqu'à la sortie. Ce temps de freinage dépend de la distance d'atterrissage de l'avion donnée par le constructeur, ainsi que de la distance que l'avion doit parcourir afin d'atteindre la sortie, comme nous l'avons décrit en 2.1.1.1.2.1.

La longueur d'atterrissage peut aussi être plus élevée en raison de l'état de la piste. Si celle-ci est mouillée, la distance de freinage est plus longue. Ainsi, un type d'avions peut manquer une sortie utilisée normalement sur piste sèche. Des marges supplémentaires entre avions sont en général appliquées afin de prendre en compte cet éventuel temps supplémentaire.

Le schéma A représente l'enchaînement à l'atterrissage de deux avions pour lesquels il n'y a pas de séparation supplémentaire pour turbulences de sillage. L'espacement radar est minimum, soit 3 NM.

*Minima d'espacement résultant des turbulences de sillage à appliquer entre deux aéronefs à l'arrivée (RCA3-3-5.6.6.2.1.)*

| Avion suiveur / Avion de tête | Light<br>MTOW ≤ 7 t | Medium<br>7 t < MTOW ≤ 136 t | Heavy<br>MTOW > 136 t |
|---|---|---|---|
| **Light** | (*) | (*) | (*) |
| **Medium** | 180 s | (*) | (*) |
| **Heavy** | 180 s | 120 s | (*) |

*(*) pas de contrainte d'espacement due à la turbulence de sillage*
*MTOW : Maximum Take - Off Weight*

*Minima d'espacement résultant des turbulences de sillage à appliquer entre deux aéronefs à l'arrivée (RCA3-3-5.6.6.2.1.) exprimées en NM (RCA3 - 10.6.5.2.4)*

| Avion suiveur / Avion de tête | Light<br>MTOW ≤ 7 t | Medium<br>7 t < MTOW ≤ 136 t | Heavy<br>MTOW > 136 t |
|---|---|---|---|
| **Light** | (*) | (*) | (*) |
| **Medium** | 4 NM | (*) | (*) |
| **Heavy** | 6 NM | 5 NM | 4 NM |

*(*) pas de contrainte d'espacement due à la turbulence de sillage*
*MTOW : Maximum Take - Off Weight*

Le schéma B représente la même situation mais pour laquelle la séparation pour turbulences de sillage est maximale, soit 6 NM.

#### 2.1.1.1.2.2.2. réduction des espacements

Le paragraphe 5.6.6.3. du RCA prévoit de réduire les espacements entre avions dans certaines conditions. Ainsi, des minimas inférieurs à ceux mentionnés précédemment peuvent être prescrits par l'autorité compétente des services de la circulation aérienne après consultation des principaux exploitants utilisant l'aérodrome et en tenant compte de facteurs tels que :

- la longueur de la piste ;
- la configuration de l'aérodrome ;
- les types d'aéronefs.

Ces minima réduits ne s'appliquent pas :

- entre un aéronef au départ et un aéronef à l'arrivée qui le précède ;
- la nuit ;
- lorsque l'efficacité du freinage peut être réduite par des résidus de précipitations sur la piste ;
- lorsque les conditions météorologiques ne permettent pas à l'aéronef d'évaluer à l'avance les conditions de circulation sur la piste.

Les conditions d'exploitations doivent être :

- la piste doit être sèche ;
- Les distances le long de la piste doivent pouvoir être appréciées depuis la position de travail du contrôleur par rapport à des repères appropriés ;
- La visibilité minimale est fixée à une valeur supérieure ou égale à 5 km. La hauteur minimale de la base des nuages est fixée à une valeur supérieure ou égale à 300 m (1 000 pieds) ;
- Cependant pour un aérodrome où se déroulent des vols VFR de monomoteurs à hélice des valeurs plus basses peuvent être fixées pour les conditions météorologiques.

Les valeurs d'espacement sont :

- un aéronef peut recevoir une clairance d'atterrissage après un autre atterrissage ou un autre décollage, ou une clairance de décollage après un autre décollage si l'aéronef qui le précède sur la piste laisse disponible une longueur de piste d'au moins 2 500m. Cette distance peut être réduite à 2 000 m si l'aéronef précédent effectue un décollage et a effectivement décollé ;
- ces valeurs peuvent être ramenées respectivement à 2 000 m et 1 500 m si l'aéronef qui reçoit la clairance est un bimoteur à hélices de moins de 7 000 kg et l'aéronef qui le précède est un monomoteur à hélice ou un bimoteur à hélices de moins de 7 000 kg ;
- ces valeurs peuvent être ramenées respectivement à 1 000 m et au décollage effectif de l'aéronef précédent si les deux aéronefs sont des monomoteurs à hélice en vol VFR ;
- la valeur de 1 000 m du paragraphe précédent peut, après étude particulière, être ramenée à une fois et demi la longueur maximale d'atterrissage des aéronefs fréquentant habituellement l'aérodrome.

Photographie GRAPHIX IMAGES/V. PAUL

*Avion à l'atterrissage - balisage au premier plan*

#### 2.1.1.1.2.2.3. clairance anticipée

Le paragraphe 5.6.6.4. du RCA prévoit la possibilité de délivrer une clairance anticipée à un avion à l'arrivée dans certaines conditions. Le contrôleur ne donne la clairance d'atterrissage ou de décollage que lorsqu'il est sûr que les espacements spécifiés dans le cas général, décrit 2.1.1.1.2.2.1., et dans le cas de la réduction des espacements, décrit au 2.1.1.1.2.2.2., seront respectés au moment où l'aéronef franchira le seuil de la piste à l'arrivée ou amorcera son décollage.

La procédure dite d'atterrissage derrière permet que lorsque deux aéronefs à l'arrivée se suivent, le deuxième peut recevoir une clairance d'atterrissage avant que l'espacement prescrit dans le cas général ou lors de la réduction des espacements ne soit effectif à condition que :

- ce soit pendant le jour ;
- la visibilité soit supérieure ou égale à 300 m (1 000 pieds) ;
- le deuxième aéronef soit prévenu et confirme voir le premier aéronef ;
- le contrôleur soit raisonnablement sûr que les espacements spécifiés dans le cas général ou en réduisant les espacements seront respectés au moment où le deuxième aéronef franchira le seuil de piste à l'arrivée.

L'avion de tête parcourt la distance entre le point de limite d'autorisation d'atterrir et le seuil de piste. Lorsque l'avion de tête dégage la piste et que le système est libre, le temps que met l'avion suivant peut être plus important que celui décrit dans le cas idéal (de la limite d'autorisation d'atterrir à la sortie). Pour des raisons de turbulence de sillage, l'avion suiveur peut effectivement être plus éloigné de l'avion précédent si ce dernier est plus lourd.

La capacité horaire est le nombre d'avions qui s'enchaînent sur une heure. La capacité technique horaire est supérieure dans le cas où le flux d'avions à l'arrivée est composé d'avions de même catégorie car il n'y a pas de distance supplémentaire due à la séparation pour turbulences de sillage.

Le bureau APATSI (Airport Air Traffic Services Interface) de la CEAC (Communauté européenne de l'aviation civile) a formulé des recommandations concernant l'application possible de procédures aériennes à l'approche améliorant la capacité horaire technique. Elles ont été mises en place sur certains aéroports européens, et peuvent, dans certaines conditions, être appliquées aux autres aéroports de la communauté européenne. Elles sont décrites à l'annexe 5: les procédures mûres recommandées par APATSI. Celles qui concernent les séquences d'avions qui se succèdent à l'atterrissage sont les n° 1, 2, 6, 8, 9, 10 et 15.

#### 2.1.1.1.2.3. Influence des procédures et des caractéristiques des avions: détermination de la fréquence d'atterrissages pour deux pistes interdépendantes pour les approches d'un doublet éloigné.

Les procédures sont les règles, imposées aux pilotes, qui induisent des séparations temporelles ou spatiales entre avions pour assurer leur sécurité et éviter les collisions. Pour des avions qui atterrissent, elles ont été décrites en 2.1.1.1.2.2. L'influence des procédures et des caractéristiques des avions: détermination de la fréquence d'atterrissages pour une piste dédiée aux atterrissages.

Au 2.1.1.1.1.2.2. Les caractéristiques des systèmes de pistes parallèles, il est précisé que pour des pistes dont la distance entre les axes est comprise entre 915 m et 1035 m, les approches sur chaque axe d'ILS sont interdépendantes.

Au 2.1.1.1.1.2.1. Les modes d'exploitation possibles des pistes parallèles, il est précisé que dans ce mode d'exploitation (mode 2: approches interdépendantes), une séparation radar minimale de 2NM entre avions utilisant les ILS adjacents simultanément en direction des pistes parallèles est imposée.

Cette procédure s'ajoute à celles décrites au 2.1.1.1.2.2. L'influence des procédures et des caractéristiques des avions: détermination de la fréquence d'atterrissages pour une piste dédiée aux atterrissages.

Pour deux pistes interdépendantes pour les approches d'un système de pistes parallèles éloignées, les principales procédures réglementaires, et nécessaires pour des raisons de sécurité, sont donc:

- les espacements nécessaires pour les turbulences de sillage entre les avions effectuant une approche sur un même axe ILS,
- l'espacement de 2NM nécessaires pour les turbulences de sillage entre les avions utilisant les ILS adjacents simultanément en direction des pistes parallèles,
- l'espacement radar.

Les principales procédures liées au contexte local, et dépendantes aussi des règles de sécurité, sont:

- la longueur d'approche finale,
- la limite d'autorisation d'atterrir,
- le verrou.

**La contrainte supplémentaire d'espacement de 2NM** entre les avions utilisant les ILS adjacents simultanément en direction des pistes parallèles induit une distance d'environ 3,8 NM entre les avions qui se suivent sur le même axe ILS.

Ainsi, lorsque la séparation due aux turbulences de sillage et la séparation radar induisent en théorie un espacement de 3 NM (cf. 2.1.1.1.2.2. L'influence des procédures et des caractéristiques des avions : détermination de la fréquence d'atterrissages pour une piste dédiée aux atterrissages — les procédures réglementaires) sur le même axe ILS, ces deux avions doivent être séparés de 3,8 NM. La contrainte supplémentaire augmente donc la distance entre les avions qui se suivent sur le même axe ILS. Elle augmente ainsi le temps entre ces deux avions et diminue donc la capacité technique horaire à l'arrivée de chacune des pistes parallèles interdépendantes d'environ 25 %. La capacité technique horaire à l'arrivée du doublet est donc de 1,5 fois celle d'une piste unique.

Lorsque la séparation due aux turbulences de sillage induit en théorie un espacement supérieur à 3 NM (soit 4, 5 ou 6 NM en fonction des types d'avions qui se suivent, cf. 2.1.1.1.2.2. L'influence des procédures et des caractéristiques des avions : détermination de la fréquence d'atterrissages pour une piste dédiée aux atterrissages - les procédures réglementaires) sur le même axe ILS, la contrainte supplémentaire n'a pas d'influence sur la capacité technique horaire à l'arrivée.

Photographie GRAPHIX IMAGES/V. PAUL

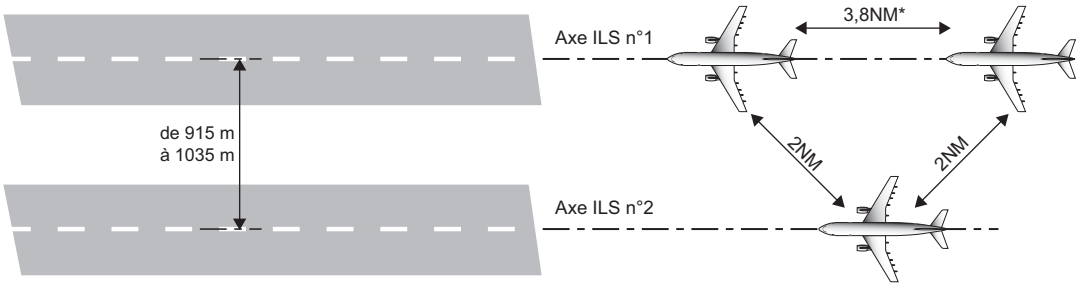
*Voies de circulation de l'aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle*

La capacité horaire technique à l'arrivée du doublet est donc double de celle d'une piste unique.

### 2.1.1.1.3. Facteurs de premier ordre pour une séquence d'avions qui décollent

#### 2.1.1.1.3.1. Influence de l'infrastructure et des performances des avions au décollage : détermination du temps d'occupation de piste (TOP)

Nous allons voir que, comme dans le cas des avions à l'atterrissage, ce TOP dépend de l'infrastructure et des caractéristiques des avions qui fréquentent la piste.




* *3,8 NM est obtenu à partir du calcul suivant : $2^* \sqrt{2^2 - 0,5^2}$ et $2 \times \sqrt{2^2 - 0,6^2}$ comme la distance entre les axes est comprise entre 915 et 1035 m, la distance entre les avions du même axe ILS est comprise entre 3,87 à 3,82 m NM*

**1er cas : la distance au décollage est inférieure à la distance entre la bretelle et le seuil de piste**

Le schéma 1 décrit cette situation pour laquelle le TOP au départ se décompose en :

- temps de roulage pour l'alignement,
- temps de parcours de la distance au décollage,
- temps de vol entre le moment où les roues ont quitté le sol et le moment où l'avion franchit le seuil de piste.

**2e cas : la distance au décollage est supérieure à la distance entre la bretelle et le seuil de piste**

Le schéma 2 présente cette situation pour laquelle le TOP au décollage se décompose en :

- temps de roulage pour l'alignement comprenant :
  - le temps de roulage pour gagner la raquette de retournement,
  - le temps de demi-tour,
- temps de parcours de la distance au décollage,
- temps de vol entre le moment où les roues ont quitté le sol et le moment où l'avion franchit le seuil de piste.

Les principaux paramètres présentés ici sont donc :

- la distance de décollage de l'avion qui dépend de la masse, du chargement, de la vitesse de roulage de l'avion et de la vitesse de décollage, taux de montée,
- la position de la bretelle d'entrée sur la piste,
- la position d'une bretelle de retournement.

La possibilité de diminuer le TOP pour augmenter ou adapter la capacité technique varie selon que l'on se place du point de vue de la planification aéroportuaire ou point de vue opérationnel.

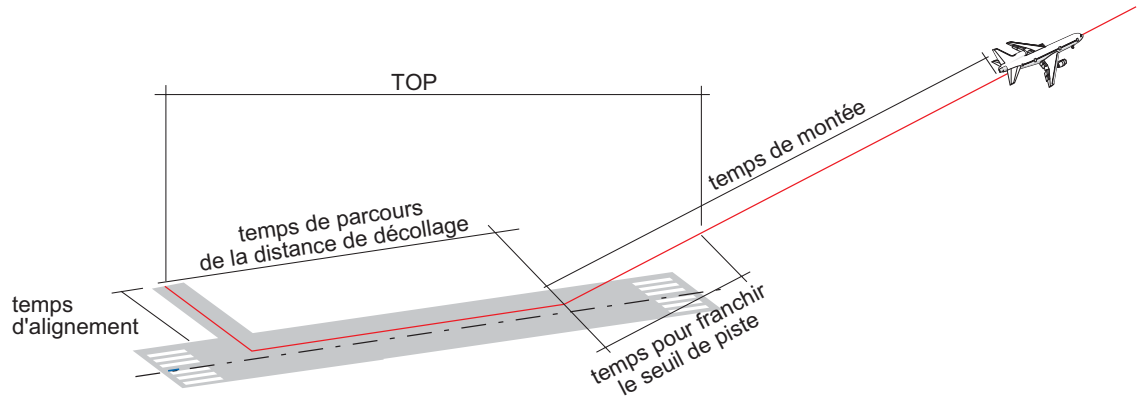



*Schéma 1*

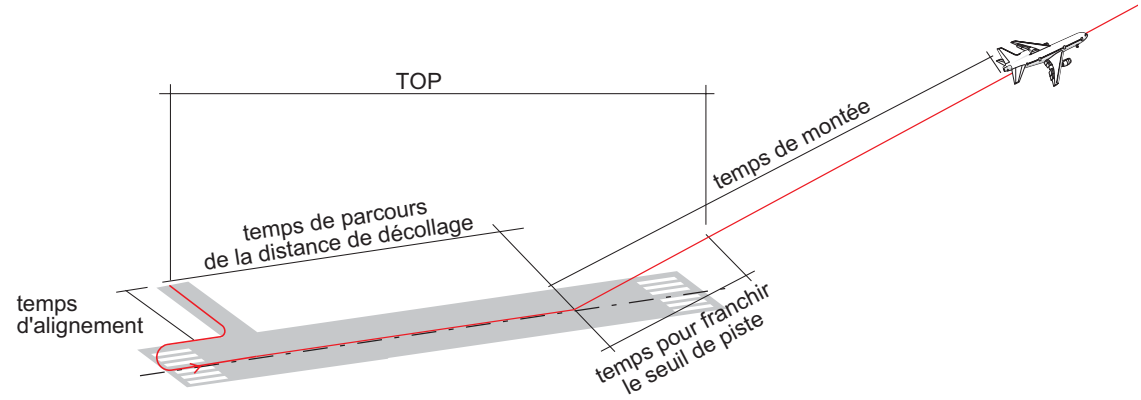



*Schéma 2*

**Du point de vue de la planification aéroportuaire**, la distance de décollage est une donnée sur laquelle on ne peut pas agir. Il n'est pas possible de la diminuer.

Le planificateur peut diminuer le TOP en prévoyant la construction d'une bretelle à une distance suffisamment courte pour que le temps entre le décollage des roues et le moment où l'avion franchit le seuil de piste soit le plus court possible. Cette recommandation doit prendre en compte la longueur de la piste et notamment doit respecter les distances minimales nécessaires au décollage [9] (distance accélération-arrêt, distance de décollage, longueur de roulement au décollage) sur piste sèche ou mouillée.

Il doit surtout éviter que l'avion ait un demi-tour à effectuer en raison d'une mauvaise position des bretelles, situation évoquée dans le schéma n° 2.

Deux procédures d'utilisation des infrastructures en vue de diminuer le TOP au décollage ont été observées en Europe (cf. annexe 5 : les procédures mûres recommandées par APATSI procédures n° 4 et n° 5) et prennent en compte les aspects liés à l'infrastructure, cités ci-avant. La première concerne le multi-alignement d'avions au décollage, et la seconde concerne l'utilisation d'une intersection de deux pistes comme bretelle d'alimentation de la piste des avions au décollage (cf. le point de vue opérationnel ci-après).

Le multi-alignement permet le décollage d'avions positionnés sur des bretelles différentes d'alimentation. En effet, la position d'une bretelle d'alimentation n'est idéale que pour un type d'avions. Il est donc préférable de positionner une bretelle d'alimentation de piste pour un avion de catégorie bien définie. En général, trois types d'avions sont retenus : les avions de type turbo-propulseurs (ATR42, Emb120), les jets (Emb145, CRJ, A320, B737…) et les gros porteurs (B747, A340…).

Il est aussi à noter que le multi-alignement ne peut se faire que si l'infrastructure répond à certaines conditions. Ainsi, l'entraxe piste-voie de circulation parallèle doit être suffisant en vue de garantir la marge nécessaire derrière l'avion en attente au point d'arrêt afin de permettre le passage d'avions sur la voie de circulation parallèle. Sinon des blocages au sol auraient un impact sur la capacité des voies de circulation et de la piste.

Lorsqu'une bretelle est relativement bien positionnée et évite ainsi un demi-tour sur piste pour l'alignement de l'avion, la capacité technique dépend surtout du cadencement des départs. Ce cadencement résulte des procédures aériennes décrites dans le paragraphe 2.1.1.1.3.2.

En conclusion et pour un planificateur :

1. le positionnement des bretelles d'entrée sur piste est très important. La localisation d'une bretelle devrait permettre d'éviter la configuration représentée par le schéma 2 (p. 42) afin que les avions n'aient pas à faire de demi-tour pour l'alignement,

2. dans le cas où les demi-tours sont inévitables, il faut positionner une raquette de retournement à une distance suffisante pour permettre les décollages, mais suffisamment proche du seuil afin de diminuer le temps de roulage.

3. la construction d'une double de voie de circulation parllèle à la piste permet d'optimiser les séquences d'avions au départ.

**D'un point de vue opérationnel**, lorsque l'infrastructure ne peut pas évoluer mais que les bretelles sont relativement bien placées, l'augmentation de la capacité technique au départ résulte d'améliorations des procédures aériennes (cf. paragraphe 2.1.1.1.3.2).

Il est aussi possible d'émettre des recommandations aux pilotes en vue de diminuer les temps de réactions aux clairances d'alignement et de décollage (cf. paragraphe sur les facteurs humains du 2.1.2.). En effet, les temps de réaction des pilotes peuvent augmenter le TOP au décollage dans le cas d'une attention détournée (check list…). Ces temps s'ajoutent de la façon suivante :

Ces temps de réaction peuvent être élevés. Pour les aéroports saturés où la capacité doit être maximale, chaque seconde gagnée de TOP est importante. Ainsi, Eurocontrol développe actuellement un programme de mesure de ces temps de réaction afin d'émettre des recommandations pour les diminuer [10].

Eurocontrol a ainsi édité un guide [11] et un manuel [12] d'augmentation de la capacité.

---

*9 cf. OPS 1.490 Décollage*

*10 à travers le projet P4 : Airside Capacity Enhancement de l'Airport Operation Program (programme des opérations aéroportuaires). cf www.eurocontrol.int*

*11 Enhancing Airside Capacity - the complete guide, Eurocontrol, 15 septembre 2003*

*12 Airside capacity enhancement implementation maximal, Eurocontrol, 14 octobre 2003*

Temps de réaction à la clairance d'alignement →
Temps de réaction à la clairance de décollage →

1er cas : la distance au décollage est inférieure à la distance entre la bretelle et le seuil de piste
- temps de roulage pour l'alignement,
- temps de parcours de la distance au décollage,
- temps de vol entre le moment où les roues ont quitté le sol et le moment où l'avion franchit le seuil de piste.

Temps de réaction à la clairance d'alignement →
Temps de réaction à la clairance de décollage →

2e cas : la distance au décollage est supérieure à la distance entre la bretelle et le seuil de piste
- temps de roulage pour l'alignement comprenant :
  - le temps de roulage pour gagner la raquette de retournement,
  - le temps de demi-tour,
- temps de parcours de la distance au décollage,
- temps de vol entre le moment où les roues ont quitté le sol et le moment où l'avion franchit le seuil de piste.

Dans le cas où les espacements réduits sont possibles (cf. 2.1.1.1.3.2.2. réduction des espacements) :

Temps de réaction à la clairance d'alignement →
Temps de réaction à la clairance de décollage →

1er cas : la distance au décollage est inférieure à la distance entre la bretelle et le seuil de piste
- temps de roulage pour l'alignement,
- temps de parcours de 2500 m ou 2000 m suivant les conditions d'exploitation

Temps de réaction à la clairance d'alignement →
Temps de réaction à la clairance de décollage →

2e cas : la distance au décollage est supérieure à la distance entre la bretelle et le seuil de piste
- temps de roulage pour l'alignement comprenant :
  - le temps de roulage pour gagner la raquette de retournement,
  - le temps de demi-tour,
- temps de parcours de 2500 m ou 2000 m suivant les conditions d'exploitation

Au décollage, les principales recommandations sont :
- réaliseer les check lists avant d'atteindre la barre d'arrêt,
- se préparer à réagir rapidement à la clairance de décollage,
- anticiper en suivant la séquence du trafic.

Sur les aéroports européens, les temps de réaction à la clairance de décollage ont été mesurés et sont en moyenne de 11 secondes. Il a été montré qui'il était possible de les diminuer à 7 secondes permettant ainsi d'augmenter de 2 le nombre de décollages à l'heure.

Pour un doublet de pistes sécantes, l'intersection des deux pistes peut constituer une bretelle d'alimentation d'avions au décollage. La diminution du TOP provient de la réduction du temps de roulage de l'avion qui décolle. Cette procédure a été observée en Europe (cf. annexe 5 : les procédures mûres recommandées par APATSI, procédure n° 4).

Recommandations ou meilleures pratiques pour diminuer les TOP au décollage :

- multi-alignement sur la piste : des avions sont alignés sur la piste et prêts à décoller à une distance suffisante prenant en compte les turbulences de sillages afin de diminuer les TOP au décollage.
- décollage d'une intersection : pour un doublet de pistes sécantes, l'intersection des deux pistes peut constituer une bretelle d'alimentation d'avions au décollage. On diminue alors temps de vol entre le moment où les roues ont quitté le sol et le moment où l'avion franchit le seuil de piste.

#### 2.1.1.1.3.2. L'influence des procédures et des performances des avions qui décollent : détermination de la fréquence de décollage

##### 2.1.1.1.3.2.1. Cas général

Les procédures sont les facteurs qui induisent des séparations temporelles ou spatiales entre avions pour assurer leur sécurité. Certaines sont réglementaires, d'autres propres à la plate-forme. Elles s'appliquent à chacune des pistes d'un doublet éloigné banalisé et de la piste dédiée aux décollages d'un doublet spécialisé, d'un système de pistes sécantes ou convergentes de plus de 15°, et d'une piste unique. Dans le cas d'un doublet éloigné banalisé, la fréquence de décollage est double de celle d'une seule piste dédiée aux décollages.

Pour la capacité, les principales procédures réglementaires prises en compte pour le décollage sont :

- les espacements nécessaires pour les turbulences de sillage,
- l'espacement radar,
- l'organisation judicieuse de séquence d'avions.

La principale procédure liée au contexte local est la présence de routes divergentes.

**Les procédures réglementaires**

Les procédures réglementaires sont édictées par le Règlement de la Circulation Aériennes — fascicule n° 3 (RCA3).

Les minima d'espacement résultant des turbulences de sillage à appliquer entre deux aéronefs au départ sont explicités dans le tableau suivant (RCA3 - 5.6.6.2.2.).

La capacité horaire technique va dépendre du temps d'occupation de piste lorsqu'il n'y a pas de contrainte de turbulences de sillage.

Lorsqu'il y a des contraintes, la capacité horaire technique au départ va dépendre essentiellement de la séparation temporelle imposée par le RCA3.

**Les procédures liées au contexte local**

La principale procédure liée au contexte local est la présence de routes divergentes. Elles permettent de faire décoller un avion sur une autre route afin d'éviter les rattrapages d'avions ayant des vitesses différentes : cf. schéma D : il n'y a pas de contrainte pour turbulences de sillage et les routes sont divergentes pour des avions ayant des vitesses différentes. Cette procédure a été observée en Europe et a été retenue comme procédure mûre (cf. annexe 5 : les procédures mûres recommandées par APATSI) : procédures au décollage modifiées pour des avions ayant des distances courtes de décollage (procédure n° 12 de l'annexe 6).

| Avion suiveur / Avion de tête | Light<br>MTOW ≤ 7 t | Medium<br>7 t < MTOW ≤ 136 t | Heavy<br>MTOW > 136 t |
|---|---|---|---|
| **Light** | (*) | (*) | (*) |
| **Medium** | 120 s (180 s) | (*) | (*) |
| **Heavy** | 120 s (180 s) | 120 s (180 s) | (*) |

*(*) pas de contrainte d'espacement due à la turbulence de sillage*
*1 : pour un départ de l'avion suiveur d'une bretelle située à une partie intermédiaire de la piste*
*MTOW : Maximum Take — Off Weight*

#### 2.1.1.1.3.2.2. réduction des espacements

Au paragraphe 2.1.1.1.2.2.2., les conditions et les règles d'exploitation des espacements réduits ont été décrits en détail. Si les conditions sont réunies, nous rappelons ici, les valeurs d'espacement entre deux décollages :

- un aéronef peut recevoir une clairance de décollage après un autre décollage si l'aéronef qui le précède sur la piste laisse disponible une longueur de piste d'au moins 2500 m. Cette distance peut être réduite à 2000 m si l'aéronef a effectivement décollé,
- ces valeurs peuvent être ramenées respectivement à 2000 m et 1500 m si l'aéronef qui reçoit la clairance est un bimoteur à hélices de moins de 7000 kg et l'aéronef qui le précède est un monomoteur à hélice ou un bimoteur à hélices de moins de 7000 kg,
- ces valeurs peuvent être ramenées respectivement à 1000 m et au décollage effectif de l'aéronef précédent si les deux aéronefs sont des monomoteurs à hélice en vol VFR,
- la valeur de 1000 m du paragraphe précédent peut, après étude particulière, être ramenée à une fois et demi la longueur maximale d'atterrissage des aéronefs fréquentant habituellement l'aérodrome.

Les mesures pour augmenter la fréquence de décollages sont :

- réduire les espacements si possibles,
- émettre des recommandations aux pilotes pour diminuer les TOP,
- prévoir, si les liaisons aériennes le permettent, au moins deux routes divergentes au décollage pour des catégories d'avions différentes,
- prévoir le multi-alignement au départ de façon à ce que les premiers avions à décoller soient les moins contraignants du point de vue des turbulences de sillage par rapport aux avions suiveurs, et ce notamment si des routes divergentes sont possibles,
- prévoir des « by-pass » sur les voies de circulation (plates-formes d'attente, peignes d'entrée sur piste ou voies doublées) afin d'enchaîner de manière favorable les avions au décollage et de diminuer ainsi les distances entre eux induites par les turbulences de sillage.

Parmi les autres procédures observées en Europe (cf. annexe 5 : les procédures mûres recommandées par APATSI), et lorsque les conditions locales le permettent, on peut modifier l'application des contraintes de turbulences de sillage pour des décollages (procédure n° 7 de l'annexe 5).

### 2.1.1.1.4. Facteurs de premier ordre pour un mélange d'atterrissages et de décollages

La capacité horaire technique pour une séquence enchaînant tour à tour des avions à l'atterrissage et au décollage va dépendre du temps entre un atterrissage et un décollage ou entre un décollage et un atterrissage. Il dépend principalement des temps d'occupation de piste à l'arrivée et au décollage et de la configuration du système de piste(s).

La détermination des TOP à l'atterrissage et au décollage a été présentée respectivement aux paragraphes 2.1.1.1.2 et 2.1.1.1.3.

Nous décrivons ici l'influence de la fréquence d'apparition des avions dans le système de piste(s) et des configurations de piste(s) pour une piste unique, un doublet de pistes parallèles et un doublet de pistes sécantes.

#### 2.1.1.1.4.1. Pour une piste unique

##### 2.1.1.1.4.1.1. Cas général

Le temps minimum entre un décollage et un atterrissage est égal au temps de parcours de l'avion à l'atterrissage entre le verrou [13] et le seuil de piste car le TOP au décollage de l'avion de tête est inférieur à ce temps. L'espacement minimal à appliquer entre un avion au départ et un avion à l'arrivée correspond donc à la distance entre le verrou et le seuil de piste.

Le temps minimum entre un atterrissage et un décollage qui suit est égal au TOP à l'arrivée de l'avion de tête.

##### 2.1.1.1.4.1.2. réduction des espacements

Au paragraphe II.1.1.1.2.2.2., les conditions et les règles d'exploitation des espacements réduits ont été décrits en détail. Ils ne s'appliquent pas entre un aéronef au départ et un aéronef à l'arrivée qui le précède. Si les conditions sont réunies, nous rappelons ici, les valeurs d'espacement entre un aéronef à l'arrivée et un aéronef au départ qui le précède :

13 *cf. définition du verrou page 34*

- un aéronef peut recevoir une clairance d'atterrissage après un autre décollage si l'aéronef qui le précède sur la piste laisse disponible une longueur de piste d'au moins 2 500m. Cette distance peut être réduite à 2 000m si l'aéronef a effectivement décollé ;

- ces valeurs peuvent être ramenées respectivement à 2 000 m et 1 500 m si l'aéronef qui reçoit la clairance est un bimoteur à hélices de moins de 7 000 kg et l'aéronef qui le précède est un monomoteur à hélice ou un bimoteur à hélices de moins de 7 000 kg ;

- ces valeurs peuvent être ramenées respectivement à 1 000 m et au décollage effectif de l'aéronef précédent si les deux aéronefs sont des monomoteurs à hélice en vol VFR ;

- la valeur de 1 000 m du paragraphe précédent peut, après étude particulière, être ramenée à une fois et demi la longueur maximale d'atterrissage des aéronefs fréquentant habituellement l'aérodrome.

#### 2.1.1.1.4.2. Pour des pistes parallèles en mode banalisé ou en mode spécialisé

Pour un doublet éloigné de pistes parallèles en mode banalisé ou en mode spécialisé, les mouvements simultanés ont lieu, c'est-à-dire que les décollages et les atterrissages se font en même temps. Les atterrissages n'ont pas de contraintes sur les décollages, et les décollages n'ont pas de contraintes sur les atterrissages.

#### 2.1.1.1.4.3. Pour un doublet de pistes parallèles rapprochées spécialisées

##### 2.1.1.1.4.3.1. Cas général

Pour un doublet de pistes parallèles rapprochées spécialisées, le temps minimum entre un avion au décollage et un avion à l'atterrissage est égal au temps de parcours de l'avion à l'atterrissage de la limite d'autorisation d'atterrir au seuil de piste.

Le temps minimum entre un avion à l'atterrissage et un avion au décollage est égal au temps d'occupation partielle de piste (TOPP). Une clairance de décollage ne peut être délivrée que lorsque l'avion de tête (arrivée) est stabilisé sur la piste car celui-ci n'effectuera pas d'approche interrompue. C'est la durée nécessaire à l'avion de tête pour parcourir le trajet entre le seuil d'exploitation et le point de stabilisation au sol. Il faut souligner que, sous certaines conditions de visibilité (VMC), le TOPP peut être fortement réduit (10 à 12 secondes environ).

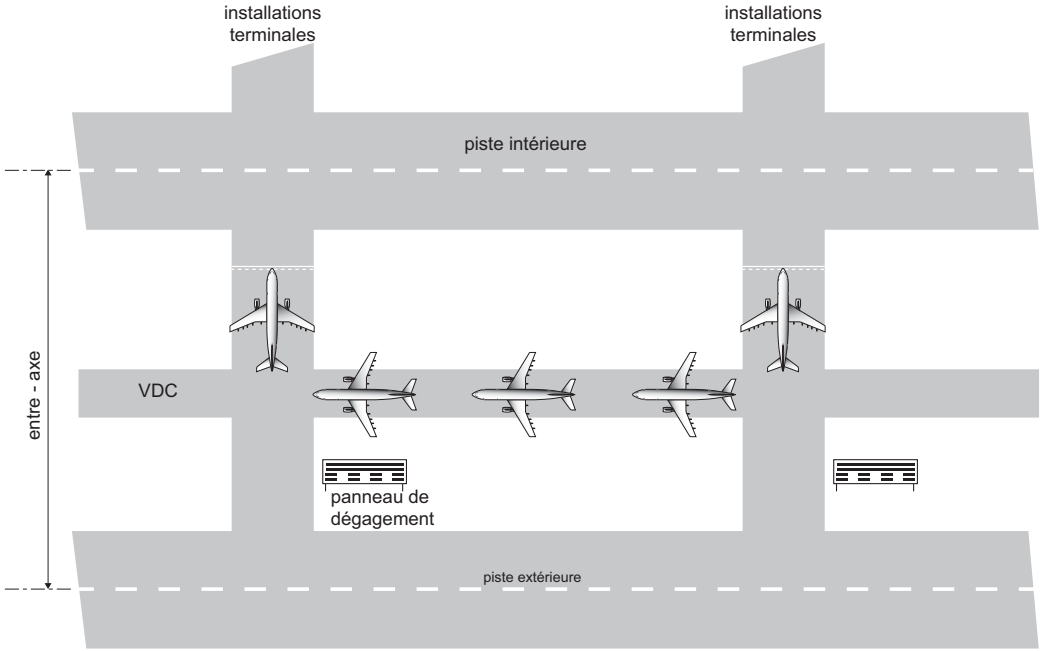
Par ailleurs, la distance entre les deux pistes peut avoir un impact sur la capacité des voies de circulation et celle des pistes. Si l'emprise de l'aéroport le permet, il est préférable, en effet, de construire une voie de circulation parallèle entre les deux pistes afin de permettre une meilleure circulation au sol des avions et un meilleur stockage des avions qui attendent de traverser l'une des pistes (cf. schéma ci-après : cas favorable à un bon fonctionnement du doublet). Sinon, la zone de stockage des avions est limitée (cf. schéma ci-après : cas peu favorable à un bon fonctionnement du doublet). Elle peut ainsi se trouver rapidement engorgée. Dans ce cas, un blocage de l'une des bretelles d'alimentation de la piste, voire de la piste elle-même, est possible. Par ailleurs, le dégagement de la zone de stockage risque d'entraîner un blocage de la piste traversée. L'utilisation des pistes n'est pas optimale et la capacité s'en trouve diminuée.

#### 2.1.1.1.4.3.2. procédures permettant des mouvements simultanés sur des doublets parallèles par temps correct

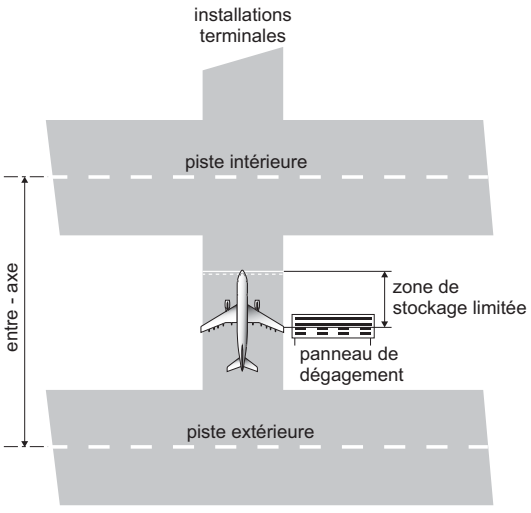
L'autorité compétente des services de la circulation aérienne après consultation des principaux exploitants utilisant l'aérodrome peut autoriser des procédures permettant d'exploiter un doublet de pistes parallèles de façon à faire atterrir et décoller les aéronefs de manière indépendante. Tel est le cas sur l'aéroport Paris-Charles de Gaulle par temps correct, ce qui arrive 90% du temps d'ouverture de l'aéroport. Il faut que les contrôleurs voient les aéronefs au départ et l'aéronef à l'atterrissage sur la courte finale.

#### 2.1.1.1.4.3.3. procédures particulières sur des doublets parallèles par mauvais temps

En cas de météorologie médiocre, l'appareil au décollage doit commencer à rouler avant que l'aéronef à l'arrivée atteigne 2 NM du seuil de piste. Par mauvais temps, c'est à dire en LVP (Low Visibility Procedures), l'aéronef au départ a quitté la piste et se trouve au niveau du travers du Localizer de la piste à l'arrivée lorsque l'aéronef à l'arrivée atteint 1 NM du seuil de piste.




*Cas favorable à un bon fonctionnement du doublet*




*Cas peu favorable à un bon fonctionnement du doublet*

#### 2.1.1.1.4.4. Pour un doublet de pistes sécantes

Dans le cas d'un doublet de pistes sécantes utilisées en mode spécialisé, l'espacement minimal (temps de croisement à l'arrivée) à appliquer au seuil de piste entre un avion à l'arrivée et un avion au départ est égal au minimum du temps de croisement à l'arrivée (temps mis par l'avion de tête pour aller du seuil à un point situé en aval du croisement à une distance de 90 m par rapport à l'axe de la piste) et du temps d'occupation de piste à l'arrivée. Si les trajectoires de vols se croisent (croisement proche du seuil « arrivées » et éloigné du seuil « départs »), les règles sur les turbulences de sillage doivent être appliquées en ce qui concerne les départs.

Le bureau APATSI (Airport Air Traffic Services Interface) de la CEAC (Communauté Européenne de l'Aviation Civile) a formulé des recommandations concernant l'application possible de procédures aériennes à l'approche améliorant la capacité horaire technique. Elles ont été mises en place sur certains aéroports européens, et peuvent, dans certaines conditions, être appliquées aux autres aéroports de la communauté européenne. Elles sont décrites à l'annexe 5 : les procédures mûres recommandées par APATSI. Celle qui concerne les séquences d'avions enchaînant des atterrissages et des décollages pour un doublet de pistes sécantes est la n° 11.

Photothèque STBA/V. PAUL

*Avion mis en attente avant le décollage à l'aéroport de Lyon-Saint-Exupéry*

#### 2.1.1.1.5. conclusion : les systèmes de pistes et leur optimisation

Les paramètres principaux ayant un impact sur la capacité piste ont été décrits pour différents systèmes de pistes. Nous pouvons d'ores et déjà dire que les systèmes les plus capacitif aux moins capacitifs, et corrélativement des plus sûrs au moins sûrs, se classent comme suit :

- pistes parallèles banalisées indépendantes avec aérogares et autres installations au centre,
- pistes parallèles spécialisées avec aérogares au centre,
- doublet de pistes,
- pistes convergentes,
- pistes sécantes,
- piste unique.

Il faut donc éviter, lorsque cela est possible, les installations qui induisent des traversées de piste.

Les cas général de la réglementation de la circulation aérienne a été décrit. Elle impose les règles d'exploitation en fonction des caractéristiques physiques de l'infrastructure et du trafic.

La capacité horaire technique dépend de l'infrastructure, du trafic et des procédures et notamment de l'organisation de l'espace aérien terminal des équipements et des facteurs humains. Pour améliorer la capacité des systèmes de pistes, ce dernier doit être bien organisé afin de séparer les flux d'arrivées et de départs. On se réfèrera à la section 5 – guidelines for terminal airspace design du manuel d'Eurocontrol : Eurocontrol manual for airspace planning.

Il est possible d'optimiser les systèmes de pistes en appliquant des règles d'espacement réduit et la clairance anticipée à l'atterrissage.

D'autres moyens sont possibles. Ils concernent les pilotes, le contrôle et le gestionnaire d'aéroport (cf. le guide [14] et le manuel [15] d'augmentation de la capacité édités par Eurocontrol).

Concernant les pilotes, les principales mesures sont :

- améliorer l'écoulement du trafic à l'arrivée,
- diminuer les temps de réaction au départ,

Concernant le contrôle, elles portent notamment sur l'application des espacements réduits.

Pour l'aéroport, les principales mesures concernent l'amélioration de l'infrastructure (sorties rapides, taxiway parallèle, deux points d'entrée sur piste…) afin de faciliter les mesures qui portent sur les pilotes et le contrôle.

Ces mesures nécessitent un travail en collaboration pour :

- mesurer les temps d'occupation de piste et les temps de réaction des pilotes,
- analyser les meilleures pratiques,
- communiquer anonymement sur les meilleures pratiques.

---

[14] *Enhancing Airside Capacity – the complete guide, Eurocontrol, 15 septembre 2003*

[15] *Airside capacity enhancement implementation manuel, Eurocontrol, 14 octobre 2003*

Photothèque STBA/V. PAUL

*Avion mis en attente avant le décollage à l'aéroport de Lyon-Saint-Exupéry*

Photothèque STBA/V. PAUL

*Postes de stationnement au terminal 1 de l'aéroport de Nice-Côte-d'Azur*

### 2.1.1.2. Facteurs de premier ordre des voies de circulation

#### 2.1.1.2.1. Influence de l'infrastructure et des performances des avions : détermination du temps d'occupation de la voie de circulation

Le temps d'occupation d'une voie de circulation dépend de :

- la longueur de la voie de circulation :
  - pour les avions à l'arrivée : de la distance entre la bretelle de sortie et le poste de stationnement concerné par l'avion,
  - pour les avions au décollage : de la distance entre le poste de stationnement concerné par l'avion et la bretelle d'entrée sur la piste,
- la vitesse de roulage de l'avion.
- La structure du réseau des voies de circulation (croisement)

#### 2.1.1.2.2. Influence des procédures et des performances des avions : détermination de la fréquence d'utilisation de la voie de circulation

La fréquence d'apparition d'avions sur la voie de circulation dépend de :

- l'espacement entre avions au roulage en raison des marges de sécurité à respecter,
- pour les avions à l'arrivée : la position de la piste d'atterrissage par rapport aux aérogares. Elle peut engendrer dans le cas d'un doublet de pistes une traversée de l'autre piste. Dans ce cas, l'avion qui traverse la piste doit attendre que l'avion termine son décollage.
- pour les avions au départ : la position de la piste de décollage par rapport aux aérogares. Elle peut engendrer dans le cas d'un doublet de pistes une traversée de l'autre piste. Dans ce cas, l'avion qui traverse la piste doit attendre que l'avion termine son atterrissage. L'avion qui atterrit est prioritaire si il a dépassé le verrou.

Sur la plupart des aéroports, les avions atterrissent sur la piste extérieure et décollent sur la piste intérieure.

### 2.1.1.3. Facteurs de premier ordre des postes de stationnement

#### 2.1.1.3.1. Influence de l'infrastructure et des performances des avions : détermination du temps d'occupation des postes de stationnement

Le temps d'occupation d'un poste de stationnement se décompose en :

- temps de traitement de l'avion (chargement et déchargement des passagers et des éléments nécessaires au vol — kérosène…),
- temps de repoussage si la configuration du poste l'exige,
- temps de réaction au roulage après repoussage.

Il dépend :

- de l'équipement du poste :
  - passerelle,
  - sinon liaison supplémentaire avec l'aérogare : par bus ou à pied,
- nature du poste :
  - nose in : nécessite un repoussage,
  - nose out (autonome),
- chargement de l'avion : dépend de la taille (catégorie d'avion) et du marché (charter, low cost, affaire).

#### 2.1.1.3.2. Influence des procédures et des performances des avions : détermination de la fréquence d'utilisation des postes de stationnement

La fréquence d'apparition d'avions aux postes de stationnement dépend des procédures qui séparent les avions au roulage sur les voies de circulation (cf. 2.1.1.2.2.).

### 2.1.2. L'analyse des facteurs de 2e ordre

Les facteurs de 2e ordre sont définis comme des facteurs ayant un impact sur les facteurs principaux. Ils ne sont pas quantifiés pour évaluer directement la capacité technique. La quantification de leur influence s'évalue en estimant les variations induites sur les facteurs principaux.

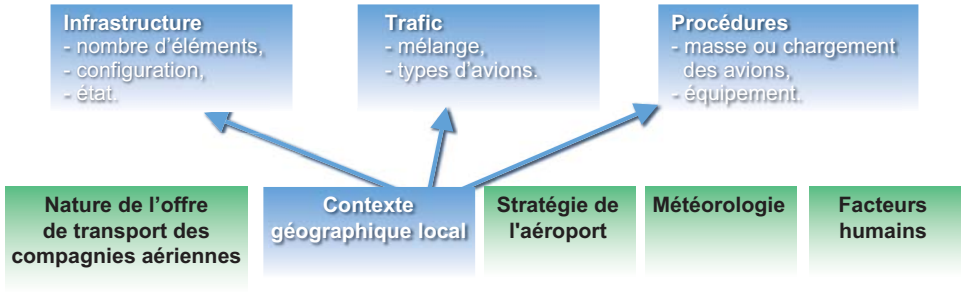
La nature de l'offre de transport des compagnies aériennes correspond à :

- type d'avions dans la flotte,
- organisation des vols sur la plate-forme (hub/non hub, régulier/non-régulier).

L'ensemble des types d'avions et le mélange (arrivée-départ et des types d'avions) observés sur l'aéroport résultent de la combinaison de ces facteurs imposés par chaque compagnie aérienne qui fréquente l'aéroport.

*Nature de l'offre de transport des compagnies aériennes*

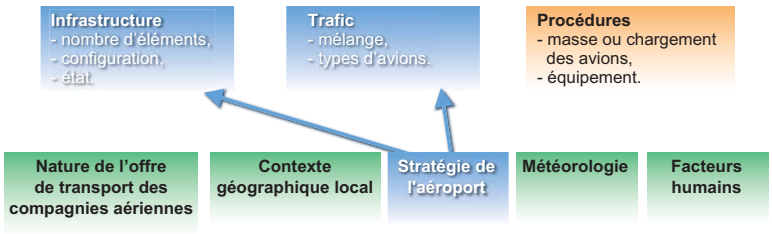
*Contexte géographique local*




Le contexte géographique local a un impact sur :

- les procédures en raison de la topographie qui peut engendrer des procédures particulières (ex. : procédures riviera à Nice) et plus contraignantes que les procédures standards,
- les infrastructures. La topographie, par la présence d'éléments naturels contraignants (montagne, mer), peut limiter l'extension des infrastructures (nombre de pistes, extension des voies de circulation et de stationnement),
- le trafic. L'isolement géographique de certaines régions (îles…) entraîne une ségrégation du trafic en longs courriers et courts courriers. Il y a donc un impact sur les types d'avions utilisés.

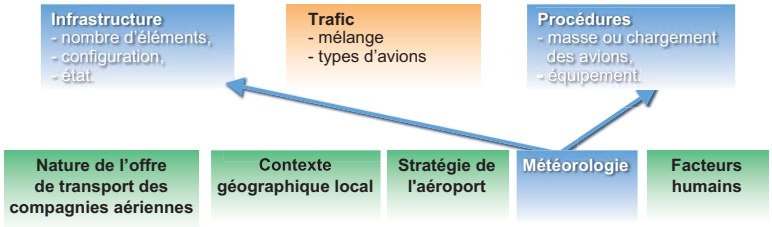
*Stratégie de l'aéroport*




La stratégie de l'aéroport a un impact sur la capacité car :

- l'ouverture ou la fermeture de lignes a un impact sur les types d'avions présents,
- l'attraction de type de trafic particulier (hub, low cost, charter) par une politique tarifaire particulière a un impact sur les types d'avions et sur le mélange arrivées-départs aux heures de pointe,
- le choix des investissements modifie l'infrastructure,
- la gestion opérationnelle des ressources peut être différente, notamment en ce qui concerne l'allocation des postes et des créneaux horaires (surtout pour le cas d'un aéroport coordonné),
- la qualité de service. Pour le traitement des avions, elle s'exprime en retards. Pour le traitement des passagers, elle s'exprime en retards ou en confort.

*Météorologie*



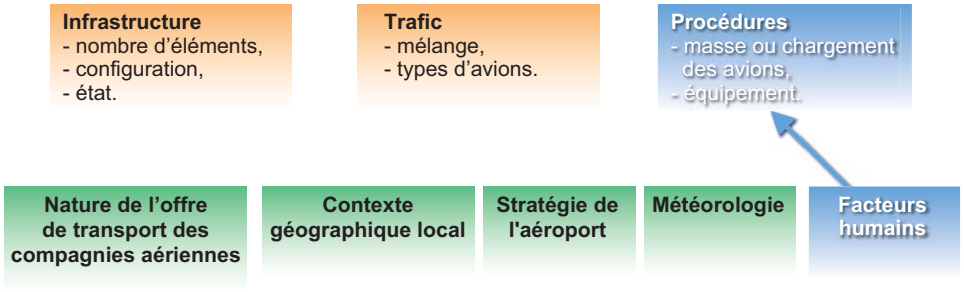

L'influence de la météorologie sur la capacité peut s'exercer des manières suivantes :

- présence de conditions défavorables : procédures IMC contraignantes, séparations entre avions accrues, LVP (low visibility procedures) qui ont un impact sur la circulation au sol des avions,
- l'état de l'infrastructure est modifié. La pluie, le gel ou la neige augmentent la glissance du sol et augmentent les distances d'atterrissage, et donc les temps d'occupation de piste(s).
- les orages et les cisaillements de vent imposent la fermeture de l'aéroport.

Photothèque STBA/A. PARINGAUX

*Brouillard sur l'aéropot de Strasbourg-Entzheim*

*Facteurs humains*




Les facteurs humains sont surtout liés aux pilotes. Ils influencent le niveau de capacité à travers :

- le temps de réaction des pilotes aux clairances pour l'alignement et pour le décollage. Ils augmentent le TOP au décollage,
- l'entraînement : la connaissance de l'avion permet au pilote de freiner plus efficacement et d'emprunter les bretelles de sortie qui minimisent les TOP à l'arrivée,
- la connaissance du terrain : elle permet au pilote d'emprunter les bretelles de sortie qui minimisent les TOP à l'arrivée. Ce point est particulièrement notable pour les pilotes de la compagnie basée sur l'aéroport,
- les recommandations de la compagnie pour le confort des passagers au freinage induisent parfois des freinages moins forts si bien que la distance d'atterrissage est longue. Dans ce cas, le TOP à l'atterrissage est plus important.

Sur certains aéroports européens, des groupes de travail techniques impliquant les pilotes, le gestionnaire et les contrôleurs aériens permettent de sensibiliser les pilotes à l'importance des TOP. Des recommandations leur sont formulées pour qu'ils empruntent, dans la mesure du possible, les bretelles de sortie optimales à l'atterrissage, et pour qu'ils diminuent leur temps de réaction aux clairances au moment du décollage.

*Le contexte économique local*

## 2.1.3. Analyse des facteurs de 3e ordre

Les facteurs de 3e ordre sont définis comme des facteurs ayant un impact sur les facteurs de 2e ordre.

Le contexte économique local a une influence sur :

- la nature de l'offre de transport des compagnies aériennes. Les caractéristiques de l'activité économique locale influencent la nature même du trafic. Ainsi, la forte présence d'entreprises va induire un trafic affaire important. Des liaisons seront nécessaires vers les grands hubs. La création d'un hub ou de lignes directes seront aussi envisageables. Une forte activité touristique induira un trafic touristique. La présence de charters fréquentant l'aéroport sera renforcée. Les avions utilisés et l'organisation des vols en seront influencés,
- La stratégie de l'aéroport se situera en fonction du trafic induit (cf. paragraphe précédent).

*La stratégie des autres aéroports*

Pour un aéroport considéré, la stratégie des autres aéroports va avoir un impact indirect sur son activité. Par exemple, si un aéroport voisin développe une stratégie de hub (par sa politique tarifaire, ses accords avec une compagnie…), il ne pourra plus développer son réseau en hub.

Par ailleurs, la stratégie de l'ensemble des autres aéroports a un impact sur la nature de l'offre des compagnies aériennes en général, et donc sur l'aéroport en question.

*La stratégie des compagnies aériennes*

Une compagnie aérienne va cibler ses marchés (nature des passagers et des destinations). Pour y répondre, elle choisit au mieux les avions en fonction de critères économiques (coûts d'acquisition et de fonctionnement) et son produit (fréquence, service à bord et au sol…) afin de satisfaire la clientèle. Cette stratégie se traduit en une nature de l'offre spécifique. Pour un aéroport donné, la stratégie de l'ensemble des compagnies aériennes qui le fréquentent va déterminer sa nature propre de l'offre de transport qui combine celles des compagnies aériennes.

La stratégie des compagnies aériennes a un impact direct sur la stratégie de l'aéroport puisque la vocation de ce dernier est d'accueillir le service des compagnies. Les stratégies des deux entités sont liées.

L'impact sur les facteurs humains concerne essentiellement le comportement des pilotes qui peuvent recevoir des recommandations concernant le confort des passagers liés au freinage à l'atterrissage.

## 2.1.4. L'analyse des facteurs de 4e ordre :

*Contexte économique*

Le contexte économique local reflète en général le contexte économique national voir international.

Les contextes économiques national et international ont un impact sur le volume des échanges de passagers et de fret. Lorsque des crises ont eu lieu (Guerre du Golfe, crise qui a suivi l'attentat du 11 septembre 2001, SRAS) les trafics de passagers et de fret ont connu des baisses importantes. A contrario, les périodes de croissance ont connu une augmentation des trafics.

Les résultats économiques des compagnies sont très sensibles aux variations de trafic. Les compagnies aériennes tentent en général d'adapter leur capacité offerte aux variations en ajustant le nombre de vols ou, cas plus extrême, en restructurant leur réseau.

L'ensemble des aéroports se trouve touché directement par les stratégies des compagnies et donc du contexte économique.

*Le contexte réglementaire*

La stratégie des compagnies aériennes met en scène des pratiques qui s'inscrivent dans le cadre édicté par la réglementation.

Chaque grande région du monde a développé des réglementations qui complètent les règles de la convention de Chicago de 1944. En Europe, la réglementation a évolué à partir de 1988 jusqu'en avril 1993 date à laquelle le cadre actuel a été fixé.

L'évolution du cadre réglementaire européen a entraîné des modifications du secteur du transport aérien au niveau des compagnies aériennes et des aéroports.

Les compagnies aériennes se sont adaptées en modifiant leur stratégie. Elles se concentrent avec des partenaires organisant leur réseau autour de hubs principaux et secondaires. Ou bien elles s'orientent vers une offre de point à point à prix et service réduits (compagnies low cost).

Les aéroports deviennent partenaires de ces changements en accueillant une structure de réseau en hub, ou en devenant un aéroport d'alimentation d'un hub, ou bien en recevant une des lignes d'une compagnie bas coûts. Un aéroport peut connaître à différents degrés une ou plusieurs de ces trois situations.

Le développement suivant l'un de ces axes pour un aéroport peut alors engendrer une activité pour la région concernée favorisant le développement économique local.

*La technologie*

La stratégie des compagnies aériennes se développe avec les moyens mis à sa disposition. La technologie a fait évoluer les moteurs et la taille des avions offrant ainsi aux compagnies aériennes la possibilité de développer de nouveaux services et de nouvelles stratégies.

Elle a aussi permis d'améliorer le contrôle des avions et le traitement des passagers. Les aéroports peuvent alors répondre à un plus grand nombre de services et s'adapter aux stratégies des compagnies aériennes.

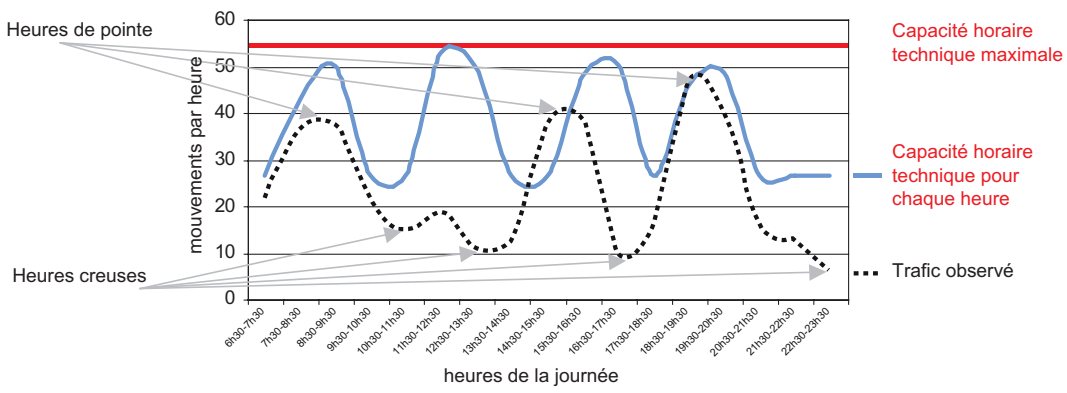
## 2.1.5. Facteurs qui influent sur la capacité annuelle en mouvements

La capacité annuelle est calculée à partir de la capacité journalière qui est la somme de l'ensemble des mouvements qui peuvent être traités par le système de piste sur la journée. Or le nombre de mouvements varie en général à chaque heure car il dépend de la structure de la demande (mélange en arrivées et départs, mélange en catégories d'avions). Certaines heures sont des heures de pointe, et d'autres des heures creuses. Les nombres d'heures de pointe et d'heures creuses, ainsi que le rapport entre elles déterminent la structure du trafic.

Le schéma suivant présente une répartition du nombre de mouvements par heure sur une journée entière. En pointillé, le trafic actuel est représenté. On remarque des heures de pointe et des heures creuses. En trait plein, les capacités horaires techniques sont représentées pour chaque heure.

La capacité journalière va dépendre de la capacité technique horaire maximale et de la structure du trafic. La structure du trafic est déterminée par le nombre d'heures de pointe et le nombre d'heures creuses, ainsi que par le rapport entre elles.

Une première phase de développement de l'aéroport correspond à l'augmentation du trafic journalier jusqu'à ce que la capacité technique horaire maximale soit atteinte, et ce avec une structure de trafic particulière. Cette dernière peut être à peu près semblable à celle observée. Mais elle peut être différente. Ainsi, le rapport entre heure de



pointe et heure creuse peut être supérieur ou inférieur. En général, une analyse du trafic est nécessaire afin de définir ce rapport. Le volume de trafic aux heures creuses est déduit de la capacité horaire technique maximale et du rapport entre le nombre de mouvements aux heures creuses et la capacité horaire maximale de l'heure de pointe.

Une deuxième phase de développement peut connaître, par la suite, un remplissage des heures creuses avec de nouveaux mouvements si aucune mesure ne peut être envisagée pour augmenter la capacité horaire technique maximale à l'heure de pointe. Il faut en revanche qu'une telle demande existe. En effet, en fonction de la vocation de l'aéroport, des compagnies aériennes seraient intéressées pour augmenter le nombre de leurs vols pendant les heures de pointe comme dans le cas d'un hub, mais ne seraient pas disposées à proposer des vols en heures creuses. Les vols qui ont lieu aux heures creuses desservent plutôt des marchés longs courriers ou charters.

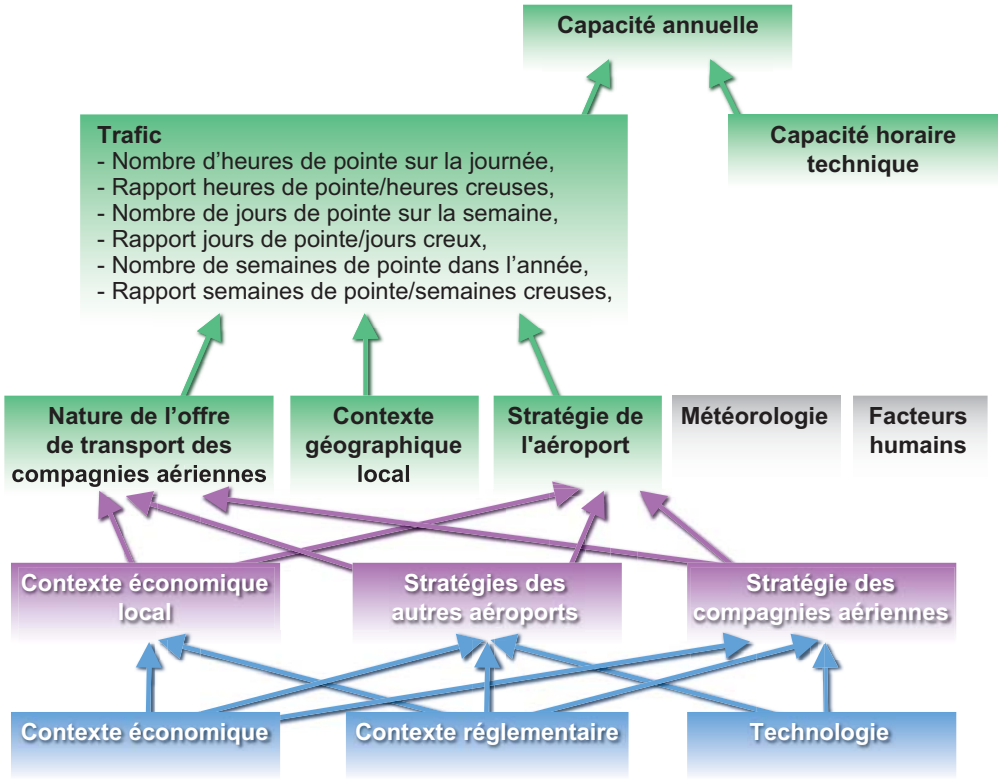
Il se peut que les heures creuses ne soient pas remplies. C'est le cas des principaux aéroports régionaux en France.

Le développement ultime est atteint lorsque la demande des compagnies aériennes est telle que toutes les heures de la journée sont remplies. Pour chaque heure, le nombre de mouvements correspond à la capacité horaire technique de chacune de ces heures. Cette situation est rencontrée sur les principaux aéroports internationaux tels que les aéroports de Paris-Charles de Gaulle et Paris-Orly.

La capacité annuelle dépend aussi de la structure du trafic sur l'année, c'est-à-dire du volume journalier de trafic variant jour après jour. Les mêmes considérations peuvent s'appliquer à cette répartition. Certains jours de l'année connaîtront une augmentation de leur trafic en raison de l'intérêt porté par les compagnies aériennes sur le marché desservit ces jours là, tandis que d'autres ne connaissent qu'une augmentation marginale.

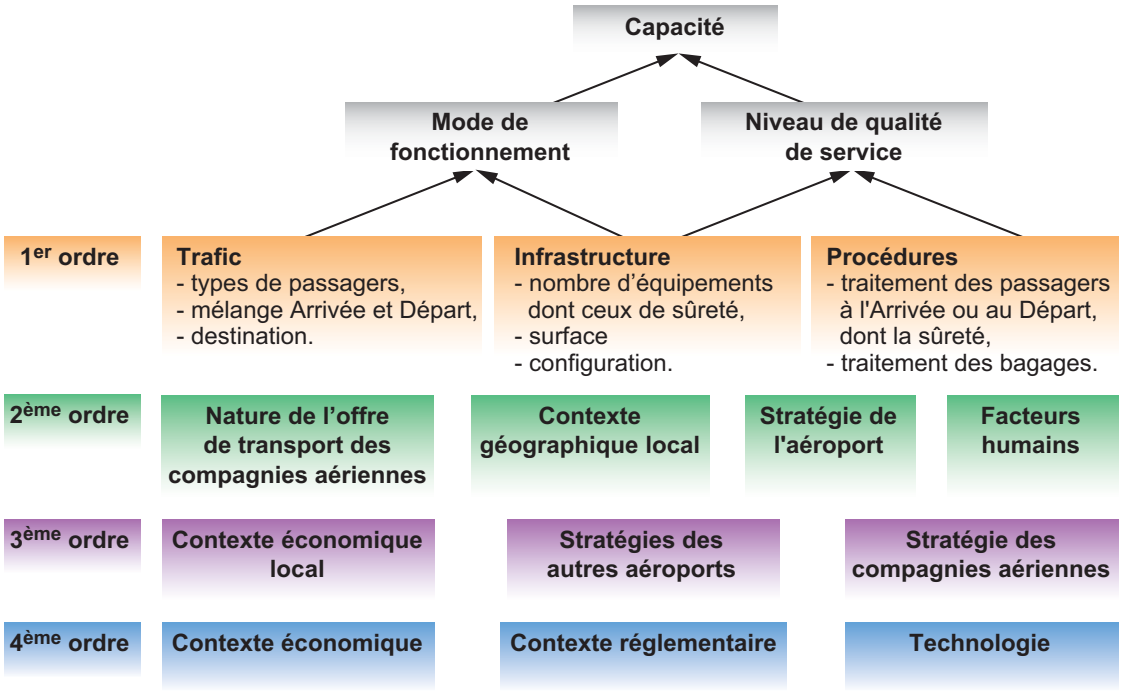
La capacité annuelle reflète donc le volume de trafic qui peut être traité compte tenu de la structure du trafic sur la journée et sur l'année et de la capacité horaire technique.

L'organigramme suivant représente l'influence des facteurs de 2e à 4e ordre sur la capacité annuelle.



## 2.2. Côté aérogare

Par analogie avec le paragraphe « 2.1. Côté piste », le diagramme des facteurs influant sur la capacité est :




Les facteurs de 2e, 3e et 4e ordre étant similaires à ceux influant sur la capacité du côté piste, le lecteur se reportera aux paragraphes 2.1.2., 2.1.3. et 2.1.4.

Photothèque STBA/V. PAUL

*Zone d'enregistrement et hall public de l'aérogare T2 de l'aéroport de Nice-Côte-d'Azur*

Photothèque STBA/A. PARINGAUX

*Hall public et commerces de l'aérogare T1 de Nice-Côte-d'Azur*

### 2.2.1. Qualité de service

La capacité horaire d'une aérogare dépend principalement du niveau de qualité de service choisi. Le niveau de qualité de service du traitement du passager et de ses bagages (cabine et de soute) tant à l'arrivée qu'au départ est un paramètre, qui doit être fixé par l'exploitant de l'aérogare.

Comme indiqué au paragraphe 1.3.2, il dépend de plusieurs facteurs qui peuvent varier y compris selon des besoins momentanés comme indiqué dans l'exemple de ce même paragraphe :

- **du temps d'attente et de traitement aux différents points de passage (voir paragraphe 2.2.3),**
- **des surfaces allouées par passager aux différents points d'attente (voir paragraphe 2.2.3 et 3.2),**
- ***de la lisibilité et compréhensibilité des circulations pour les passagers,***
- ***des services commerciaux offerts.***

Les deux derniers paramètres, lisibilité et compréhensibilité des circuits d'une part et services commerciaux offerts d'autre part, étant essentiellement qualitatifs ne seront pas pris en compte dans la méthode proposée ultérieurement pour déterminer la capacité.

### 2.2.2. Découpage fonctionnel de l'aérogare passager

L'aérogare dispose des fonctionnalités suivantes :

- **fonction trafic** : comprend tous les locaux servant au traitement du passager et de ses bagages,
- **fonction commerciale** : regroupe les boutiques, bars/restaurants, concessions diverses,
- **fonction opérationnelle** : comprend tous les locaux d'exploitation aéroportuaire, notamment ceux permettant le traitement de l'avion lors de l'escale (quelque qu'en soit la durée),
- **fonction administrative** : regroupe les bureaux des services, les espaces affaires,
- **fonction technique** : comprend locaux techniques, installations de maintenance, zone de stockage.

#### 2.2.2.1. Fonction trafic

La fonction trafic sert aux opérations de traitement du passager et de ses bagages ; services rendus aux passagers et aux accompagnateurs.

L'aérogare passager sert d'interface entre 2 modes de transport, l'un aérien et l'autre terrestre. Ces deux modes de déplacement ont chacun leurs exigences pour bien fonctionner. Les zones suivantes servent d'interface entre le côté ville et l'aérogare proprement dite :

- Gare : routière, ferroviaire, ou de transport en site propre lié à la desserte de l'aérogare,
- Parcs de stationnement : véhicules particuliers, taxis, véhicules de location, parcs privés…
- Esplanade départ et arrivée : voie de circulation desservant le côté ville de l'aérogare, dépose minute, stationnement de très courte durée, trottoir assurant la liaison avec le bâtiment aérogare. Ce module est considéré généralement comme faisant partie de l'aérogare.

Les modules suivants forment le cœur de la fonction trafic :

Photothèque STBA/V. PAUL

*Hall public de l'aérogare de Brest-Guipavas*

Photothèque STBA/A. PARINGAUX

*Hall public et commerces de l'aérogare de Marseille-Provence*

- Hall public mixte, départ et arrivée : zone de circulation et d'attente, desserte des différents modules, accueil des passagers, information, point de rencontre, services offerts aux passagers ;
- Enregistrement : banques d'enregistrement des passagers et des bagages, zone d'accumulation de passagers, zones de départ des bagages vers le tri, bureaux directement liés à cette fonction ;
- Salle pour les personnes mineures non accompagnées ;
- Contrôle des bagages de soute : filtre de contrôle, zone de circulation et file d'attente suivant le type de contrôle, bureaux directement associés ;
- Tri bagage départ : regroupement des bagages, tri par destination, chargement des chariots et conteneurs, zone de circulation et de stockage ;
- Contrôle police départ : filtre de contrôle, zone de circulation et file d'attente, bureaux directement associés ;
- Contrôle douane départ : filtre de contrôle, zone de circulation et file d'attente, bureaux directement associés ;
- Contrôle sûreté passagers et bagage à main : filtre de contrôle, zone de circulation et file d'attente, bureaux directement associés, local de fouille ;
- Contrôle de santé : filtre de contrôle, zone de circulation et file d'attente, bureaux directement associés ;
- Zone d'embarquement : zone d'attente et de circulation, salle d'embarquement, salon VIP, services offerts aux passagers, portes d'embarquement, pré-passerelles/passerelles, distinction National/Schengen/International ;
- Zone de transit : zones d'attente et de circulation, services offerts aux passagers en correspondance ;
- Zone arrivée : zone d'attente et de circulation, services offerts aux passagers, portes, pré-passerelles/passerelles ; distinction National ou Schengen/International ;
- Traitement des bagages à l'arrivée : zones de circulation et de stockage, déchargement des chariots et conteneurs, dépose des bagages sur les tapis ;
- Livraison des bagages : tapis de livraison des bagages, zone de circulation et d'attente des passagers, comptoirs/bureaux du service bagages en cas de perte ou détérioration, services offerts aux passagers ;
- Contrôle douane arrivée : filtre de contrôle, zone de circulation et files d'attente, bureaux directement associés ;
- Contrôle santé : filtre de contrôle, zone de circulation et files d'attente, bureaux directement associés.

La fonction trafic représente le cœur fonctionnel de l'aérogare. En effet, le passager et ses bagages doivent « s'acquitter » des formalités (détaillées au chapitre suivant 2.2.3.) avant de prendre un avion ou de quitter l'aérogare. Ce sont les conditions de circulations des flux (passagers, personnels et bagages) entre ces différentes formalités et les fonctionnalités qui s'y rattachent qui déterminent la capacité horaire en règle générale.

### 2.2.2.2. Fonction commerciale

Elle sert aux opérations commerciales offertes aux passagers. Elles sont d'une part associées à une recherche de rentabilité des surfaces et d'autre part liées à un choix spécifique du gestionnaire :

- Vente de billet : banques de réservation et vente de billet ; zone d'attente ; bureaux des compagnies directement liés à cette fonction ;
- Téléphone : zone d'attente ; installations de téléphonie ;
- Banque change : guichet ; zone d'attente ; bureaux directement liés à cette fonction ;
- Location de voiture : guichet ; zone d'attente ; bureaux directement liés à cette fonction ;
- Liaison avec les moyens de transport terrestre, bus, taxi, train : guichet ; zone d'attente ; bureaux directement liés à cette fonction ; information ;
- Réservation hôtel : guichet ; zone d'attente ; bureaux directement liés à cette fonction ; information ;
- Poste : guichet ; zone d'attente ; bureaux directement liés à cette fonction ;
- Bar : espace offert aux passagers ; comptoir ; réserves attenantes ; bureaux éventuels ;
- Restauration : espace offert aux passagers ; cuisine ; réserves attenantes ; bureaux éventuels ;
- Salons des compagnies aériennes : espaces d'exposition, de conférence ; salons VIP affectés à une compagnie en particulier ;
- Boutiques tabacs/journaux ;
- Autres boutiques ;
- etc.

Cette fonction intervient peu dans le calcul de la capacité horaire d'une aérogare.

### 2.2.2.3. Fonction opérationnelle

Elle regroupe toutes les prestations nécessaires au fonctionnement de l'aérogare et au traitement de l'avion après ou avant son vol :

- Poste de contrôle et d'exploitation d'aérogare : contrôle de fonctionnement de l'aérogare ; regroupement des informations sur le trafic ;
- Locaux des compagnies : salle de préparation des vols ; salles de repos des équipages ;
- Locaux divers d'exploitation dont ceux d'assistance en escale.

Photothèque STBAA. PARINGAUX

*Vue sur hall public de l'aérogare de Caen-Carpiquet*

Cette fonction est un facteur conditionnant de la capacité horaire d'une aérogare dans la mesure où elle conditionne les modalités de traitement des avions. En effet, les avions avant de pouvoir décoller doivent subir un traitement appeler escale (nettoyage de l'appareil, approvisionnement en nourriture de bord, devis de masse, devis de centrage, visite pré-vol, remplissage de la soute à carburant, dépôt d'un plan de vol entre autres choses). Les locaux utilisés pour effectuer ces tâches (locaux de stockage de matériels, locaux de replis ou locaux de préparation des vols) peuvent se situer pour tout ou en partie à l'extérieur de l'aérogare. Ce cas de figure ne favorise pas une exploitation optimale des infrastructures.

### 2.2.2.4. Fonction administrative

Elle sert aux besoins administratifs du gestionnaire et des différents usagers pouvant éventuellement être traités hors de l'aérogare.

- Locaux du gestionnaire : bureaux ; salles de réunion…
- Locaux des compagnies : bureaux ; salles de réunion…
- Locaux des services de l'État : Aviation civile ; douanes ; santé ; météorologie ; Police de l'air et des frontières ; GTA ;
- Cantine administrative et cuisines.

Les locaux de cette fonction ne seront pas pris en compte du calcul de la capacité horaire.

### 2.2.2.5. Fonction technique

Elle est nécessaire au fonctionnement du bâtiment.

- Locaux techniques : centrale électrique ; centrale de traitement d'air…
- Zones de stockage : hors commerces et bars/restaurants ;

Les locaux de cette fonction ne seront pas pris en compte du calcul de la capacité horaire.

## 2.2.3. Gestion des flux dans une aérogare passager

Celle-ci doit aussi permettre la gestion des flux :

- de passagers,
- de bagages de soute,
- de personnels (servant à l'exploitation de l'aérogare et à l'assistance en escale ou navigants),
- de marchandises (approvisionnement des commerces),
- entre les différentes zones et celle des autres fonctions précitées,
- autres (visiteurs, accompagnateurs...)

Le bon traitement des deux premiers flux cités est essentiel au bon fonctionnement d'une aérogare. Ce sont ces flux qui en règle générale déterminent la capacité d'une aérogare.

Comme il a été dit, un passager au départ ou l'arrivée doit obligatoirement remplir un certain nombre de formalités. Ces formalités dépendent de sa destination ou de sa provenance :

- les passagers de la zone Schengen qui ne sont assujettis à aucune formalité administrative de la part des services de l'État. C'est le cas des passagers, en temps normal (hors procédures d'urgence, ou vols sensibles) des lignes nationales, ou reliant des pays signataires des accords de Schengen, et des passagers en transit national/national ou national/Schengen. Ils doivent néanmoins subir un contrôle de sûreté,
- les passagers qui pénètrent ou quittent le territoire national depuis ou vers un pays non membre de l'espace Schengen sont soumis aux formalités aux frontières.

En conséquences, on peut identifier, pour un passager et ses bagages, les parcours types suivants :

- régime national ou espace Schengen,
- régime international ou espace hors Schengen.

### 2.2.3.1. Description des flux passagers

Les opérations écrites en gras sont des formalités que le passager doit obligatoirement remplir.

**Régime Schengen**

au départ :

- esplanade
- accès à un hall public, commerces, services,
- achat ou délivrance du billet,
- **enregistrement avec ou sans bagages de soute,**
- **contrôle de sûreté des passagers et des bagages de cabine,**
- **accès en zone d'embarquement,**
- **contrôle de la carte d'embarquement**
- **embarquement,**
- **accès à l'avion.**

à l'arrivée :

- accès à l'aérogare depuis l'avion,
- accès à la salle de livraison bagages,
- accès à un hall public,
- esplanade.

**Régime international**

au départ :

- accès à un hall public, commerces, services,
- achat ou délivrance du billet,
- enregistrement avec ou sans bagages de soute,
- contrôle de sûreté des passagers et des bagages de cabine,
- **accès en zone d'embarquement,**
- **contrôle transfrontière (émigration),**
- **contrôle de la carte d'embarquement**
- **embarquement,**
- accès à l'avion.

à l'arrivée :

- **accès à l'aérogare depuis l'avion,**
- contrôle de santé éventuellement,
- **contrôle transfrontière (immigration),**
- accès à la salle de livraison des bagages,
- contrôle de douane, (il est à noter que ce contrôle peut ne pas être réalisé. Les douaniers procèdent généralement par sondages),
- accès à un hall public.

Pour un passagers en correspondance :

**Régime Schengen**

À l'arrivée :

- accès à l'aérogare depuis l'avion.

Au départ :

- contrôle de sûreté des passagers et des bagages de cabine,
- accès en zone d'embarquement,
- contrôle de la carte d'embarquement,
- embarquement,
- accès à l'avion.

**Régime international**

À l'arrivée :

- accès à l'aérogare depuis l'avion,
- contrôle de santé éventuellement,
- contrôle transfrontière (immigration),

Au départ :

- contrôle de sûreté des passagers et des bagages de cabine,
- accès en zone d'embarquement,
- contrôle transfrontière (immigration),
- contrôle de la carte d'embarquement,
- embarquement,
- accès à l'avion.

### 2.2.3.2. Description des flux des bagages de soute

Les bagages de soutes, eux aussi subissent un traitement particulier.

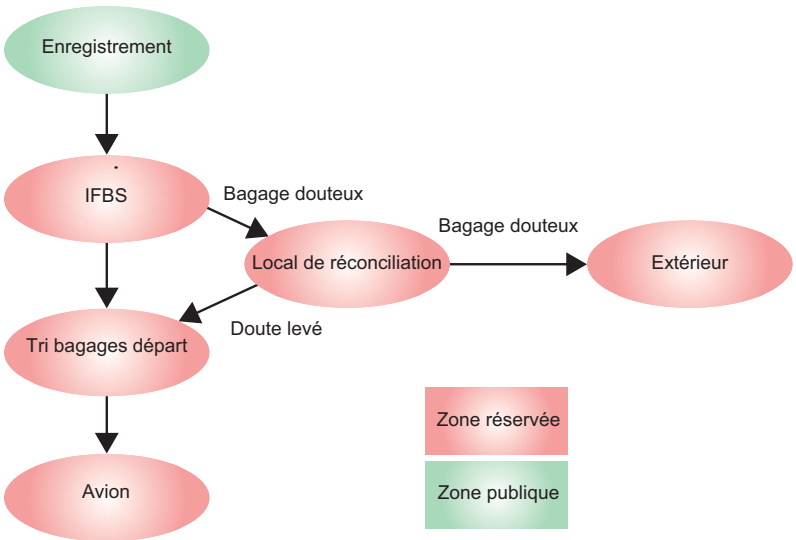
**Traitement des bagages de soute au départ :**

Les bagages de soute sont pris en charge par la compagnie aérienne ou par son assistant au moment de l'enregistrement.

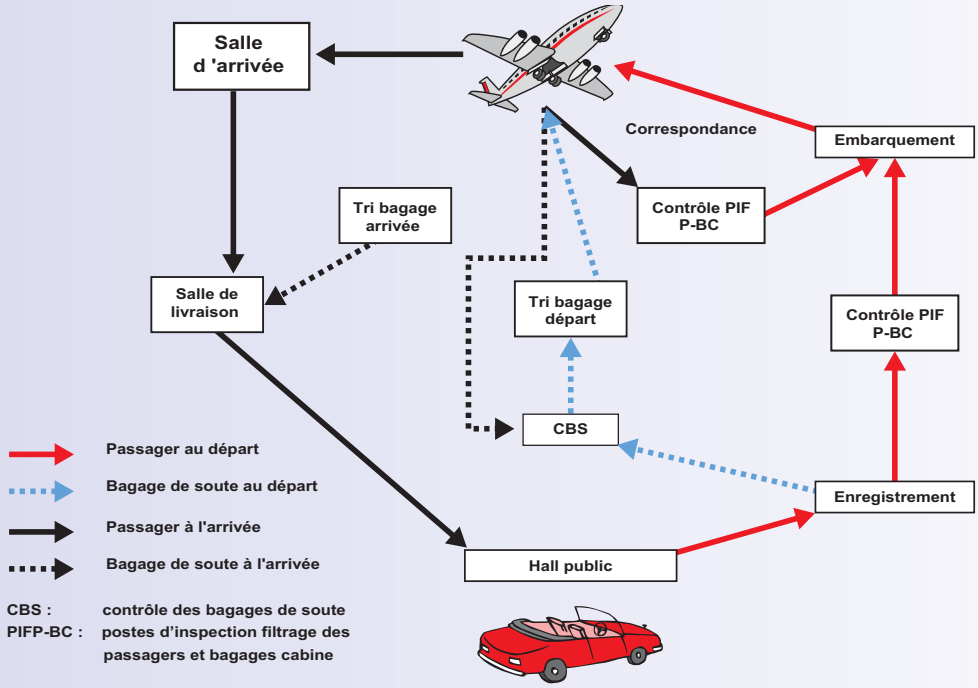
Après cette prise en charge, ils subissent un contrôle de sûreté (mise en place du contrôle à 100 % des bagages de soute). Si le contrôle de sûreté ne détecte rien, ils sont acheminés vers la zone de tri départ puis mis en soute dans l'avion par les manutentionnaires. Si le bagage est déclaré douteux, il est acheminé vers un local de réconciliation sans intervention de manutentionnaire où le propriétaire du bagage aura été conduit pour lever le doute. Une fois le doute levé (ouverture du bagage par le propriétaire en présence d'une personne en charge des contrôles de sûreté), le bagage est remis dans le circuit départ. Si le doute ne peut être levé, des procédures particulières faisant intervenir le service du déminage sont mises en œuvre.

**Traitement des bagages de soute à l'arrivée :**

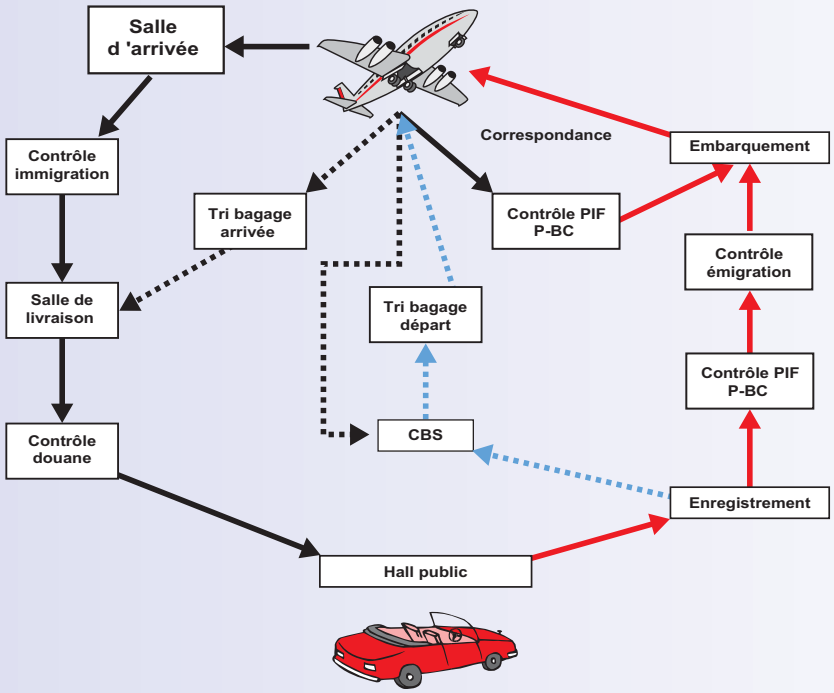
Les bagages de soute à l'arrivée sont déchargés de l'avion, acheminés vers la zone de tri bagage arrivée. De là, ils sont acheminés par des convoyeurs mécaniques vers la salle de livraison bagages où les passagers les récupèrent. Le traitement et la mise à disposition des bagages hors format sont réalisés par des moyens identiques, sur un tapis spécifique réservé.



Les schémas ci-après décrivent une organisation des circuits usitée en France




*Circuit départ et arrivée national*




*Circuit départ et arrivée international*

Remarques :

- Les circuits passagers précités sont des circuits pour des passagers « classiques ». Une aérogare doit aussi pouvoir permettre le traitement dans de bonnes conditions de passagers dit spéciaux comme :
  - les mineurs non accompagnés,
  - les personnes dites appareillées ou les personnes à mobilité réduite (cela pose des problèmes au niveau de l'inspection filtrage pour le contrôle de sûreté),
  - les VIP.

En règle générale, ces passagers représentent un très faible pourcentage des passagers totaux et ne sont généralement pas considérés comme capacitifs.

- De même pour les bagages de soute, les bagages dits hors format sont rarement le facteur limitant la capacité horaire.

## 2.2.4. Mode de fonctionnement

Comme indiqué ci-avant, une aérogare doit permettre de gérer des flux. La capacité d'une aérogare va donc dépendre de son aptitude à gérer les flux passagers et bagages de soute principalement.

La capacité dépend donc non seulement des ressources allouées (surfaces, nombre d'équipements), mais aussi de :

- l'agencement de ces ressources entre elles,
- leur potentiel à évoluer en fonction des besoins (modularité et flexibilité) ; les besoins peuvent évoluer sur de courtes périodes.

## 2.2.5. Analyse des facteurs de premier ordre

La première ligne du diagramme du paragraphe 2.2. fait apparaître les trois facteurs qui influent directement sur le niveau de qualité de service et sur le mode de fonctionnement de l'aérogare :

C'est sur ces facteurs que l'exploitant de l'aérogare pourra le plus facilement agir (notamment sur les infrastructures et les procédures). De plus, ces facteurs interagissent entre eux.

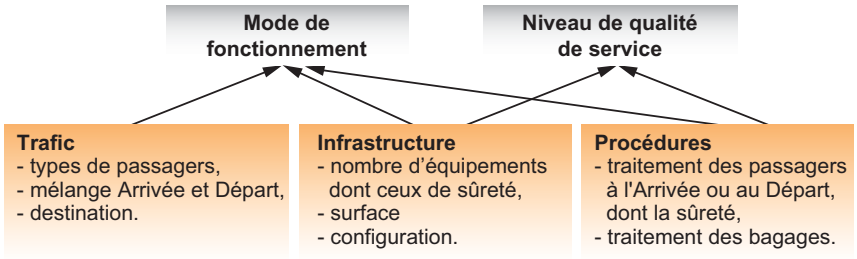
### 2.2.5.1. Procédures

Les circuits décrits au paragraphe 2.2.3 représentent l'ordre des procédures généralement mis en œuvre dans une aérogare.

Ces ordres permettent de minimiser les surfaces, le nombre d'équipements, et avoir une certaine souplesse d'exploitation.

Pour un exploitant d'aérogare, il est intéressant que les contrôles d'identité au départ aient lieu après le contrôle de sûreté. Cela rend possible une mutualisation des postes d'inspection filtrage. De plus, si les 2 zones de contrôle sont relativement proches, il est possible de diminuer la zone d'attente du contrôle transfrontière à condition que le débit de ce filtre soit supérieur à celui de l'inspection filtrage.

De même, positionner le contrôle transfrontière arrivée avant les salles de livraison des bagages de soutes permet une plus grande souplesse d'exploitation de cette salle. Avec l'accord des services de douanes, il est même possible d'utiliser cette salle en simultané pour un vol national et un vol international.



Certaines procédures réglementaires à mettre en œuvre ponctuellement (comme vigipirate ou vigipirate renforcé) peuvent avoir une influence sur la capacité d'une aérogare généralement en la diminuant.

### 2.2.5.2. Trafic

Les différents éléments descriptifs du trafic qui influencent le mode de fonctionnement d'une aérogare sont :

- typologie de passagers : haute contribution, afinitaire (passagers voyageant pour des raisons personnelles), groupe (tour opérateur),
- typologie des vols : régulier, charter, bas coût,
- origine - destination (national - international),
- répartition arrivée - départ - correspondance,
- présentation dans l'aérogare (départ).

Les deux premiers facteurs sont souvent liés ainsi qu'au prix du billet. Les compagnies aériennes souhaitent en règle générale que les passagers ayant la plus haute contribution disposent du meilleur service possible, en l'occurrence des temps d'attente et de traitement faibles et un maximum de place. Donc une aérogare traitant des vols à faible contribution (charter, bas coût, passagers afinitaire etc.) aura une capacité horaire plus importante que celle traitant des vols avec des passagers haute contribution.

De plus, les stratégies de traitement d'un passager varient en fonction du type de vol. Sur des vols charter ou bas coût, la compagnie aérienne demande aux passagers départ de se présenter tôt (la clôture de l'enregistrement a lieu bien avant le départ de l'avion, et les passagers sont incités à se rendre tôt dans les salles d'embarquement). Cela permet d'étaler la présentation des passagers au niveau des filtres.

Pour l'origine ou la destination, les passagers sur des vols internationaux sont globalement plus consommateurs de surfaces et d'équipement car :

- il y a plus de contrôles à réaliser,
- les compagnies clôturent l'enregistrement plus tôt sur des vols internationaux que sur des vols nationaux. Les passagers passent donc plus de temps dans l'aérogare.

La présentation des passagers au départ joue un rôle important dans le calcul de la capacité d'une aérogare. Si les passagers se présentent majoritairement peu de temps avant l'heure limite d'enregistrement (ce qui est souvent le cas pour des vols avec principalement des passagers dits affaire), le nombre d'équipement à mettre en œuvre pour maintenir la qualité de service constante augmente.

### 2.2.5.3. Infrastructures

Les modules suivants de l'infrastructure conditionnent la capacité d'une aérogare :

Procédure départ :

- hall public,
- enregistrement,
- contrôle sûreté du passager et de ses bagages de cabine,
- contrôle émigration,
- salle d'embarquement,
- porte d'embarquement,
- contrôle sûreté des bagages de soute,
- tri des bagages de soute.

Procédure arrivée :

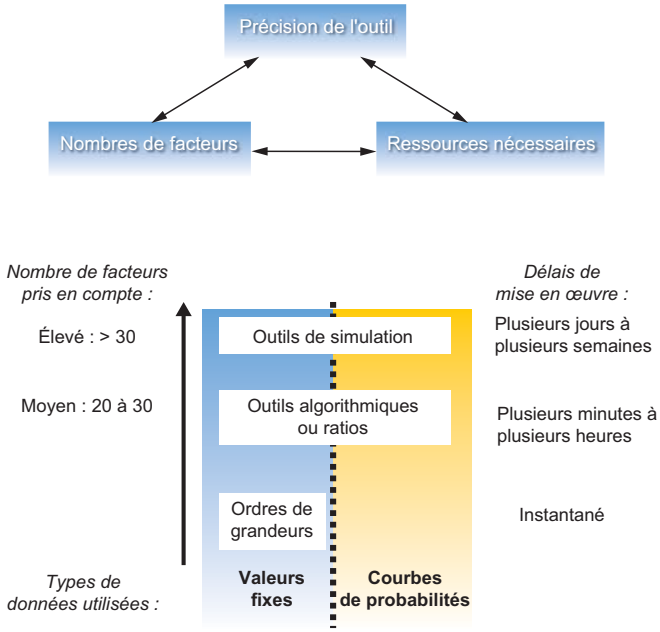
- contrôle immigration,
- livraison des bagages de soute,
- contrôle douanier,
- hall public arrivée,
- tri des bagages de soute.

Pour ces différents modules, ce sont leur surface (surface utilisable pour leur fonction), leur nombre d'équipements ou de linéaires d'équipement, leur forme ainsi que leur positionnement et agencement les uns par rapport aux autres (parti architectural choisi lors de la conception) et la qualité des circulations entre eux, qui déterminent leur capacité et celle de l'aérogare.

# 3. Méthodes d'évaluation rapide de la capacité

Photographie GRAPHIX IMAGES / V. PAUL

*Aéroport de Nice-Côte-d'Azur - aire de manœuvre et terminal 2*




▼

L'évaluation de la capacité nécessite d'utiliser des « outils », logiciels ou méthodes, qui décrivent la réalité en prenant en compte un ensemble des facteurs identifiables dans la réalité. Plus le nombre de facteurs est grand, et plus l'analyse est précise. L'outil utilisé nécessite en revanche une technicité plus importante et un temps de mise en œuvre plus grand.

Un compromis entre la précision de l'outil, le temps de mise en œuvre et le nombre de facteurs pris en compte doit être trouvé et choisi.

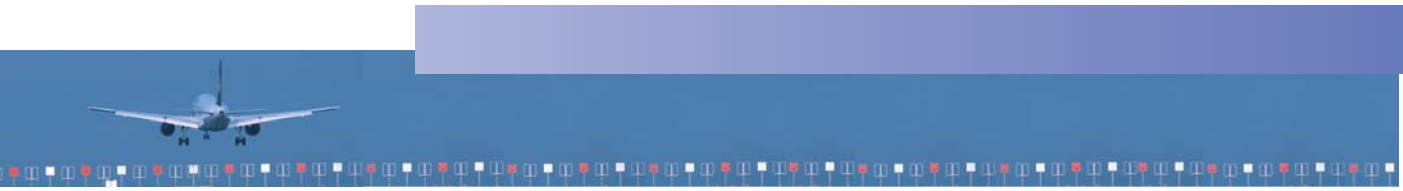
Dans cette partie, les méthodes proposées permettent d'évaluer la capacité horaire (pour évaluer la capacité annuelle se référer à l'une des méthodes décrites en 4. *De la capacité horaire à la capacité annuelle)*.

Les méthodes proposées concernent, dans un premier temps, celles utilisables côté piste, et dans un deuxième temps, celles utilisées pour l'évaluation de la capacité horaire technique dans les aérogares.

Les différents types de méthodes proposées dans ce manuel dépendent du niveau de détails de l'étude. Ils sont présentés dans le schéma ci-contre en fonction du nombre de facteurs pris en compte, du délai de mise en œuvre et de la nature des variables utilisées.

Lorsque le nombre de paramètres est d'un ou deux, la méthode des ordres de grandeurs est appliquée. Pour un nombre un peu plus élevé de paramètres, côté pistes est présentée la méthode algorithmique pour les aérogares, la méthode des ratios. Le nombre de paramètres peut alors être élevé ou non. Pour un nombre élevé de paramètres, est présenté pour le côté piste et les aérogares, le principe des outils de simulation.

A noter ici que la méthode des ordres de grandeur n'utilisent que des variables dont la valeur est fixe. En revanche, dans les outils algorithmiques et de simulation, les valeurs des variables peuvent être fixes ou bien être déduites d'une courbe de probabilités. Cette dernière permet une meilleure précision car elle prend en compte la variabilité d'un facteur mais demande davantage de ressources nécessaires à la détermination mathématique de cette courbe à partir d'observations.



# 3.1. Côté piste

Cette partie présente trois niveaux de détail pour l'évaluation de la capacité horaire :

- le premier niveau propose une évaluation donnant des ordres de grandeurs de capacité horaire déclarée. Il est issu d'observations,
- le deuxième niveau consiste à utiliser des outils d'analyse qui évaluent la capacité horaire technique.

## 3.1.1. Ordres de grandeurs ou ratio

### 3.1.1.1. Pour le système de piste(s)

Les capacités présentées, issues d'observations sur des aéroports existants, concernent essentiellement les capacités horaires déclarées. À certains moments de la journée, dans certaines conditions météorologiques et de trafic, la capacité horaire technique peut être supérieure.

Les exemples de capacité déclarée sont extraits du rapport annuel de 1998 (dernière version disponible) de l'European Database of Major Airports in the ECAC States édité par Eurocontrol

Les variations de capacité pour un même système de pistes sont dues à l'influence des paramètres qui diffèrent selon les aéroports et qui ont été décrits à la partie 2.

La capacité des configurations avec un nombre de pistes supérieur à 2 s'évalue en additionnant les capacités des systèmes plus simples comportant une à deux pistes.

### 3.1.1.2. Pour les aires de stationnement

Le but des méthodes présentées dans les paragraphes qui suivent est d'évaluer le nombre de postes de stationnement en fonction de leurs caractéristiques : au contact, au large et/ou par type d'avions (gros porteurs…) et/ou par faisceau (hub, métropole…).

| Configuration | Mvts/heure par beau temps |
|---|---|
| Piste unique sans taxiway parallèle complet | 10-20 |
| Piste unique avec taxiway parallèle complet | 35-50 |
| Deux pistes parallèles rapprochées | 80-90 |
| Deux pistes parallèles indépendantes | 100 |

#### 3.1.3.3.1. Méthodes utilisées

##### 3.1.3.3.1.1. Calcul sur une feuille de mouvements

À partir d'une journée de trafic planifié, la méthode consiste à affecter les vols sur des postes théoriques en fonction des catégories d'avions et des compagnies aériennes. En cas de conflit, la priorité est donnée à un avion dont le ratio

$$\text{Poids vol} = \frac{\text{Nombre de passagers}}{\text{temps de rotation + temps de vol}}$$

est le plus élevé, sachant que le temps de vol maximum est de 3 heures.

Cette méthode est très fiable mais difficile à utiliser dans le cadre de la planification à long terme, car elle nécessite un trafic complètement planifié.

On cherche un taux de postes au contact pour un taux d'avions au contact.

On trace 2 courbes qui serviront à donner le résultat, en mouvements ou en nombre de passagers.

Courbe 1

- Axe des X : % de postes
- Axe des Y : % de mouvements traités

Courbe 2

- Axe des X : % de postes
- Axe des Y : % de passagers traités

Pour un aéroport donné, les postes sont d'abord classés par ordre décroissant de rendement.

##### 3.1.3.3.1.2. Méthode des ratios globaux

La méthode consiste à utiliser des rendements moyens en passagers ou en mouvements pour déduire le nombre de postes nécessaire pour traiter le trafic prévu sur l'année.

Utilisation du rendement moyen d'un poste (en mouvements)

Cette formule est donnée par l'ITAC (Instruction Technique des Aérodromes Civils). En fonction du trafic prévu, on peut déduire de la formule suivante le nombre N de postes nécessaires pour l'aéroport :

$$N = \frac{\text{Nombre de mouvements annuels}}{\text{rendement moyen}}$$

Le rendement moyen retenu dans l'ITAC est de 2000 mouvements/an pour un poste.

#### Utilisation de ratios par passagers (méthode ADP)

Aéroports de Paris a développé une méthode similaire pour définir le nombre de postes par trafic (trafic régional, moyen courrier international, long courrier) mais avec un rendement de poste par passagers (et non par mouvements comme dans la méthode précédente).

#### 3.1.3.3.1.3. Méthode de l'heure de pointe

Cette méthode repose sur le principe que le nombre de postes peut être défini à partir d'une heure de pointe représentative du trafic. Il en existe 4 variantes : voir tableau ci-dessous

L'avantage de la méthode de Horonjeff sur la méthode des ratios est qu'elle propose des paramétrages (mais qu'il faudra déterminer avec précision) qui sont :

- Tps = temps moyen d'utilisation du poste
- U : coefficient d'utilisation (reflète le rendement opérationnel du poste, c'est-à-dire la stratégie d'affectation des postes) : 0,70 < U < 0,85 ; 0,7 reflète une utilisation d'avions opérant des vols longs courriers, et 0,85 celle d'avions opérant des vols moyens courrier

Ces paramétrages permettent de faire évoluer les caractéristiques des postes dans le temps. Ainsi peut-être prise en compte l'évolution de la flotte utilisée (proportions d'avions de type moyen courrier et d'avions de type long courrier). Les autres formules, issues d'une analyse statistique, peuvent être considérées comme plus statiques.

En général les temps d'occupation des postes dépendent de la taille de l'avion et de la nature du service. Les temps les plus courts sont obtenus dans le cas d'un hub. Ainsi les temps sont en général de :

- 30 à 45 minutes pour un avion de faible tonnage (ATR42, Emb),
- 45 à 90 minutes pour un avion de moyen tonnage (A320, B737),
- 90 à 120 minutes pour un avion de gros tonnage (B747).

Des temps plus courts peuvent être observés pour le traitement des avions assurant un fonctionnement de style navette. Les temps d'occupation d'un poste peuvent ainsi descendre jusqu'à 30 minutes pour un A320.

Il est à noter toutefois que la formule utilise la valeur « Max Arr-Dep de la 40e heure », l'hypothèse étant que le maximum d'avions présents est atteint en même temps que le maximum de mouvements. D'après une étude ENAC [16], ce n'est pas toujours le cas : c'est par exemple vrai à Paris et faux à Toulouse. À Toulouse, la pointe de stationnement se situe entre 11 h 30 et 13 h 30, elle correspond aux avions arrivés dans la matinée et repartant l'après-midi (début d'une autre heure de pointe), alors qu'à Paris, les rotations sont plus rapides.

L'évaluation du temps moyen d'utilisation du poste Tps se fait de la façon suivante. On peut associer Tps à la structure du trafic (types d'avions). On calcule alors le temps d'occupation pour chaque type, puis on calcule la moyenne :

$$Tps = (Tps_{\ 2}cat_{\ 2}) \times (\%\ vols\ cat_{\ 2}) + \ldots + (Tps_{\ i}cat_{\ i}) \times (\%\ vols\ cat_{\ i}) + \ldots$$

avec $Tps_{\ i}cat_{\ i}$ : temps moyen d'utilisation du poste des avions de catégorie i

$\%\ vols\ cat_{\ i}$ : % des avions de catégorie i

Par ailleurs, l'évaluation du coefficient d'utilisation U se fait pour un trafic observé : U = Nombre d'avions (Max Arr-Dep de la 40e heure) x Tps/nombre de postes actifs observés.

*16 méthode d'évaluation des besoins en postes de stationnement. Application à Toulouse-Blagnac, mémoire de fin d'études du mastère spécialisé en management aéroportuaire présenté par J Petitjean, septembre 1998.*

| | Trafic de pointe |
|---|---|
| ratio formule n° 1 : N = 1,6 x Traf $^{40^e\ heure}_{Max\ (Arr,\ Dép)}$ | Maximum d'arrivées ou de départs du trafic de 40e heure |
| ratio formule n° 2 : N = 1,6 x Traf $^{40^e\ heure}_{Total\ (Arr,\ Dép)}$ | Le trafic total arrivées + départs de la 40e heure |
| formule ADP : N = 1,2 x Traf $^{40^e\ heure}_{Total\ (Arr,\ Dép)}$ | Le trafic total arrivées + départs de la 40e heure |
| formule Horonjeff : $N = \frac{Traf\ ^{40^e\ heure}_{Max\ (Arr,\ Dép)} \times Tps}{U}$ | Maximum d'arrivées ou de départs du trafic de 40e heure |

## 3.1.2. Outils

### 3.1.2.1. Principaux types

Deux principaux types d'outils existent pour évaluer la capacité horaire : les outils algorithmiques ou analytiques, et les outils de simulation en temps accéléré.

Prenant en compte un nombre plus élevé de paramètres, ils permettent d'estimer plus finement la capacité horaire. Les résultats sont plus proches de la réalité.

### 3.1.2.2. Outil analytique ou algorithmique : l'exemple de MACAO pour le système de piste(s)

#### 3.1.2.2.1. Principe de calcul

Dans ce type d'outils, le nombre de paramètres pris en compte est en général compris entre 20 et 30. Les valeurs des paramètres sont fixes pour deux raisons :

- la nature matricielle du calcul nécessite des valeurs fixes. Il est possible d'utiliser des courbes de probabilités pour décrire un paramètre dans un calcul matriciel, mais la méthode de calcul est plus lourde à mettre en œuvre, même sur support informatique,

- la description d'un paramètre par une courbe de probabilités nécessite un grand nombre de mesures. Appliquée à chaque paramètre, cette phase d'analyse prend beaucoup de temps.

Le principe de calcul consiste à prendre en compte les données d'entrée descriptives de l'infrastructure, du trafic, des procédures et des performances des avions présents sur la plate-forme. Ces données sont ensuite réparties sous forme de matrices prenant en compte les types d'avions.

La combinaison matricielle permet d'évaluer les temps de séparation entre avions pour chaque type de séquences (arrivée-arrivée, arrivée-départ, départ-arrivée, départ-départ). Ces temps de l'ordre de quelques dizaines de secondes à quelques minutes déterminent donc une fréquence d'occurrence de mouvements dans le système de pistes considéré. Cette fréquence permet d'en déduire le nombre de mouvements qui peuvent être traités pendant une heure.

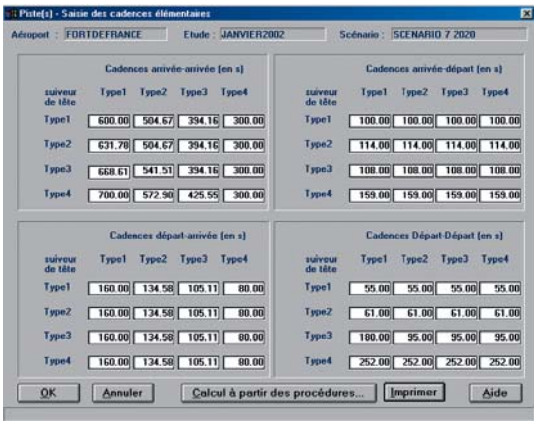



*Tableau des cadences élémentaires estimées par le logiciel MACAO*

#### 3.1.2.2.2. Estimation de la capacité théorique

Le STBA dispose d'un logiciel d'évaluation de la capacité horaire théorique d'une piste et d'un doublet de pistes parallèles ou sécantes, actuellement appelé MACAO. Les paragraphes qui suivent s'inspirent de son fonctionnement. Ce logiciel nécessite en entrée des données descriptives du système de piste(s) et de son fonctionnement et correspond aux :

- données de trafic : proportion de 4 catégories d'avions par rapport au volume total de trafic,

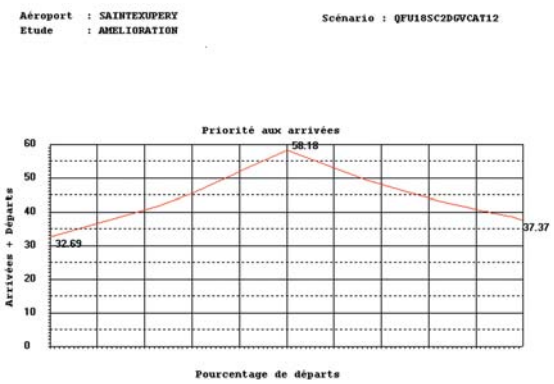
- données « réglementaires » de circulation aérienne : espacements minimaux dus à la turbulence de sillage, longueur de la trajectoire d'approche finale, espacement minimal radar, 'verrou' de piste, limite d'autorisation d'atterrir,

- données relatives à l'utilisation des pistes par les 4 catégories d'avions : vitesses d'approche, temps d'occupation de piste à l'arrivée et au départ, temps de stabilisation à l'arrivée, temps de traversée de piste, nombre de points de traversée de piste, temps d'occupation partielle de piste à l'arrivée pour les systèmes de pistes parallèles dépendantes.

L'ensemble de ces données permettent d'estimer l'intervalle de temps (aussi appelé cadences élémentaires) entre chaque avion de chaque catégorie pour les séquences élémentaires suivantes :

AA : un atterrissage est suivi d'un atterrissage,

DD : un décollage est suivi d'un décollage,




*Courbe de capacité théorique obtenue avec MACAO*

AD : un atterrissage est suivi d'un décollage,

DA : un décollage est suivi d'un atterrissage.

Ces cadences élémentaires sont évaluées entre chaque catégorie d'avions.

Les quatre catégories d'avions sont définies par l'utilisateur[18]. À titre d'exemple, dans certaines études les catégories retenues étaient :

- catégorie 1 : avions dont la masse est inférieure à 7 tonnes,
- catégorie 2 : avions dont la masse est comprise entre 7 et 40 tonnes,
- catégorie 3 : avions dont la masse est comprise entre 40 et 136 tonnes,
- catégorie 4 : avions dont la masse est supérieure à 136 tonnes.

Dans d'autres études, les catégories étaient les suivantes :

- catégorie 1 : avions turbo-propulsés dont la masse est comprise entre 7 et 40 tonnes,
- catégorie 2 : avions jet régionaux dont la masse est comprise entre 7 et 40 tonnes,
- catégorie 3 : avions dont la masse est comprise entre 40 et 136 tonnes,
- catégorie 4 : avions dont la masse est supérieure à 136 tonnes.

Il est possible de choisir des catégories différentes d'avions en fonction de l'étude car le logiciel ne fige pas les paramètres d'entrée. Ils doivent être entrés par l'utilisateur. Ce choix a été fait afin d'offrir une plus grande souplesse d'utilisation.

Les intervalles de temps entre les avions de chaque catégorie pour chaque séquence élémentaire permettent de déduire le flux d'avion sur une heure.

Le logiciel trace la courbe de capacité technique théorique en fonction du pourcentage d'arrivées et de départs pour une structure de trafic (pourcentage des catégories d'avions) et pour une stratégie de gestion (priorité aux départs ou priorité aux arrivées).

Il peut aussi tracer le nombre de mouvements en fonction des nombres de départs (en abscisse) et d'arrivées (en ordonnées).

Ainsi, les répartitions des quatre catégories d'avion permettent d'obtenir les trois capacités techniques théoriques particulières :

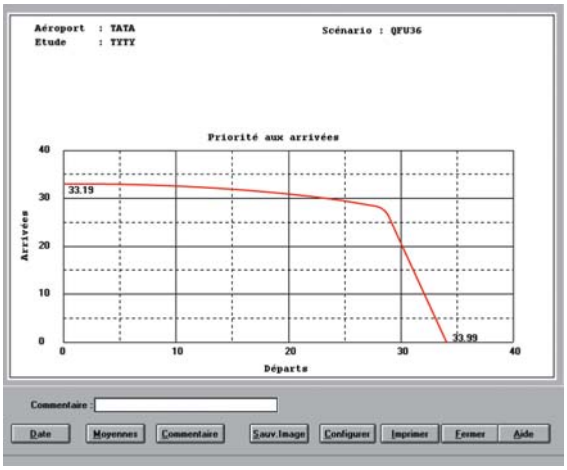
- $CT_A$ : capacité technique théorique pour des séquences AA,
- $CT_D$ : capacité technique théorique pour des séquences DD,
- $CT_{A+D}$ : capacité technique théorique pour des séquences AD + DA (lorsque l'enchaînement des avions alterne atterrissage et décollage).

À partir de ces capacités techniques théoriques, sont ensuite déduites les capacités opérationnelles pour les mêmes séquences.

#### 3.1.2.2.3. Estimation de la capacité opérationnelle

La méthode algorithmique permet donc de prendre en compte les principaux facteurs qui entrent dans le calcul de la capacité horaire. La nature matricielle du calcul nécessite des valeurs fixes. Certaines sont obtenues en moyennant des observations telles que les temps d'occupation de piste, les vitesses d'approche, les temps de croisement. D'autres sont théoriquement fixes par natures telles que les espacements radar, les séparations entre avions en raison des turbulences de sillage, la longueur d'approche finale, la limite d'autorisation d'atterrir et le verrou.

[17] *les évolutions futures du logiciel permettront à l'utilisateur de choisir parmi 5 catégories d'avions.*




*Courbe de capacité technique théorique obtenue avec MACAO*

Les capacités techniques théoriques sont estimées à partir des cadences élémentaires, elles-mêmes évaluées dans une situation optimale (les avions sortent à la sortie optimale, les vitesses sont les mêmes pour tous les avions d'une même catégorie…). Or, en réalité, à chaque instant il existe des variations des valeurs des paramètres d'entrée retenus. La capacité représente un flux d'avions mais la valeur de ce flux varie en fonction des éléments qui le composent.

Les capacités techniques opérationnelles (CO), prenant en compte la variabilité des paramètres, sont évaluées à partir des capacités techniques théoriques auxquelles sont appliquées les coefficients opérationnels.

On en déduit les trois composantes de CO :

- $CO_A = CT_A \times Coef_A$
- $CO_D = CT_D \times Coef_D$
- $CO_{A+D} = CT_{A+D} \times Coef_{A+D}$

Trois coefficients opérationnels, $Coef_A$, $Coef_D$, $Coef_{A+D}$, sont alors estimés pour les trois séquences AA, DD, AD + DA. La mesure des coefficients permet donc de prendre en compte la variabilité observable dans la réalité.

L'outil utilisé reste souple et nécessite donc de prendre en compte a posteriori des corrections reflétant la réalité opérationnelle.

Parmi les principaux facteurs influençant le niveau des coefficients opérationnels, sont identifiables :

- les séparations entre avions,
- le comportement différent des pilotes.

Dans les modèles, les séparations entre avions sont théoriques. En réalité, les facteurs suivants ont une influence sur elles :

**Infrastructures :**

- le nombre de **sorties** et leur distribution spatiale permettent d'avoir ou non la certitude de faire quitter la piste rapidement à tous les types d'avions, quelles que soient leur masse, leur vitesse, les conditions météorologiques,… (niveau de prévisibilité du fonctionnement pour les arrivées),
- le niveau de fluidité de la circulation sur les **voies de circulation**,
- l'existence d'une **voie de circulation** centrale entre 2 pistes. Dans le cas d'un doublet standard, elle permet d'optimiser la traversée de piste pour plusieurs avions.

**Type de trafic :**

- Le niveau de fonctionnement en hub par rapport au trafic classique. À partir d'un pourcentage de fonctionnement en hub, les infrastructures facilitent ou non la circulation au sol, surtout à la période correspondant à la fin de la vague d'arrivées et au début de la vague de départs.

**Procédures :**

- La complexité des procédures oblige à prendre des marges de sécurité. Une procédure complexe ne permet pas de prédire exactement les séparations en sortie de la trajectoire, en fonction du vent, de la masse de l'aéronef, du pilotage, du type d'avion, etc.

Le comportement différent des pilotes est un facteur en soi, mais il influence les paramètres précédents à travers les paramètres suivants :

- temps de réaction des pilotes à une clairance,
- vitesses d'approche et de décollage différentes,
- distances de freinage différentes,
- points de toucher des roues différents.

Ces paramètres opérationnels tendent à augmenter l'intervalle de temps entre les avions, et donc diminuent la capacité théorique.

Les trois valeurs $Coef_A$, $Coef_D$, $Coef_{A+D}$ sont en général déterminés par la Division circulation aérienne de l'aéroport de la manière suivante :

- calcul de $CT_A$, $CT_D$ et $CT_{A+D}$ pour la situation observée à l'aide de l'outil MACAO ou d'un outil équivalent,
- mesure des débits de trafic admissibles $D_A$, $D_D$ et $D_{A+D}$. Sur un aéroport, il n'y a jamais 60

minutes successives, c'est-à-dire une heure complète, comportant un flux uniquement d'arrivées, ni uniquement de départs, ni de séquences enchaînant successivement une arrivée et un départ. Les débits de trafic $D_A$, $D_D$ et $D_{A+D}$ sont des débits horaires moyens calculés à partir de flux observés lors de périodes de quelques minutes respectivement d'arrivées, de départs et de mélange arrivées-départs. En effet, au cours d'une journée, il existe bien des périodes de durée différente durant lesquelles il y a un flux uniquement d'arrivées, ou uniquement de départs, ou de séquences enchaînant successivement une arrivée et un départ,

- $Coef_A = D_A/CT_A$; $Coef_D = D_D/CT_D$, Coef A + D = DA + D/CTA + D

La capacité opérationnelle est ensuite estimée pour chaque heure d'une journée de trafic. Cette dernière doit être représentative du trafic de l'aéroport. Ce choix est fait localement ou construit à partir des prévisions de trafic. Les données de trafic fournissent, pour chaque heure de la journée, la proportion des catégories d'avions et la proportion de séquences AA, DD, AD + DA, notées respectivement $x_{AA}$, $x_{DD}$, $X_{A+D}$.

Pour chaque heure de la journée, la capacité technique opérationnelle est évaluée par la formule suivante :

$$CO = x_{AA}\ CO_A + x_{DD}\ CO_D + X_{A+D}\ CO_{A+D}$$

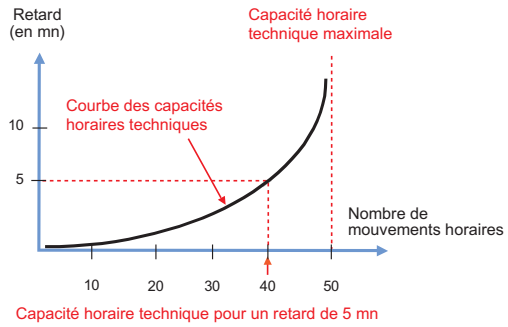
### 3.1.2.3. Outils de simulation

#### 3.1.2.3.1. Principe d'utilisation

Les outils de simulation classiques permettent de créer des objets (avions, passagers, bagages, etc.) qui se meuvent dans les différentes parties de l'aéroport ou de l'espace aérien considérés. En analysant les mouvements et les flux de ces objets à différents endroits de l'infrastructure et en considérant le temps passé par un objet entre deux points, les modèles de simulation permettent de mesurer des quantités (d'avions, de passagers, de bagages…) ou des retards.

Dans la partie 5, les différents outils de simulation utilisés pour les études de capacité sont présentés en détail.

En général, ces outils ne mesurent pas directement la capacité. Elle est déterminée à partir du niveau de retard mesuré pour un volume de trafic injecté dans le modèle. Cette approche est utilisable pour déterminer la capacité horaire technique.



Capacité horaire technique pour un retard de 5 mn

Son utilisation permet d'évaluer, outre la capacité de la piste, la capacité des voies de circulation et de l'aire de stationnement, ainsi que les problèmes potentiels de roulage au sol.

#### 3.1.2.3.2. Processus

Quel que soit l'outil de simulation choisi, le processus à suivre est le suivant :

- entrer les données complètes d'infrastructure,
- entrer les procédures aériennes, de roulage et de traitement des avions dans les différentes zones de l'aéroport (postes de stationnement, dégivrage, aires de circulation),
- entrer une structure de trafic ou une période de trafic. Le trafic peut être généré à partir d'une structure définie sur une période (heure, journée), ou bien il peut être entré vol par vol à partir d'un trafic défini précisément sur une période (pointe de quelques heures ou journée).
- entrer les performances des avions.

#### 3.1.2.3.3. Apports de la simulation pour les aires de stationnement

Pour évaluer les retards induits par le nombre de postes choisi, il faut utiliser un simulateur (du type SIMMOD). L'utilisation d'un simulateur implique la connaissance d'un trafic planifié sur la période de pointe ou sur la journée.

Les retards non locaux sont pris en compte dans le simulateur, il permet de définir une distribution de retards sur un pourcentage des vols.

La modélisation des postes permet de les affecter aux compagnies aériennes ou aux types d'avion, et de gérer dans le temps leur (re) configuration selon les catégories d'avions.

La simulation fournit ensuite des éléments chiffrés sur les temps d'occupation par poste, sur le nombre de mouvements en attente et sur les retards générés localement sur les postes.

### 3.1.3. Procédure actuelle d'une étude

Il existe deux types d'étude de capacité : les études de capacité dans le cadre de la planification de l'évolution d'un aéroport, et les études de capacité permettant de déterminer la capacité de programmation d'un aéroport en vue de la mise en place de sa coordination.

#### 3.1.3.1. Planification

Les objectifs des études de capacité côté piste peuvent être :

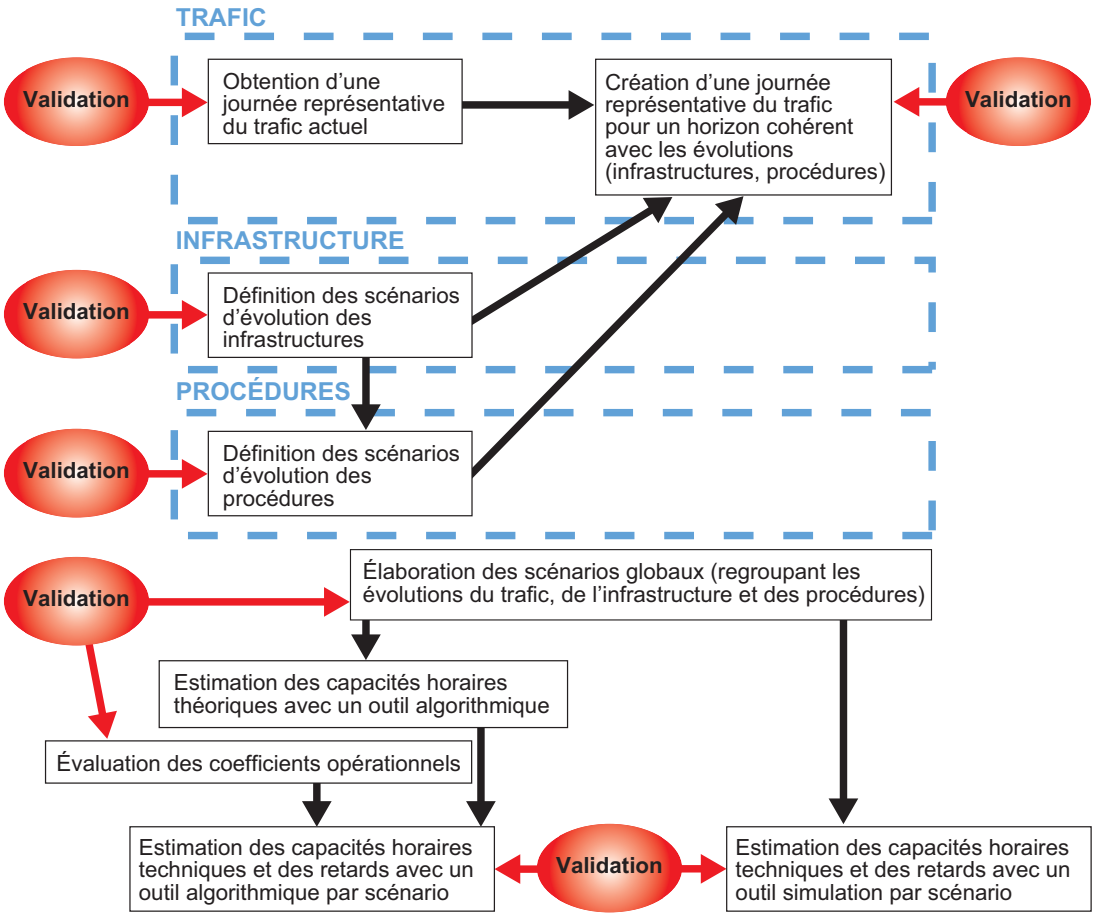
- l'analyse et la comparaison de scénarios d'évolution d'infrastructures, de trafic et/ou de procédures,
- d'établir un phasage de l'évolution.

Les tâches nécessaires sont décrites dans l'organigramme suivant :

Les étapes nécessaires à la réalisation de l'étude sont :

- prise en compte de la demande formulée par le maître d'ouvrage (DRE ou DAST) ou le maître d'œuvre[18] (DDE ou SSBA) de la constitution des documents de planification,
- recueil des données en entrée au travers d'entretiens, d'un formulaire type (cf. annexe 8), de documents existants (prévision de trafic, plan de développement du gestionnaire…), et de mesures (coefficients opérationnels et des temps d'occupation de piste, temps de traitement des avions aux postes de stationnement…),
- élaboration des hypothèses d'entrée en matière de trafic, procédures et infrastructure,

[18] *cf. l'instruction n° 3719/SBA du 17 décembre 1996 : essentiel du dispositif de planification aéroportuaire*



- validation des hypothèses retenues par les services impliqués dans la demande (maître d'ouvrage, maître d'œuvre et autres, tels que la Division circulation aérienne),
- évaluation des capacités techniques,
- validation des résultats par les services impliqués dans la demande (maître d'ouvrage, maître d'œuvre et autres, tels que la Division circulation aérienne).

### 3.1.3.2. Études de coordination

Le règlement européen 95/93 fixe les conditions d'attributions des créneaux horaires des aéroports de l'Union Européenne. Il précise les modalités de mise en application du processus de coordination sur les aéroports saturés. Il est notamment demandé qu'une étude de capacité soit entreprise par une méthode reconnue.

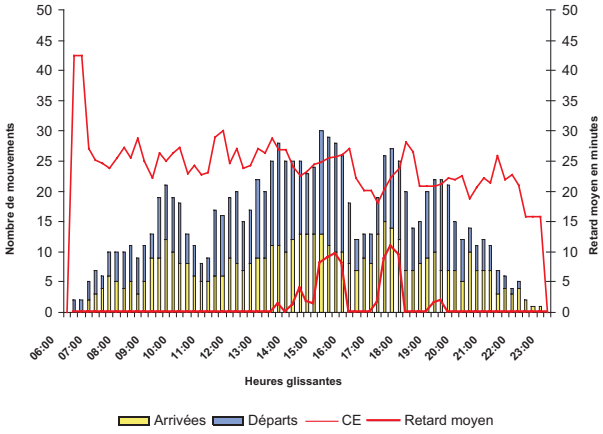
Les études de capacité pour la mise en place d'une coordination ont un processus un peu différent de celui demandé pour les études réalisées dans le cadre de la planification.

En général, le nombre de scénarios d'infrastructure, de procédures et de trafic est moindre dans la mesure où les scénarios retenus sont élaborés à court terme (à un an) et que l'étude de coordination est demandée car l'infrastructure ne peut plus vraiment évoluer. Les améliorations retenues dans les scénarios restent marginales.

### 3.1.3.3. Types de résultats

#### 3.1.3.3.1. Période d'analyse

Les hypothèses de trafic déterminent la structure de trafic, c'est-à-dire la proportion des catégories d'avions et le mélange arrivées-départs. Cette

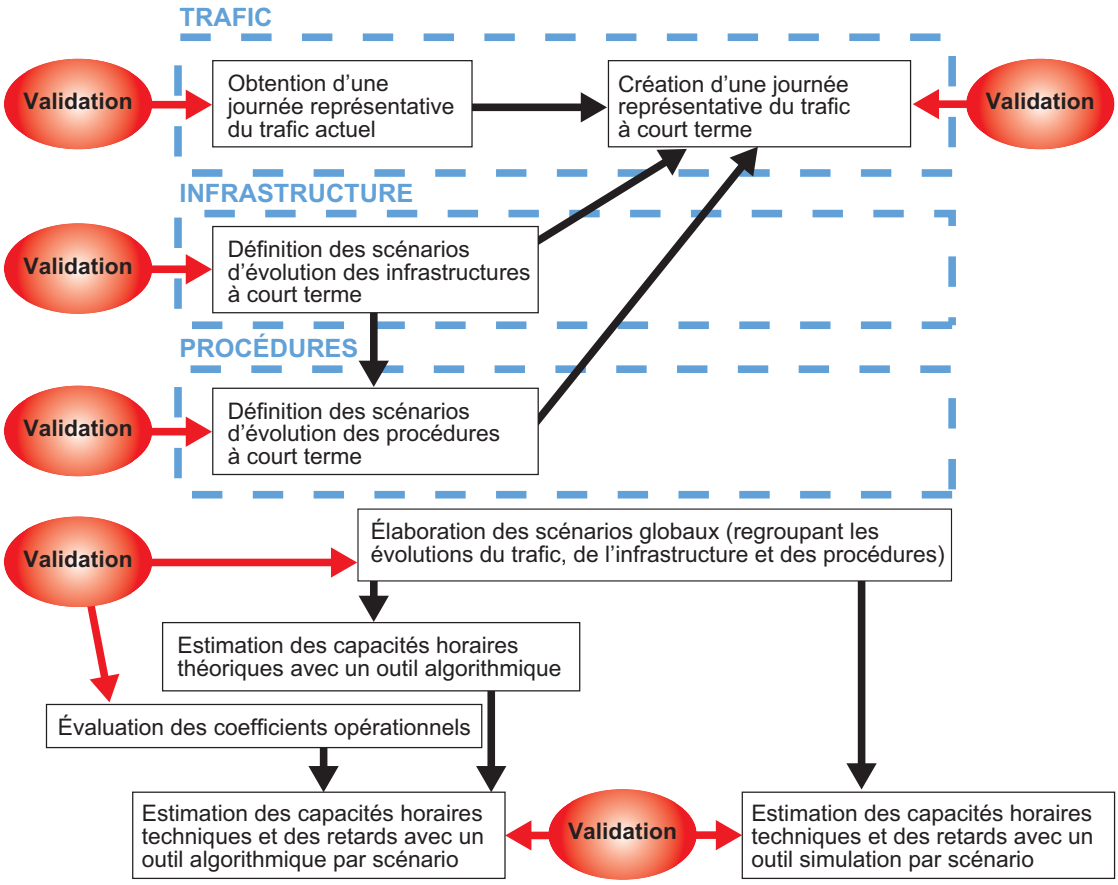



structure est analysée sur n'importe quelle période de temps. Elle peut être une fraction d'heure, une heure, un ensemble d'heures, une journée, une année. Elle doit servir à définir une structure de trafic représentative du trafic de la plate-forme.

#### 3.1.3.3.2. Type de résultat

La méthode algorithmique évalue une capacité technique horaire exprimée en nombre de mouvements d'avions par heure. Elle estime la capacité pour un mélange en arrivées et départs et une proportion de catégories d'avions (cf. courbes de capacité théorique en 3.1.3.2.2.).

Elle peut être appliquée au trafic d'une journée entière. Ainsi, pour chaque heure glissante de la journée, la structure du trafic est analysée (proportion d'arrivées et de départs, proportion de chaque catégorie d'avions) et la capacité horaire technique résultante est estimée.




L'estimation des capacités techniques horaires pour chaque heure glissante d'une journée retenue permet d'obtenir la courbe présentée.

Cette méthode permet de calculer la capacité qu'il faut pour passer le trafic de pointe tout en respectant la structure de trafic sur la journée, et ce afin d'éviter une surestimation de la capacité disponible à des moments où le mélange est défavorable et induit une capacité technique horaire plus basse.

Une estimation des retards peut être effectuée, comme présentée sur la courbe ci-avant, en comparant ces capacités à la demande initiale (trafic). Le retard est davantage considéré ici comme un indicateur de performance plutôt qu'une prévision précise du retard.

## 3.2. Méthodes de calcul de capacité pour une aérogare

Le présent manuel traite de la capacité sur une heure (capacité horaire). Pour des raisons de fonctionnement (présence d'un hub...), il peut être plus pertinent de considérer une unité de temps différente de l'heure (durée d'une plage de hub...). Dans des cas, le principe de calcul de la capacité par les méthodes suivantes reste les mêmes que celles décrites dans le présent manuel.

Au paragraphe 2.2.2.1., il est indiqué que les conditions de circulation des flux de passagers et de leurs bagages entre les différentes formalités dont ils ont à s'acquitter, constitutives de la fonction trafic déterminent la capacité horaire.

En effet, l'aérogare peut être considérée comme une succession de zone de stockage (zone d'attente) et de filtres permettant le passage d'une zone à l'autre (enregistrement, points de contrôles). Le maillon le plus faible de cette chaîne conditionne la capacité de l'ensemble.

Cette partie présente trois méthodes applicables pour calculer les différentes capacités horaires et la capacité annuelle d'une aérogare. ces méthodes reposent sur des principes très différents. Il s'agit de:

- la méthode des ratios,
- la méthode de simulation,
- la méthode analytique comparative.

### 3.2.1. Paramètres à prendre en compte

Au paragraphe 1.3.2., la capacité horaire technique pour une aérogare est explicitée selon les différents paramètres ci-dessous:

#### 3.2.1.1. Calcul de la capacité horaire

##### 3.2.1.1.1. Calcul de la capacité horaire globale

La capacité horaire globale ou Cp dépend des paramètres suivants:

- surface totale hall public,
- surface enregistrement (dont la surface d'attente),
- surface contrôle sûreté (dont la surface d'attente),
- surface contrôle sûreté des bagages de soute,
- surface embarquement (si salles spécialisées, il faut faire un calcul pour chaque type et additionner pour obtenir la capacité totale),
- surface totale livraison bagage (si salles spécialisées, il faut faire un calcul pour chaque type et additionner pour obtenir la capacité totale),
- surface tri bagage départ,
- surface tri bagage arrivée,
- nombre PIF,
- nombre de banques d'enregistrement,
- linéaire de tapis bagage accessible aux passagers en salle de livraison bagage,
- nombre et type d'appareils pour le contrôle sûreté des bagages de soutes.

##### 3.2.1.1.2. Calcul de la capacité horaire arrivée

La capacité horaire arrivée ou Ca dépend des paramètres suivants:

- surface totale hall public ou Surface hall arrivée (si halls spécialisés),
- surface totale livraison bagage (si salles spécialisées, il faut faire un calcul pour chaque type et additionner pour obtenir la capacité totale),
- surface tri bagage arrivée,
- linéaire de tapis bagage accessible aux passagers en salle de livraison bagage.

##### 3.2.1.1.3. Calcul de la capacité horaire arrivée nationale

La capacité horaire arrivée nationale ou $Ca_{nat}$ dépend des paramètres suivants:

- surface hall arrivée (si halls spécialisés),
- surface totale salle livraison bagage ou Surface salle de livraison national (si salles spécialisées),
- surface tri bagage départ.

#### 3.2.1.1.4. Calcul de la capacité horaire arrivée internationale

La capacité horaire arrivée internationale ou $Ca_{international}$ : dépendent des paramètres suivants :

- surface hall arrivée (si halls spécialisés),
- surface contrôle police arrivée (dont la surface d'attente),
- surface contrôle douanes arrivée (dont la surface d'attente),
- surface totale salle livraison bagage ou Surface salle de livraison internationale (si salles spécialisées),
- surface tri bagage arrivée,
- nombre de postes de contrôle identité arrivée,
- nombre de postes de contrôle des douanes.

#### 3.2.1.1.5. Calcul de la capacité horaire départ

La capacité horaire départ ou Cd dépend des paramètres suivants :

- surface totale hall public ou Surface hall départ (si halls spécialisés),
- surface enregistrement (dont la surface d'attente),
- surface contrôle sûreté (dont la surface d'attente),
- surface contrôle sûreté des bagages de soute,
- surface embarquement (si salles spécialisées, il faut faire un calcul pour chaque type et additionner pour obtenir la capacité totale),
- surface tri bagage départ,
- nombre PIF,
- nombre de banques d'enregistrement,
- nombre et type d'appareils pour le contrôle sûreté des bagages de soutes.

#### 3.2.1.1.6. Calcul de la capacité départ horaire international

La capacité horaire départ international ou $Cd_{international}$ dépend des paramètres suivants :

- surface hall départ (si halls spécialisés),
- surface enregistrement (dont la surface d'attente),
- surface contrôle sûreté (dont la surface d'attente),
- surface contrôle sûreté des bagages de soute,
- surface contrôle police départ,
- surface embarquement international,
- surface tri bagage départ,
- nombre PIF,
- nombre de postes de contrôle identité au départ,
- nombre et type d'appareils pour le contrôle sûreté des bagages de soutes.

#### 3.2.1.1.7. Calcul de la capacité horaire départ national

La capacité horaire départ national ou $Cd_{national}$ dépend des paramètres suivants :

- surface hall départ (si halls spécialisés),
- surface enregistrement (dont la surface d'attente),
- surface contrôle sûreté (dont la surface d'attente),
- surface contrôle sûreté des bagages de soute,
- surface contrôle douanes arrivée,
- surface embarquement national,
- surface tri bagage départ,
- nombre PIF,
- nombre et type d'appareils pour le contrôle sûreté des bagages de soutes.

Photothèque STBA/M. CASTERAN

*Aérogare de Tarbes-Ossun-Lourdes - Zone d'attente non matérialisée devant les banques d'enregistrement hors période d'enregistrement*

Photothèque STBA/M. CASTERAN

*Aérogare de Tarbes-Ossun-Lourdes - Zone d'attente non matérialisée devant les banques d'enregistrement pendant un enregistrement*

### 3.2.1.2. Mesure des surfaces

Quelle que soit la méthode utilisée, le calcul des différentes capacités horaires exige une mesure de la surface des différentes zones et un comptage du nombre d'équipements utilisables.

Ce paragraphe a pour but de donner une méthode d'attribution des surfaces aux différentes zones. En effet les différentes zones ne sont pas toujours séparées matériellement (par une cloison par exemple).

La surface du hall public soit départ, soit arrivée comporte la surface accessible au public après avoir retranché les surfaces d'attente devant les divers comptoirs (compagnies aériennes, information, loueurs de voiture et autres), banques d'enregistrement et poste d'inspection filtrage. De plus si la largeur du hall public est inférieure à 2 m, cette surface ne doit pas être prise en compte car elle ne peut servir que d'espace de circulation et pas de zone d'attente.

Par exemple, certaines aérogares manquent de profondeur devant des banques d'enregistrement. Cela génère des zones de conflit avec d'autres zones d'attente ou avec les entrées de l'aérogare.

Les surfaces peuvent être réparties de la sorte pour prétendre offrir des conditions de fonctionnement satisfaisantes (sans créer de perturbation dans les circulations):

Les surfaces servant de circulation (nécessaires au bon fonctionnement de la zone notamment pour celle servant à l'attente à l'enregistrement) dans ce cas-là ne sont pas comptabilisées comme des surfaces appartenant au hall public.

Dans un premier temps et sans approche opérationnelle qui impose une analyse du fonctionnement sur le site, les surfaces d'attente sont calculées en prenant un recul de:

- 2 m au plus devant les comptoirs, commerciaux, (compagnie, tour opérateur, information, autres)
- 15 m au plus devant les banques d'enregistrement,
- 10 m au plus devant les postes d'inspection filtrage, ceux du contrôle police (arrivée et départ) et celui du contrôle douanier

Ces distances de recul peuvent le cas échéant être diminuées si cela génère des conflits entre 2 zones, si cela ne permet pas aux personnes de circuler dans de bonnes conditions ou si du mobilier limite ce recul.

Les schémas ci-après sont donnés à titre explicatif:

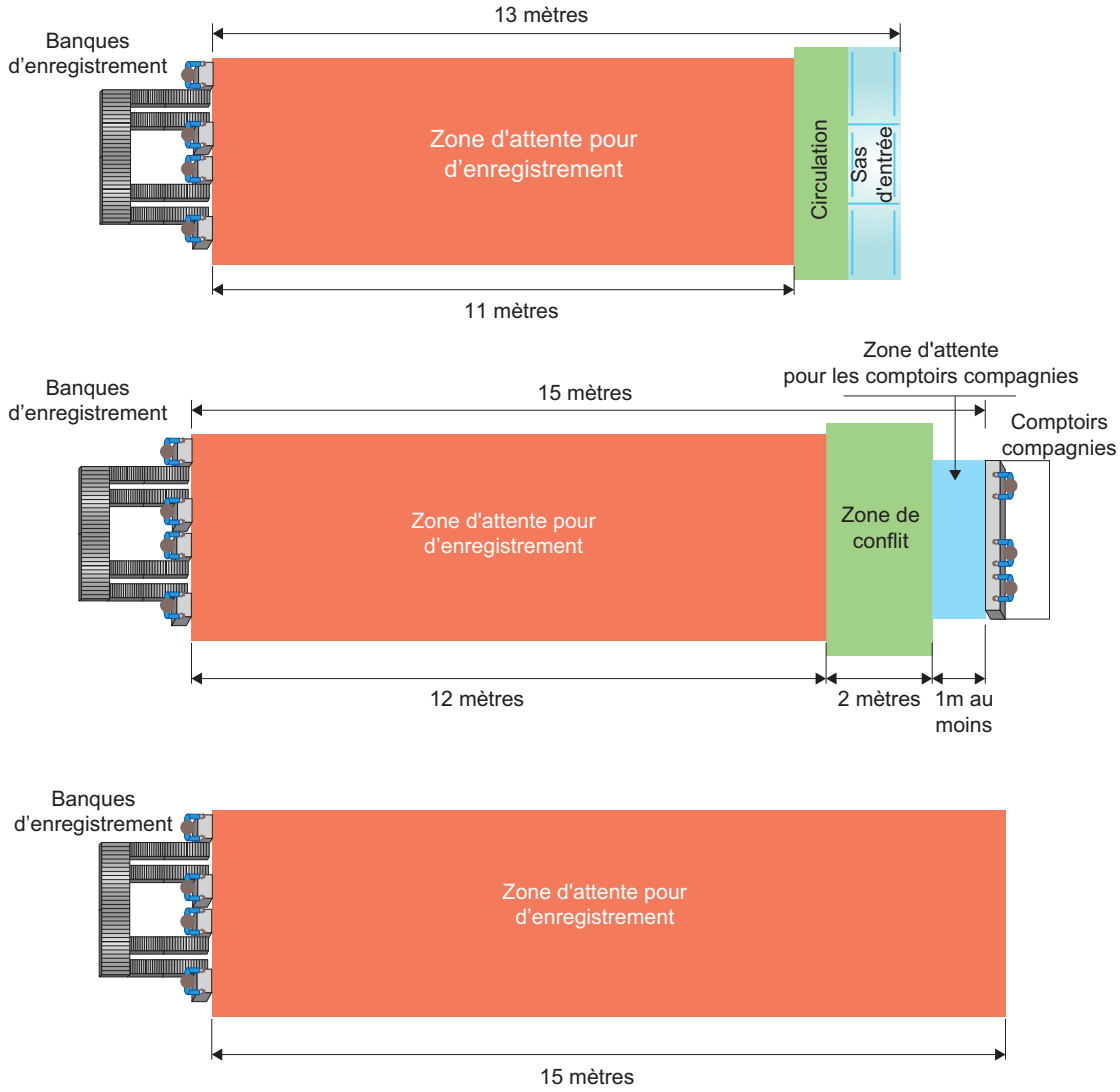
Schémas type pour des banques d'enregistrement

Photothèque STBA/V. PAUL

*Zone d'attente matérialisée devant les banques d'enregistrement*

Photothèque STBA/V. PAUL

*Zone d'attente matérialisée devant le comptoir compagnie*




*Exemple illustrant une répartition possible en cas de chevauchement de zone*

## 3.2.2. Méthode des ratios

### 3.2.2.1. Description

Il s'agit d'une application successive, de ratios et de formules, aux surfaces des principales zones de l'aérogare ou à des équipements afin de calculer leur capacité.

C'est la méthode la plus simple à utiliser. Elle permet une évaluation rapide de la capacité de l'aérogare en requérant un minimum de moyen. D'importantes variations sont observées pour les aérogares de faibles dimensions. Une meilleure connaissance du type d'aérogare (avec une application croisée de la méthode comparative) permet de réduire considérablement cette variation.

### 3.2.2.2. Capacité annuelle

Cette méthode permet d'avoir une estimation de la capacité annuelle d'une aérogare.

Une aérogare peut traiter entre 10 et 20 millions de passagers par an par millier de mètres carrés de SHON (surface hors oeuvre nette). Ce ratio n'est applicable que pour des aérogares ayant les caractéristiques suivantes :

- trafic supérieur à 1 000 000 de passagers annuels ;
- activité continue de l'aérogare tout au long de l'année, excluant ainsi l'utilisation de cette méthode pour une aérogare dont le trafic charter serait supérieur à 25 %.

### 3.2.2.3. Capacité horaire

Ils existent de nombreux ratios. Dans le cadre de ce manuel, deux séries de ratios seront données ; ces deux séries sont proposées par IATA (International Air Transport Association).

La première permet d'évaluer la capacité en fonction de niveaux de service. L'IATA recense 6 niveaux de service différents : niveau A à F.

niveau A : excellent niveau de service, condition de flux libre ; pas de retard, excellent niveau de confort.

niveau B : haut niveau de service, condition de flux stable, très peu de retards, haut niveau de confort.

niveau C : bon niveau de service, condition de flux stable, retards acceptables, bon niveau de confort.

niveau D : niveau de service convenable, condition de flux instable, retards acceptables pour de petites périodes, niveau de confort convenable.

niveau E : niveau de service insuffisant, condition de flux instable, retards inacceptables, niveau de confort insuffisant.

niveau F : niveau de service inacceptable, condition de croisement de flux, rupture du système, retards insupportables, niveau de confort insupportable.

Pour calculer avec plus de finesse la capacité d'une aérogare, il est possible d'utiliser des ratios de dimensionnement plus. précis. Ceux d'IATA peuvent servir de référence et sont donnés en annexe 10.

## 3.2.3. Méthode de simulation

Cette méthode a pour but de simuler les flux des passagers dans les différentes zones de l'aérogare. On utilise des modèles mathématiques afin de simuler le cheminement des passagers et de leurs bagages dans l'aérogare lors des processus arrivée et départ.

La simulation du cheminement d'un passager est réalisée depuis son entrée dans l'aérogare (hall public, ou descente de l'avion) jusqu'à sa sortie (du hall public ou montée dans l'avion).

La méthode consiste à simuler le comportement de passagers types. Le type d'un passager dépendra :

- typologie de passagers : haute contribution, affinitaire, groupe (tour-opérateur),
- typologie des vols : régulier, charter, bas coût,
- origine - destination (national - international).

| Zone | Niveau de service ($m^2$/Occupant) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E | F |
| Enregistrement | 1.8 | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1.0 | |
| Zones publiques | 2.7 | 2.3 | 1.9 | 1.5 | 1.0 | rupture |
| Embarquement | 1.4 | 1.2 | 1.0 | 0.8 | 0.6 | du |
| Livraison bagages | 2.0 | 1.8 | 1.6 | 1.4 | 1.2 | système |
| Contrôles | 1.4 | 1.2 | 1.0 | 0.8 | 0.6 | |

*Tableau des ratios de surface proposés par IATA*

En effet, selon ces critères, un passager ne se comportera pas de la même façon. Ainsi, un passager dit « affaire » sur un vol régulier aura tendance à se présenter plus tard à l'enregistrement qu'un passager afinitaire sur un vol d'une compagnie bas coût.

Le comportement des passagers est plus facile à simuler pour un passager à l'arrivée que pour un passager au départ. L'heure d'entrée dans l'aérogare d'un passager à l'arrivée est à quelques minutes près l'heure d'arrivée de son avion. Les passagers descendent tous de l'avion, se dirigent tous vers la salle de livraison des bagages de soute (après avoir passé un contrôle d'immigration pour les vols hors Schengen), passent dans le hall public. Ce n'est qu'à partir de ce moment que les comportements différeront.

Pour un passager au départ, jusqu'à son entrée dans la salle d'embarquement (espace où les passagers sont canalisés et « stockés »), des choix lui seront proposés à chaque étape de son parcours. Des services (commerces, restauration, autres) lui sont en général proposés en plus des formalités dont il a à s'acquitter.

Pour un passager au départ, la chronologie de son cheminement est calculée à partir soit de l'heure limitée d'enregistrement, soit de l'heure limite d'embarquement.

Pour un passager à l'arrivée, la chronologie de son de son cheminement est calculée à partir de l'heure d'arrivée de son avion.

Une fois que les comportements types des passagers ont été modélisés, il faut simuler des journées de trafic type :

- typologie des vols : régulier, charter, bas coût,
- origine - destination (national - international),
- type d'appareil et taux de remplissage,
- pourcentage de chaque type de passager.

Il faut en outre connaître les modalités de fonctionnement et temps de traitement par type de passagers des différents filtres.

En suite, il faut faire tourner le modèle en ajoutant des vols jusqu'à l'obtention de la saturation d'une zone d'attente. Avec cette méthode, il est possible de connaître le nombre de passagers présents à un instant donné et dans chaque zone de l'aérogare.

Il faut ensuite calculer le nombre de passagers maximal que chaque zone ou module peut traiter.

Le même type d'opération doit être réalisé pour les bagages de soute.

Cette méthode relativement fine suppose donc :

- une connaissance du comportement et de la mobilité des passagers ; cette connaissance est notamment liée à la signalétique, la lisibilité et la compréhensibilité des circuits empruntés par les passagers ;
- une évaluation des temps de traitement des passagers aux différents filtres compte tenu de leur configuration et de leur fonctionnement ;
- une connaissance du trafic possible,
- la maîtrise technique des logiciels utilisés pour simuler les flux.

La fiabilité des résultats obtenus dépendra de la finesse des hypothèses faites sur le comportement des passagers, l'écoulement des flux d'un point à un autre et de la modélisation du fonctionnement des différents filtres.

Remarque :

- cette méthode requiert des ressources en matière de savoir faire, de logiciel et de qualité des données,
- la simulation du comportement d'un passager peut être plus ou moins précise,
- il est possible de simuler des vols types, puis de superposer et agréger des vols. Ces vols types peuvent être obtenus soit par le calcul, soit en réalisant des comptages. Dans ce dernier cas, on parle de courbes de présentation.

### 3.2.4. Méthode analytique comparative

Il s'agit de repérer dans une sorte de catalogue de fiches descriptives d'aérogares déjà réalisées ou étudiées, celles dont les caractéristiques de trafic et d'exploitation sont les plus voisines du cas que l'on étudie. Par référence à ce catalogue, il est alors possible d'estimer les différentes capacités horaires.

La difficulté de cette méthode réside dans la mise au point de ce catalogue qui doit posséder les qualités suivantes :

- être assez fourni pour présenter des cas suffisamment rapprochés du cas étudié permettant une interpolation réaliste de la plupart des éléments des sous-systèmes ;
- être suffisamment détaillé dans la décomposition des installations afin de donner une idée précise du fonctionnement des sous-systèmes pris en référence en comparaison de celui utilisé dans l'aérogare étudiée ;

- être complété par des commentaires donnant une évaluation de l'adéquation entre les surfaces ou les équipements et les caractéristiques d'exploitation de ces installations.
- se référer à des aérogares étudiées en utilisant la même méthode (répartition et mesure des surfaces).

On peut dire que la méthode s'applique à tout type d'aérogare dans la mesure où le catalogue de fichiers est suffisamment bien fourni pour offrir un ou des cas semblables à celui étudié.

Même sans être utilisée comme méthode de calcul de capacité, elle est recommandée en tant que test de cohérence des résultats trouvés par une autre méthode.

Cette méthode est plus souvent utilisée lors d'un dimensionnement d'une aérogare. En effet, dans le cas d'une extension ou de la création d'une nouvelle aérogare, la capacité de l'aérogare devient l'objectif à atteindre, le niveau de qualité de service et le mode de fonctionnement sont connus. Il est alors intéressant et instructif de « voir » comment d'autres aérogares traitent et satisfont ce trafic.

Cela permet de reprendre des modes de fonctionnement efficaces et d'essayer d'éviter de reproduire ceux qui causent des problèmes d'exploitation.

## 3.2.5. Exemple de calcul de capacité avec la méthode des ratios

L'exemple choisi est l'aérogare de Metz Nancy Lorraine. Les plans utilisés pour les mesures des surfaces datent de 2000.

Cette aérogare est constituée par :

- un sous-sol servant pour le catering et de zone de stockage,
- une mezzanine servant de bureau (fonction admistrative principalement),
- un rez-de-chaussée servant au traitement des
- passagers et de leurs bagages, les services offerts aux passagers se situent aussi à ce niveau.

Les ratios qui sont utilisés dans cet exemple n'ont pas fait l'objet d'une validation par le gestionnaire, les utilisateurs (sociétés d'assistance en escale, de contrôle sûreté et autres) ou des services de l'état.

### 3.2.5.1. Mesure des surfaces

Les schémas ci contre indiquent les limites du périmètre des différentes zones.

La zone de recul devant les banques d'enregistrement a été limitée par la présence de fauteuils à 11 m.

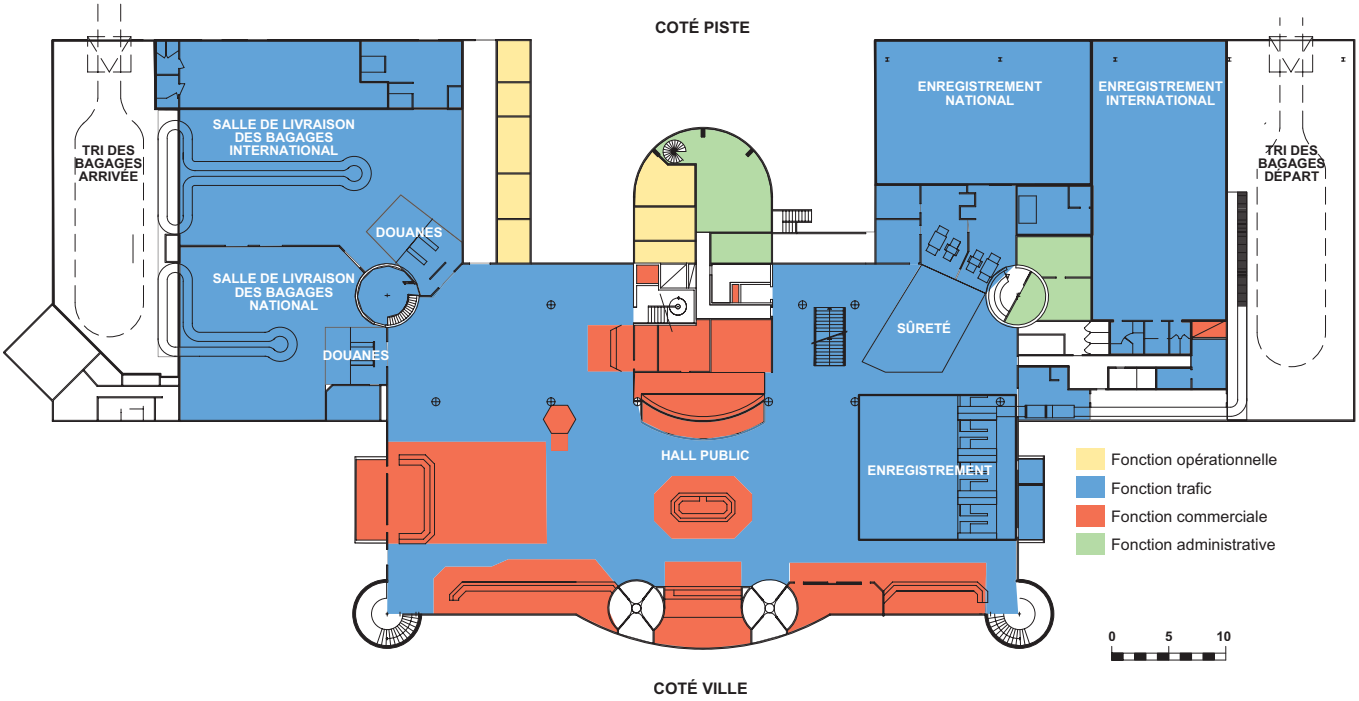
De même, la zone d'attente en amont des postes d'inspection filtrage pour les passagers et leurs bagages de cabine a été limitée afin de laisser des zones de circulation autour de la zone d'attente devant les banques d'enregistrement.

Les zones d'attentes en amont des postes de contrôle des douanes (salle de livraison des bagages de soute) ont été réduites (10 mètres recommandés) afin de laisser une zone libre autour des tapis de livraisons des bagages (3 mètres recommandés). Cet espace doit permettre aux passagers d'attendre le passage de leur(s) bagage(s) et de circuler (avec ou sans chariot).

La zone du hall public correspond à la surface restante une fois qu'ont été retirées les zones d'attentes (enregistrement, poste d'inspection filtrage, comptoirs commerciaux), les services (distributeur de billet de banque, bar restaurant).

Les surfaces et nombre d'équipements de cette aérogare sont :

| | |
|---|---|
| Hall public | 835 m² |
| Enregistrement | |
| Surface d'attente | 110 m² |
| Nombre de banques | 10 banques |
| Poste d'inspection filtrage | |
| Surface d'attente | 60 m² |
| Nombre de postes | 2 postes |
| Contrôle émigration | |
| Surface d'attente | - m² |
| Nombre de postes | 1 poste |
| Embarquement | 550 m² |
| National | 240 m² |
| International | 310 m² |
| Contrôle identité arrivée | |
| Surface d'attente | 46 m² |
| Nombre de postes | 4 postes |
| Salle de livraison | |
| Surface | 425 m² |
| Linéaire de tapis | 73 m |
| Contrôle douanes | |
| Surface d'attente | 30 m² |
| Nombre de postes | 4 postes |




La surface d'attente des postes de contrôle identité départ n'est pas prise en compte car le contrôle d'identité est effectué directement après le contrôle de sûreté.

### 3.2.5.2. Ratios utilisés :

Les ratios utilisés pour le calcul de la capacité horaire départ sont les suivants :

- 1,5 m² par passager dans le hall public,
- 0,5 m² par passagers pour la zone d'attente à l'enregistrement,
- une banque d'enregistrement traite 1 passager toutes les 90 secondes en moyenne, soit 40 passagers à l'heure,
- 0,25 m² par passagers pour l'attente à l'inspection filtrage (contrôle sûreté),
- 150 passagers par heure pour un poste d'inspection filtrage (contrôle sûreté),
- 120 passagers par heure pour un poste de contrôle émigration,
- 1,5 m² par passagers pour une salle d'embarquement national
- 2 m² par passagers pour une salle d'embarquement international.

| | | Ratio | Capacité Passagers par heure |
|---|---|---|---|
| Hall public | 835 m² | 1,5 | 555 |
| Enregistrement | | | |
| Surface d'attente | 110 m² | 0,5 | 220 |
| Nombre de banques | 10 banques | 0,025 | 400 |
| Poste d'inspection filtrage | | | |
| Surface d'attente | 60 m² | 0,25 | 240 |
| Nombre de postes | 2 postes | 0,00667 | 300 |
| Contrôle émigration | | | |
| Nombre de postes | 1 poste | 0,00833 | 120 |
| Embarquement | | | 315 |
| National | 240 m² | 1,5 | 160 |
| International | 310 m² | 2 | 155 |
| Embarquement uniquement national | 550 m² | 1,5 | 365 |

### 3.2.5.3. Calcul de la capacité horaire départ

Les capacités départ de cette aérogare seraient :

Capacité horaire départ national : 220 passagers par heure.

Capacité horaire départ international : 120 passagers par heure. C'est le nombre de poste de contrôle émigration qui serait l'élément limitant.

Capacité horaire départ totale : 220 passagers par heure dont 120 passagers au maximum en régime international. C'est le manque de surface d'attente à l'enregistrement qui serait l'élément limitant.

# 4. De la capacité horaire à la capacité annuelle

Photographie GRAPHIX IMAGES/V. PAUL

*Zone d'enregistrement du terminal 2 de l'aéroport de Nice-Côte-d'Azur*

▼

Les outils actuels d'estimation de la capacité évaluent la capacité horaire mouvements ou passagers. La méthode utilisée communément afin d'en déduire la capacité annuelle est la formule dite de « la 40$^{e}$ heure ». Cette méthode date des années quatre-vingts mais est encore utilisée aujourd'hui.

Les autres méthodes reposent en général sur l'élaboration d'un programme des vols représentatif du trafic de l'année. Nous proposerons une des ces méthodes à la fin de cette partie.

## 4.1. Les formules de la 40e heure

### 4.1.1. Principe

Ces formules de la 40e heure sont au nombre de deux et permettent d'évaluer :

- la capacité annuelle passagers à partir du trafic horaire passagers représentatif,
- la capacité annuelle en mouvements à partir du trafic horaire mouvements représentatif.

Elles sont issues de l'analyse de la courbe des débits classés des heures d'un aéroport. Cette courbe révèle que les vingt premières heures de débit subissent des variations irrégulières, mais qu'à partir de la 30e, voir de la 40e heure, leur évolution est régulière. Il est ainsi possible de trouver une relation entre cette heure stable (la 40e) et le trafic annuel. L'analyse statistique de plusieurs aéroports européens a permis effectivement d'établir cette relation pour le trafic passagers et pour le trafic mouvements.

### 4.1.2. Courbe des débits classés

#### 4.1.2.1. Constitution de la courbe des débits classés

Les heures dont il est question dans cette méthode sont comptées comme commençant à l'heure juste (11 h 00 par exemple) et finissant 60 minutes après (11 h 59).

La courbe des débits classés est obtenue à partir d'un classement par ordre d'importance décroissante, pour chaque trafic étudié, de tous les débits par heure de l'année. On extrait donc toutes les heures de fonctionnement de l'aéroport, pour une caractéristique donnée (arrivée + départ + transit des passagers par exemple). On note la valeur de la caractéristique et le moment exact de la pointe (nombre de passagers et de mouvements le 27 avril 2001 de 9 h 00 à 10 h 00 par exemple). On réitère l'opération sur l'ensemble des heures restantes.

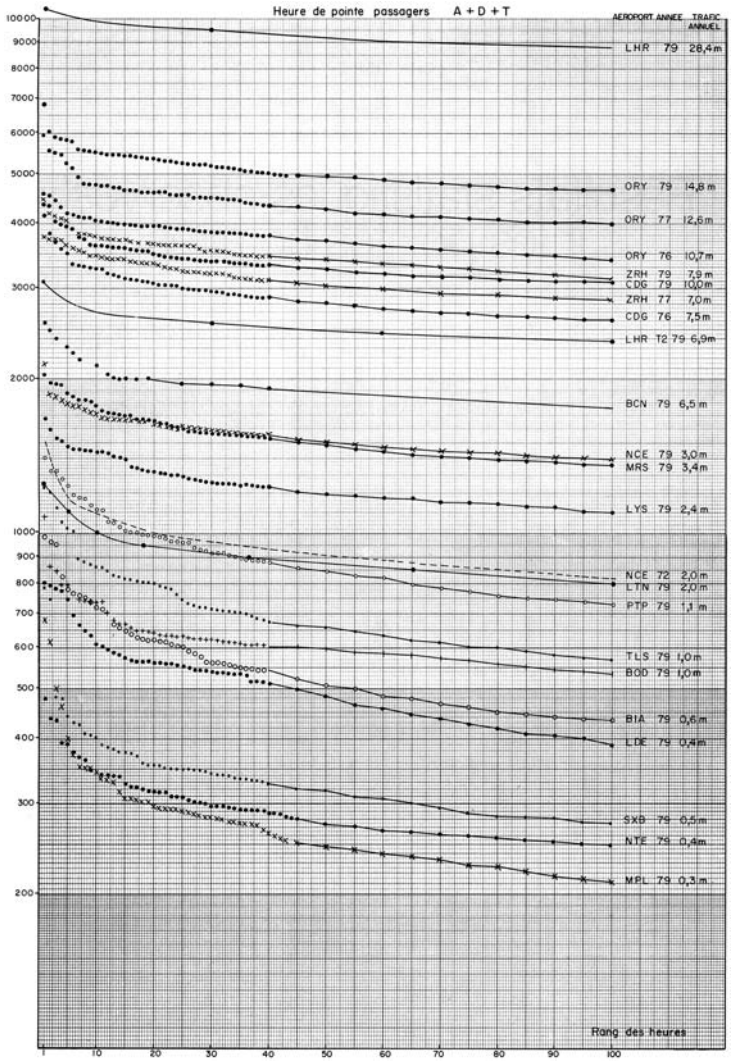
La courbe des débits classés de quelques aéroports européens est présentée ci-contre. Elle a servi à l'analyse entreprise par le STBA en 1981 pour la détermination des formules de la 40e heure.

On obtient finalement une courbe monotone décroissante, ainsi que la liste des dates et des moments de la journée où se sont produites ces pointes.

Les caractéristiques traitées habituellement par cette méthode sont :

Pour les passagers : les arrivées (A), les départs (D), l'ensemble A + D + Transit,

Pour les mouvements d'avions : les arrivées (A), les départs (D), le total (A + D), les mouvements commerciaux et non commerciaux étant séparés. Parfois les mouvements commerciaux ne sont pas isolés et l'heure de pointe comprend l'aviation générale.




*Courbes de débits classées*

### 4.1.2.2. Points caractéristiques de la courbe des débits classés

#### La première heure

La première heure, c'est-à-dire l'heure de l'année qui a compté le plus de mouvements ou de passagers, n'est pas représentative car elle est le plus souvent le résultat d'un événement exceptionnel. Elle ne peut pas servir au dimensionnement des installations. Elle permet seulement de repérer cet événement et donc d'en connaître les causes. Elle peut cependant servir à obtenir certains renseignements sur la capacité maximale de telle ou telle partie de l'aéroport.

#### Une heure caractéristique (20e, 30e, 40e,...)

Le choix du rang de l'heure étudiée n'a pas grande importance, du moment qu'il est suffisamment grand pour que les phénomènes erratiques des pointes extrêmes ne soient plus pris en compte. Il s'avère, en effet, que, suivant les aéroports, des phénomènes irréguliers et non prévisibles peuvent affecter les 20 ou 30 premières heures. Comme il est important de pouvoir comparer d'une année sur l'autre l'évolution de l'heure caractéristique, la prudence conduit à prendre encore une marge, et donc à utiliser selon les aéroports, la 30e, 40e, ou 50e heure.

La connaissance de l'heure de pointe caractéristique a pour objet de servir au dimensionnement des installations aéroportuaires. Elle ne sert qu'associée à un certain nombre de ratios ou de débits élémentaires connus par ailleurs. Par conséquent, si un aéroport utilise la 40e heure avec un certain ratio et un autre la 30e heure avec des ratios inférieurs, ils pourront fort bien arriver à des résultats similaires en terme de besoins (mètres carrés d'aérogare ou nombre de pistes) pour une même courbe de débits classés.

Dans la pratique, la 40e heure de pointe est utilisée en France.

**La 40e heure de pointe: nécessaire pour le dimensionnement**

La courbe des débits classés permet d'avoir une bonne représentation des périodes critiques pour le fonctionnement de l'aéroport, tant pour l'espace aérien que pour les aires de stationnement, ou encore pour la surface de l'aérogare et celle du parc à véhicules.

Le trafic le plus aisément prévisible à court, moyen ou long terme est le trafic annuel. Mais c'est la pointe horaire qui est la grandeur la plus intéressante à étudier pour le dimensionnement des installations aéroportuaires car elle est à l'échelle du déroulement des opérations. La pointe horaire la plus élevée n'est pas significative de l'activité d'une plate-forme — puisque exceptionnelle — et c'est pour cette raison, que l'indicateur « 40e heure de pointe » a été créé. Ce choix est fait afin de limiter le surdimensionnement possible des infrastructures. Cet indicateur est essentiellement utilisé pour les grands aéroports. Pour les plates-formes moins importantes, les scénarios avions sont utilisés (< 1 million de passagers annuels).

### 4.1.3. Relations entre l'heure de pointe et le trafic annuel

Le Service Technique des Bases Aériennes a édité, en 1981, une brochure intitulée « Heures de pointe ». Lors de l'élaboration de cette étude, plusieurs relations ont été établies.

**Mouvements commerciaux**

Le trafic de mouvements commerciaux attendu à la 40e heure de pointe est mathématiquement lié au trafic annuel pourles formules réciproques suivantes:

$$T40 = 5 + 0{,}27 * Tm$$

soit

$$Tm = -18{,}5 + 3{,}7 * T40$$

avec T40 - trafic mouvements (Arrivée + Départ) à la 40e heure de pointe

Tm - trafic annuel en milliers de mouvements (Arrivée + Départ)

**Passagers**

De même, le trafic passagers à la 40e heure de pointe peut être évalué approximativement par la formule:

$$tp = 400 + 315\ Tp$$

soit

$$Tp = (tp - 400)/315$$

avec tp — trafic passagers (Arrivée + Destination + Transit) en 40e heure de pointe

Tp — trafic annuel (Arrivée + Destination + Transit) en millions de passagers

**Relation entre la 40e heure passagers et la 40e heure mouvements**

Nb de Pax en HPpax = 1,15* N* Nb de mvts en HP mvts

Le nombre de passagers par mouvement en heure de pointe passagers est supérieur à la moyenne annuelle du nombre de passagers par mouvement.

On peut relier ces heures de pointe par la relation :

Où Nb de Pax en HPpax est le nombre de passagers en heure de pointe passagers

Nb de mvts en HPmvts est le nombre de mouvements en heure de pointe mouvements

N est le nombre moyen de passagers par mouvement sur l'année.

## 4.2. Scénarios avions

Il s'agit là d'imaginer des scénarios vraisemblables du déroulement futur des mouvements d'avions et de passagers. Cette méthode n'est possible que si les prévisions de trafic ont été faites ligne par ligne, avec une bonne précision, car il va falloir, pour chaque ligne, estimer le type d'avion et les horaires probables des liaisons.
Cette méthode est particulièrement adaptée aux aéroports dont le trafic est inférieur à un million de passagers.
Ce type d'études doit être réalisé conjointement et en liaison étroite par l'aéroport, les compagnies aériennes, les responsables des transports terrestres concurrents, etc.
Le schéma de principe est le suivant :
- déterminer les situations critiques de l'aéroport dans son état actuel et trouver les raisons -commerciales en général- dont elles découlent ;
- faire des prévisions de développement du trafic des lignes provoquant les situations critiquent ;
- déterminer les avions à attendre en fonction de l'évolution du volume de trafic des lignes ;
- étudier si de nouvelles lignes ne vont pas se créer et engendrer des simultanéités supplémentaires ;
- reconstituer les situations critiques futures avec les nouveaux avions envisagés, ainsi que les coefficients de remplissage en pointe.

Le cycle hebdomadaire des horaires d'avions rend relativement aisée la recherche de la situation critique d'un aéroport : dans le mois de pointe, toujours connu facilement, on recherche sur les horaires publiés l'heure ayant le plus grand nombre de mouvements simultanés, et les mouvements d'avions gros porteurs. On est alors certain d'obtenir rapidement la situation critique.
Cette méthode néglige les phénomènes exceptionnels (touchant, pour les aéroports importants, les 20 premières heures) mais prend en compte une situation qui peut se reproduire un vingtaine de fois par an. Par conséquent, on doit être assez proche de l'évaluation de la 40e heure.
Il faut étudier la sensibilité des besoins découlant d'un scénario donné à une modification d'hypothèses sur le type d'avion et sur l'horaire des mouvements.
On s'aperçoit alors que les besoins sont très sensibles à une variation d'hypothèses, notamment en ce qui concerne les horaires. Le décalage de 30 ou 45 minutes d'un avion peut induire une modification considérable des besoins, en plus ou en moins suivant que cela engendre ou supprime une simultanéité de vols.
Pour cette raison, il est conseillé d'utiliser simultanément la méthode des scénarios et la méthode de la 40ème heure, liant l'heure de pointe au trafic annuel.

## 4.3. Voies de recherche

Les méthodes présentées ci-après ne sont pas validées mais ont été développées dans le cadre d'études particulières. Elles pourraient éventuellement constituer une base de réflexion si le besoin de trouver une méthode alternative à la formule de la 40e heure se faisait ressentir.

### 4.3.1. Réactualisation de la relation entre la 40e heure de pointe et le trafic annuel

#### 4.3.1.1. Nouvel ajustement sur un échantillon restreint

Les formules, présentées au chapitre précédent (4.1.3.), reliant la 40e heure de pointe et le trafic

annuel ont été élaborées par le STBA il y a une vingtaine d'années. La question s'est posée concernant une actualisation de cette formule afin de prendre en compte les évolutions de la structure du trafic actuel (hub, navette…).

À partir de données de trafic de 1996 et 1998 extraites des Bilans des Centres de Contrôle d'Approche du Service du Contrôle du Trafic Aérien (SCTA) de 7 aéroports français (Montpellier-Méditerranée, Bordeaux-Mérignac, Toulouse-Blagnac, Bâle-Mulhouse, Marseille-Provence, Lyon-St Exupéry, Nice-Côte d'Azur), l'équation suivante, valable pour un trafic compris entre 20000 et 140000 mouvements, a été établie en 2000 par le Service Technique des Bases Aériennes (coefficient de corrélation $R^2 = 0{,}934$) [19] :

$$T40 = 5{,}2 + 0{,}28 * Tm$$

Où : Tm est le trafic annuel exprimé en milliers de mouvements d'avions

T40 est le trafic de la 40e heure de pointe exprimé en mouvements

La nouvelle formule est donc très proche de la précédente même si on note une légère augmentation de la valeur de la 40e heure de pointe pour un volume de trafic annuel donné, ce que l'on peut expliquer par le fait que les pointes horaires sont plus marquées (phénomène de hub et de concurrence).

Cette réactualisation de la formule de la 40e heure de pointe a été effectuée sur un échantillon d'aéroports relativement restreint. Elle est donc à utiliser avec précaution.

Cette équation et celles qui peuvent en découler devraient être mises à jour régulièrement pour prendre en compte les changements de la structure du trafic. Les échantillons devront englober le plus grand nombre possible de plateformes.

On peut remarquer que cet ajustement est particulièrement bon pour les aéroports dont le trafic annuel est inférieur à 70000 mouvements. Des modes de fonctionnement particuliers (hub, navette…) pour les aéroports à fort trafic peuvent expliquer ce fait.

#### 4.3.1.2. Différentiation selon le type de l'aéroport

Une autre piste à explorer est d'élaborer plusieurs formules reliant une heure de pointe et le trafic annuel. Le rang significatif dans le classement des heures de pointe à prendre en compte peut s'avérer différent selon le type de fonctionnement de l'aéroport concerné (fonctionnement hub, navette,…).

#### 4.3.1.3. Heures glissantes

L'utilisation du système des heures glissantes permettrait d'affiner la représentation du trafic. En effet, l'heure de pointe la plus chargée ne correspond pas forcément à une période comprise entre deux heures pleines. Il en est de même pour les heures suivantes. La saisie de donnée de l'heure exacte de décollage ou d'atterrissage étant faite à une minute près, le trafic peut être détaillé avec un pas de 1 minute, c'est-à-dire 11 h 00-11 h 59, 11 h 01-12 h 00, 11 h 02-12 h 01,.....

Dans l'hypothèse de l'utilisation de ce nouveau classement, un autre rang que celui de la 40e heure devrait certainement être sélectionné. Il faut noter toutefois que cette méthode nécessite d'analyser 60 fois plus d'heures, soit 525600 heures glissantes au lieu de 8760 heures pleines.

### 4.3.2. Autres méthodes

Une autre méthode est proposée en raison des structures de trafic reflétant un fonctionnement en hub. Elle part du principe qu'au cours de la journée, des périodes peuvent être distinguées selon des structures différentes de trafic. Certaines périodes connaissent un trafic essentiellement issu d'une plage de hub d'arrivées ou de départs. D'autres reçoivent un trafic différent et non inclus dans la plage de hub et assuré par des compagnies différentes (charter, point à point, low cost).

Dans ce cas, les coefficients suivants doivent être déterminés :

- nombre de pointes de trafic (plages de hub) : Np
- durée des pointes (des vagues de hub) : Dp
- capacité mixte (arrivées-départs) moyenne des vagues de hub : Cm
- nombre d'heures d'activité sur la journée : Nt
- rapport trafic des heures creuses/trafic des heures de pointe (ou trafic des heures non incluses dans les vagues de hub/trafic des vagues de hub) : Rcp

La capacité annuelle est alors :

$$\text{Capacité annuelle} = ((Np*Dp*)*Cm + (Nt-Np*Dp)*Rcp*Cm)*300$$

cf. exemple paragraphe 3.1.2.3.

[19] *on considère qu'un ajustement est bon à partir d'un $R^2$ de 0,6, sachant que sa valeur est toujours comprise entre 0 et 1.*

# 5. Outils existants

Cette partie a pour objectif de présenter les logiciels actuellement validés qui permettent d'évaluer la capacité des aéroports. Une grille d'analyse permet de décrire pour chacun d'eux les principales caractéristiques, le champ d'application (zones aéroportuaires concernées), le principe de fonctionnement, les développeurs ou distributeurs et quelques éléments d'évaluation. L'analyse se veut objective. Trois types de logiciels sont analysés : les outils algorithmiques, les outils de simulation dédiés à la détermination de la capacité aéroportuaire et les logiciels de simulation généralistes. La grille d'analyse de chacun des outils retenus est présentée en annexe 5.

Photothèque STBA/V. PAUL

*Aéroport de Nice-Côte-d'Azur*

## 5.1. Principe

L'objectif de cette partie est de présenter le principe et la grille d'analyse retenus pour l'analyse des outils d'évaluation de la capacité aéroportuaire. Dans ce manuel, ne sont concernés que les outils homologués ou validés à ce jour.

La grille d'analyse appliquée à chacun des outils retenus est présentée en annexe 9.

## 5.2. La grille d'analyse

Cette partie présente les onze critères d'analyse de la grille et les définitions retenues pour chacun d'entre eux.

### 5.2.1. Caractéristiques du logiciel

Ce premier critère doit permettre d'identifier rapidement la nature du logiciel. Il est composé de trois dimensions : la nature du modèle, le niveau de détails des paramètres analysés, et la nature des paramètres d'entrée.

#### 5.2.1.1. Nature du modèle : méthode analytique/méthode par simulation

**Modèles analytiques**

Les modèles analytiques consistent à estimer le temps entre deux avions en fonction des paramètres opérationnels qui induisent une séparation entre eux. Le choix des paramètres a pour objectif de modéliser la réalité, c'est-à-dire de la décomposer en objets mathématiques quantifiables. Ils concernent l'infrastructure, les procédures et le trafic décomposé en catégories d'avions et en mélanges d'arrivées et de départs. Les séparations entre chaque catégorie d'avions et pour chaque séquence type sont réparties sous forme de matrices. Les calculs matriciels appliqués à une répartition en catégories d'avions permettent d'en déduire le flux d'avions par heure.

**Modèles de simulation**

Par opposition, les outils de simulation classiques permettent de créer des objets (avions, passagers, bagages, etc.) ayant leurs propres caractéristiques qui se meuvent et qui changent d'état dans les différentes parties de l'aéroport ou de l'espace aérien considérés. En analysant les mouvements et les flux de ces objets à différents endroits et en considérant le temps passé par un objet entre deux points, les modèles de simulation permettent d'estimer des mesures de capacité ou de retards.

En pratique, il existe une corrélation importante entre la nature du modèle et le niveau de détails. Les modèles analytiques sont davantage des outils macroscopiques alors que les modèles de simulations sont plutôt des outils « microscopiques » (voire mésoscopiques).

#### 5.2.1.2. Niveau de détails : macroscopique/microscopique

**Outils macroscopiques**

Ils correspondent à un faible niveau de détails, c'est-à-dire qu'ils omettent un grand nombre de détails dans la mesure où l'objectif visé est d'obtenir des réponses stratégiques, adaptées à la planification aéroportuaire, et permettant d'évaluer les performances relatives d'un éventail de solutions d'alternatives. Ces outils sont souvent utilisés pour des réflexions stratégiques ou politiques ou pour des évaluations économiques (coûts/bénéfices). Théoriquement, il s'agit d'outils rapides en termes de préparation des données en entrée et de temps d'exécution des programmes, ce qui leur permet d'envisager un grand nombre de scénarios.

**Outils mésoscopiques**

Ils sont plus détaillés que les outils macroscopiques mais restent des outils stratégiques fournissant des résultats assez généraux. Ces outils qui

traitent de flux par unité de temps concernent davantage l'espace aérien et s'appliquent surtout aux systèmes de gestion du trafic aérien, sans prendre en compte la manière dont sont traités ces flux (procédures, etc.). Aucun outil mésoscopique ne sera analysé dans le cadre de notre étude car ils ne portent pas sur l'évaluation de la capacité aéroportuaire.

**Outils microscopiques**

Ils correspondent à un niveau de détails élevé, mais la frontière avec les outils mésoscopiques n'est pas très précise. Ils sont adaptés à des sujets techniques précis. En général, les modèles représentent des avions ou des passagers ayant des propriétés individuelles (caractéristiques des appareils, nature des passagers, etc.) et pouvant se déplacer dans toutes les zones de l'aéroport. La recherche de points de saturation, de zones de conflit, le choix de portes pour les avions, les manœuvres, etc. sont inclus généralement dans ces modèles microscopiques.

Enfin, on peut également faire la distinction parmi les modèles analytiques ou de simulation entre les modèles dynamiques ou stochastiques.

#### 5.2.1.3. Nature des paramètres d'entrée

**Modèle statique**

Les paramètres d'entrées sont fixes.

**Modèles stochastiques**

Ces modèles intègrent des paramètres d'entrée selon des lois probabilistes (variables aléatoires) et permettent de prendre en compte les incertitudes concernant les performances spatiales des aéroports ou du trafic aérien[20].

**Modèles dynamiques**

Ces modèles intègrent des paramètres d'entrée dépendants du temps et prennent en compte les changements dans le temps des performances spatiales des aéroports ou du trafic aérien.

[20] *Les simulations stochastiques sont souvent référencées sous le nom de simulations de Monte Carlo.*

### 5.2.2. Champ d'application du modèle: zone(s) aéroportuaire(s) concernée(s)

Ce critère permet de définir sur quelle zone de l'aéroport ou de l'espace aérien peut être utilisé le logiciel:

- aérogare(s) (ou parties d'aérogares)
- aires de stationnement
- voies de circulation
- piste(s)
- espace aérien terminal (hors cadre d'étude)
- espace aérien en route (hors cadre d'étude)

### 5.2.3. Données en entrée

Il s'agit pour ce critère de définir les principaux éléments nécessaires en entrée pour utiliser et faire tourner le programme. Il peut s'agir de données variables, de bases de données, d'éléments graphiques, etc.

### 5.2.4. Données en sortie

Ce critère identifie les résultats fournis par le modèle (résultats numériques, tableaux, simulation graphique, etc.).

### 5.2.5. Fonctionnement du logiciel - hypothèses principales

Une rapide description du logiciel doit permettre d'en comprendre le fonctionnement global et les grandes caractéristiques fonctionnelles. Il s'agit d'expliquer les principales opérations composant le modèle. Les hypothèses sur lesquelles s'appuie le modèle doivent être détaillées pour en comprendre la pertinence et apprécier éventuellement les écarts avec la réalité.

### 5.2.6. Souplesse d'utilisation

La souplesse d'utilisation du modèle doit traduire la convivialité du logiciel et donner une indication sur la qualité des interfaces. Ce critère peut préciser également l'effort nécessaire ou les connaissances requises pour comprendre le logiciel et pouvoir le faire tourner.

### 5.2.7. Extensions possibles - flexibilité/ modularité

Il s'agit d'avoir des informations complémentaires sur les extensions possibles du logiciel et sur la manière d'intégrer de nouveaux développements pour compléter ou améliorer la nature des résultats. La modularité du modèle concerne la possibilité d'une association à d'autres applications ou modèles dans le but de fournir un outil informatique plus complet. Ce critère peut également apporter des indications sur la compatibilité du modèle avec d'autres logiciels quels qu'ils soient.

### 5.2.8. Développement (programmation informatique)

Ce critère précise le langage informatique et éventuellement les applications nécessaires utilisés pour développer le logiciel. On peut préciser si le programme a été écrit spécifiquement pour mettre en œuvre le modèle en question ou s'il s'agit d'un développement d'un programme existant. L'organisme ou la personne qui développe le logiciel est précisé.

### 5.2.9. Distribution - coût du logiciel (licence et formation)

Ce critère identifie l'organisme qui commercialise ou distribue le logiciel. Les coûts des licences informatiques et des formations éventuelles sont précisés. Des contacts concernant des fournisseurs éventuels peuvent également être donnés ici.

### 5.2.10. Contacts éventuels

Il s'agit de tout autre contact concernant des utilisateurs connus ou potentiels ayant la maîtrise du logiciel étudié.

### 5.2.11. Éléments d'évaluation

Il s'agit d'avoir quelques éléments permettant d'évaluer l'outil analysé :

- efficacité de l'outil et pertinence des résultats (fiabilité et sensibilité des résultats),
- intérêt du modèle en comparaison avec d'autres outils évaluant la capacité aéroportuaire de manière similaire,
- utilisation de l'outil dans le monde,
- définition des points forts et points faibles pour assister les utilisateurs potentiels ou envisager des pistes d'amélioration.

## 5.3. Ensemble des logiciels étudiés

Trois types d'outils sont analysés :

- les outils algorithmiques dédiés à la détermination de la capacité aéroportuaire ou de l'un des maillons de l'aéroport (The FAA Airfield Capacity Model, CAMACA, MACAO),
- les outils de simulation dédiés à la détermination de la capacité aéroportuaire ou de l'un des maillons de l'aéroport (The airport machine, ARCTerm, PaxSim, SIMMOD, RAMS+Sel, TAAM, Total AirportSim, OPAL),
- les outils de simulation généralistes (ARENA, AUTOMOD, EMPLANT, FLOWSIM, WITNESS)

La grille d'analyse appliquée à chacun des outils retenus est présentée en annexe 6.

# Annexe 1

## Liste des sigles et acronymes

| | |
|---|---|
| ADP | aéroports de Paris |
| AENA | *aeroportos espa_oles y navegación aérea* |
| AIP | *aeronautical information publication* |
| APATSI | *airport/air traffic system interface* |
| ATC | *air traffic control* |
| ATM | air traffic management |
| ATS | air traffic services |
| BEA | bureau enquête accident |
| CAMACA | *commonly agreed methodology for the airport capacity assessment* |
| CEAC | communauté européenne de l'aviation civile |
| CHEA | conditions d'homologation et procédures d'exploitation des aérodromes |
| CO | capacité opérationnelle |
| COarr | capacité opérationnelle arrivée |
| COdep | capacité opérationnelle départ |
| DAST | Direstion des affaires stratégiques et techniques |
| DFS | *Deutsche Flugsicherung Gmh* |
| DRE | Direction de la régulation économique |
| DSNA | Direction des services de la navigation aérienne |
| FAA | *federal aviation administration* |
| HIRO | *high Intensity runway operations* |
| IFR | *instrumental flight rules* |
| ILS | *instrumental landing system* |
| IMC | *instrumental meteorological conditions* |
| INM | *integrated noise model* |
| ITAC | instruction technique des aérodromes civils |
| JO | journal officiel |
| Kts | nœuds (knots) = 1 mile nautique par heure |
| LVP | *low visibility procedures* |
| MF | million de francs |
| MTOW | *maximum take-off weight* (masse maximale au décollage) |
| Mvts | mouvement |
| NATS | national air traffic service |
| NC | non communiqué |
| NM | *nautical miles* |
| NOTAM | *notice to air men* |
| OACI | organisation internationale de l'aviation civile |
| OPAL | *optimisation platform for airports, including landside* |
| OPS 1 | arrêté du 12 mai 1997 relatif aux conditions techniques d'exploitation d'avions par une entreprise de transport aérien public |
| PANS | *procedures for air navigation services* |
| PANS-ATM | *procedures for air navigation services* - air traffic management |
| PANS-OPS | *procedures for air navigation services - operations* |
| Pax | en principe, désigne le nombre annuel de passagers. Il est souvent utilisé comme abréviation de passager |
| PIF | poste d'inspection filtrage |
| PL | poids lourds |
| RCA | réglementation de la circulation aérienne |
| RCA3 | réglementation de la circulation aérienne, fascicule n° 3 |
| SBA | service des bases aériennes |
| SCTA | service du contrôle du trafic aérien |
| SDEEP | sous-direction des études économiques et de la prospective |
| SHON | surface hors œuvre nette |
| SIA | service de l'information aéronautique |
| SID | standard instrumental departure |
| SIMMOD | simulation model |
| SMGCS | surface movement guide and control surface |
| SRAS | syndrome respiratoire aiguë sévère |
| SSBA SE | service spécial des bases aériennes Sud Est |
| SSH | protocole ssh utilisé pour l'échange sécurisé d'informations sur Internet |
| SSR | *secondary surveillance radar* |
| STAR | *standard arrival route* |
| STBA | service technique des bases aériennes: temps mis par l'avion pour parcourir la distance entre la limite d'autorisation d'atterrir et le seuil de piste |
| TAAM | *total airspace and airport modeller* |
| TC | transport en commun |
| TIFBS | tri inspections filtrage des bagages de soute |
| TMA | *terminal manoevring area ou terminal control area* (zone aérienne terminale) |
| TOP | temps d'occupation de piste |
| TOPP | temps d'occupation partiel de piste |
| TRB | *Transportation research board* |
| VFR | *visual flight rules* |
| VL | voitures de location |
| VMC | *visual meteorological conditions* |

# Annexe 2

## Définitions de la capacité issues de manuels techniques existants

Les définitions en anglais ont été conservéés comme tel afin de ne pas introduire de norme avec la traduction en français

### Highway Capacity Manual 2000 :

**The stated capacity for a given facility** is a flow rate that can be achieved repeatedly for peak periods of sufficient demand.

**The capacity of a facility** is the maximum hourly rate at which persons or vehicles reasonably can be expected to traverse a point or a uniform section of a lane or roadway during a given time period under prevailing roadway, traffic, and control conditions.

**Vehicle capacity** is the maximum number of vehicles that can pass a given point during a specified period under prevailing roadway, traffic, and control conditions. This assumes that there is no influence from downstream traffic operation, such as the backing up of traffic into the analysis point.

**Person capacity** is the maximum number of persons that can pass a given point during a specified period under prevailing conditions. Person capacity is commonly used to evaluate public transit services, high-occupancy vehicle lanes, and pedestrian facilities.

### Définitions d' Eurconcontrol validées par l'Airport Operation Team de l'Airport Operation Program:

**Declared Capacity**: « Stated limiting capacity of the airport in aircraft movements per hour »

**Unconstrained Runway Capacity**: « Maximum runway throughput, or flow rate, which can be achieved under ideal conditions (to be defined), regardless of level of service but in accordance with safety standards and recommendations »

**Sustained Runway Capacity**: « Maximum runway throughput, or flow rate, which can be achieved over a sustained period of time when aircraft operate under IFR, under specific traffic mix, in good weather conditions, with good ATM/runway system management, in accordance with safety standards and recommendations, and with an acceptable maximum delay for a limited period of time (to be defined locally) »

**Unconstrained Apron Capacity**: « Maximum number of aircraft that a fixed number of stands can accommodate during a specified period of time for optimum turnarounds when there is a continuous demand for service, in accordance with safety standards and recommendations »

**Sustained Apron Capacity**: « Maximum number of aircraft that a fixed number of stands can accommodate during a specified sustained period of time under specific traffic mix, with local airline and airport operations, with scheduled practices, and in accordance with safety standards and recommendations »

**Unconstrained Taxiway Capacity**: « Maximum taxiway system throughput, or flow rate, which can be achieved under ideal conditions (to be defined), regardless of level of service but in accordance of time under specific traffic mix, with safety standards and recommendations »

**Sustained Taxiway Capacity**: « Maximum taxiway system throughput, or flow rate, which can be achieved over a sustained period of time when aircraft operate under specific traffic mix, in good weather conditions, in accordance of time under specific traffic mix, with safety standards and recommendations, existing taxiway system management, and with an acceptable maximum delay for a limited period of time (to be defined locally) ».

### Aiport system capacity - strategic choices (TRB):

**The capacity** is the maximum volume of traffic that could be handled by a facility under optimum conditions.

**The runway capacity** of an airport is expressed as the rate at which operations (takeoffs or landings) can be accomplished under given conditions.

### Planning and Design of Airports (R HORONJEFF):

The capacity is the number of aircraft operations during a specified interval of time corresponding to a tolerable level of average delay.

Another definition which is gaining more favour is that capacity is the maximum number of aircraft operations that an airfield can accommodate during a specified interval of time when there is a continuous demand for service.

### La capacité aéroportuaire (STBA, octobre 1986):

**La capacité** est le nombre maximum de mouvements qu'un aéroport peut écouler pendant un intervalle de temps donné quand la demande est continue.

### Manuel de capacité - pistes (STBA, juillet 1975):

**La capacité théorique ou cadence** est le nombre maximum d'aéronefs que le système de pistes pourrait physiquement écouler dans l'unité de temps (l'heure) sans tenir compte de la qualité de service.

**La capacité pratique** est le débit maximal de trafic écoulé avec une qualité de service égale ou supérieure à un seuil indiqué au préalable.

# Annexe 3

## Procédures mûres recommandées par APATSI

En 1992, la CEAC (Communauté Européenne de l'Aviation Civile) a lancé un programme pour améliorer l'efficacité des opérations aériennes. Le programme APATSI (Airport/Air Traffic System Interface) a été créé afin de déterminer et de mettre en place des procédures permettant d'atteindre cet objectif. Un manuel a été publié en vue d'encourager les États Membres et les aéroports pour qu'ils évaluent et prennent en considération les améliorations induites par ces procédures, appelées procédures mûres.

Une procédure mûre est une procédure qui a été mise en place sur un ou plusieurs aéroports d'États Membres et qui a été jugée applicable dans la Communauté Européenne. L'application de ces procédures doit toutefois prendre en compte les caractéristiques opérationnelles locales et les réglementations nationales.

Les quinze procédures mûres retenues dans le programme APATSI sont :

1. atterrissage après (évaluée par le pilote),
2. séparation réduite sur une même piste,
3. opérations simultanées sur des pistes sécantes ou convergentes,
4. décollages d'une intersection,
5. multi-alignement,
6. approches à vue,
7. modification de l'application des contraintes de turbulences de sillage pour des décollages,
8. réduction de la séparation radar sur l'approche finale,
9. réduction de la séparation diagonale sur l'approche finale,
10. approches dépendantes sur des pistes parallèles décalées,
11. seuil décalé pour des pistes sécantes,
12. procédures au décollage modifiées pour des avions ayant des distances courtes de décollage,
13. autorisation d'atterrir fondée sur une séparation anticipée,
14. résolution stratégique des conflits entre les routes à l'arrivée et au départ,
15. facteurs opérationnels ayant trait aux temps d'occupation de piste.

Chacune de ces procédures est décrite ci-après :

1 - atterrissage après (évaluée par le pilote),

Cette procédure permet une meilleure utilisation de la piste en bénéficiant du visuel particulier à partir du cockpit de l'avion à l'atterrissage dans l'évaluation de la distance minimale de sécurité nécessaire avec l'avion précèdent qui atterrit aussi. Le pilote a un rôle déterminant dans cette manœuvre puisqu'il est responsable de savoir si elle est possible compte tenu des caractéristiques de son avion.

Les séparations minimales pour turbulences de sillage doivent s'appliquer.

Les conditions nécessaires pour réaliser cette procédure sont :

- la longueur de la piste doit être assez longue pour permettre une séparation suffisante entre les avions,
- la procédure a lieu de jour,
- le contrôleur doit être sûr que le pilote de l'avion qui suit a une claire représentation du trafic au sol,
- tous les pilotes impliqués dans la procédure doivent être avertis de la procédure,
- la responsabilité du maintien de la séparation est détenue par le pilote de l'avion qui suit.

Les gains de capacité proviennent de la réduction des séparations entre avions à l'atterrissage et de la diminution du déclenchement d'approche interrompue dans des conditions de trafic gros porteurs.

Cette procédure peut être appliquée sur tous les types d'aéroport, mais est particulièrement adaptée aux aéroports régionaux. Elle est déjà appliquée sur certains aéroports français.

2 - séparation réduite sur une même piste,

Dans de bonnes conditions de visibilité, un avion peut recevoir une autorisation d'atterrir ou de décoller lorsque l'avion qui précède est encore sur la piste mais a atteint une distance spécifique réduite du seuil de piste.

Cette procédure ne s'applique pas entre un départ et un atterrissage qui précède.

La distance spécifique réduite dépend du nombre et de la configuration des bretelles de sortie. Diffé-

rentes distances sont spécifiées pour les avions à pistons et les avions turbo-propulsés et pour les avions à réaction.

Les séparations minimales pour turbulences de sillage s'appliquent.

Le contrôleur reste responsable de l'estimation de la distance spécifique réduite.

Les conditions nécessaires pour réaliser cette procédure sont :

- pour les avions à pistons et les avions turbo-propulsés à inverseur de poussée :
  - l'avion au décollage qui précède a décollé ou a atteint un point situé à au moins 1 500 m de sa position initiale de décollage,
  - l'avion à l'atterrissage qui précède a passé un point situé à au moins 1 500 m du seuil de piste et est en mouvement,
- pour les avions à réaction et les avions turbo-propulsés sans inverseur de poussée :
  - l'avion au décollage qui précède a décollé ou a atteint un point situé à au moins 2 400 m de sa position initiale de décollage,
  - l'avion à l'atterrissage qui précède a passé un point situé à au moins 2 400 m du seuil de piste et est en mouvement,
- la procédure a lieu de jour.

3 - opérations simultanées sur des pistes sécantes ou convergentes,

Cette procédure est appliquée pour l'utilisation simultanée de pistes convergentes ou sécantes entre un avion qui atterrit sur une piste et un avion qui décolle ou atterrit sur l'autre piste.

Les conditions nécessaires pour réaliser cette procédure sont :

- les pilotes doivent être habitués à cette procédure,
- la procédure a lieu de jour pour les atterrissages et les décollages (les atterrissages simultanés peuvent avoir lieu aussi de nuit),
- un plafond de 300 m et une visibilité de 5 km sont nécessaires,
- les pilotes doivent être alertés de l'utilisation de cette procédure,
- les longueurs d'atterrissage doivent être publiées,
- les conditions de freinage doivent être qualifiées de bonnes,
- il ne doit pas y avoir de vent arrière pour l'avion à l'atterrissage,
- la distance de freinage ne doit pas excéder 50 % de la distance entre le seuil de piste et le point de croisement des pistes,
- en cas de piste humide, les conditions de freinage doivent avoir été jugées bonnes par un pilote d'avion de même catégorie avant l'utilisation de la procédure par un avion de cette catégorie,
- l'intersection entre les deux pistes doit être signalée. Si elle n'est pas visible du seuil de piste, la distance doit être indiquée.

Cette procédure a été mise en service aux aéroports de Sydney, Zurich et Boston-Logan. Une augmentation de 25 % de la capacité a été évaluée (à Boston).

4 - décollages d'une intersection,

Des décollages d'une intersection peuvent avoir lieu à la demande du pilote ou du contrôle. Les conditions nécessaires pour réaliser cette procédure sont :

- la distance entre l'intersection et le bout de piste doit être publiée sur les AIP pour chaque intersection,
- les pilotes de tous les avions au décollage doivent être avertis qu'un avion au décollage bénéficie de cette procédure.

Les gains de capacité proviennent de la réduction du temps de roulage d'un avion au décollage pour gagner le point de décollage sur la piste. Le contrôle peut alors diminuer le temps de décollage avant une arrivée. Il peut aussi organiser des séquences de décollage permettant de limiter l'impact des séparations pour turbulences de sillage.

Cette procédure est en service à l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle depuis 1988.

5 - multi-alignement,

Le service du contrôle peut appliquer le multi-alignement d'avions au décollage à différents points sur une même piste afin d'augmenter la capacité. Les conditions nécessaires pour réaliser cette procédure sont :

- les avions doivent être sous contrôle (visuel ou avec un radar sol) permanent de l'ATC et doivent être sur la même fréquence radio,
- les pilotes doivent être avertis de leur position dans l'enchaînement,

- le pilote de l'avion qui suit doit pouvoir garder le contact visuel avec l'avion qui le précède dans la séquence de décollages,
- la distance entre l'intersection et l'extrémité de piste doit être indiquée à chaque intersection.

D'après les contrôleurs ayant expérimenté cette procédure, le gain de capacité est d'environ 2 départs supplémentaires par heure.

Cette procédure est déjà mise en service sur les aéroports de Paris-Charles de Gaulle et Paris-Orly.

6 - approches à vue,

Selon l'OACI, une approche à vue a lieu lorsqu'un vol IFR termine son approche sans une partie ou la totalité des aides aux instruments, et le fait avec une référence visuelle du terrain. Le pilote prend la responsabilité de la séparation avec l'avion qui le précède.

Les conditions nécessaires pour réaliser cette procédure sont :

- le plafond est au niveau ou au-dessus du niveau initial de l'approche ou le pilote doit avoir rapporter une bonne visibilité dans le secteur d'approche,
- le pilote doit être le numéro un sur la liste des avions à l'atterrissage ou doit avoir l'avion précédant en vue,
- si le pilote rapporte une bonne visibilité mais ne voit pas l'avion précédant, l'approche radar doit être maintenue jusqu'à ce que la séparation puisse être assurée visuellement.

Les gains de capacité proviennent de la diminution du temps d'atterrissage d'un avion premier d'une séquence d'arrivées. Sur un aéroport non équipé de radar, la procédure permet de diminuer le temps de séparation entre avions et de réduire le temps d'approche.

7 - modification de l'application des contraintes de turbulences de sillage pour des décollages,

Cette procédure permet à un avion d'obtenir une clairance de décollage sans respecter les séparations normales dues aux turbulences de sillage. L'ATC doit fournir les informations suivantes au pilote :

- le type de l'avion qui précède,
- le temps écoulé ou la distance depuis son départ,
- la vitesse et la direction du vent au sol,
- l'avertissement éventuel de turbulences de sillage,

Le pilote est alors responsable de sa séparation pour turbulences de sillage au moment du décollage.

Cette procédure doit être publiée sur les NOTAMS et AIP.

8 - réduction de la séparation radar sur l'approche finale,

La séparation standard recommandée par l'OACI entre deux avions à l'approche sur la même trajectoire peut être réduite à 2,5NM si les conditions suivantes sont requises :

- les séparations pour turbulences de sillage sont respectées,
- le temps d'occupation de piste est au plus de 50 secondes,
- les bretelles de sortie sont visibles de la tour de contrôle ou surveillées au radar ou par un SMGCS (surface movement guide and control surface).

Cette recommandation a été adoptée par l'OACI en novembre 1996 et incorporée dans le document OACI PANS/RAC — Doc 4444.

9 - réduction de la séparation diagonale sur l'approche finale,

Pour des pistes parallèles espacées d'au moins 760 m, une séparation minimale de 1,5NM entre deux avions à l'approche sur des trajectoires adjacentes peut être appliquée pour des approches parallèles dépendantes. Les conditions nécessaires pour réaliser cette procédure sont :

- la séparation doit être appliquée seulement lorsque l'avion a débuté son approche finale,
- les atterrissages précédents sont réalisés,
- les procédures d'approches interrompues ne doivent pas être en conflit avec la présente procédure,
- les pilotes des avions présents sur le système de pistes sont informés que des atterrissages ont lieu sur les deux pistes,
- les pilotes doivent être familiarisés avec la procédure.

Cette procédure a été testée par la FAA après avoir été analysée par des simulations en temps réel. Le

gain en capacité est estimé à 4 arrivées supplémentaires par heure.

10 - approches dépendantes sur des pistes parallèles décalées,

En raison des turbulences de sillage, des approches simultanées ne peuvent pas avoir lieu sur des pistes parallèles séparées de moins de 760 m. Des seuils décalés d'une distance suffisante permettent en revanche des approches simultanées si les conditions suivantes sont remplies :

- la pente des deux approches doit être de 3°,
- le décalage des seuils doit être calculé afin de permettre aux contrôleurs d'assurer une séparation verticale entre avions à l'approche de 1000ft,
- le radar de contrôle doit avoir une précision azimutale de 0,3° (un sigma) et une période de mise à jour de 5 secondes ou moins,
- les trajectoires de remise de gaz doivent être séparées de 30°,
- la procédure ne peut avoir lieu qu'entre un avion de type heavy (masse supérieure à 136 tonnes) se trouvant sur la trajectoire la plus basse (seuil amont) et un avion de type medium (masse comprise entre 7 et 136 tonnes) ou de type light (masse inférieure à 7 tonnes) qui se trouve sur la trajectoire la plus haute (seuil aval). L'avion suiveur (de type medium ou light) conserve sa trajectoire au-dessus de celle du gros-porteur, évitant ainsi les turbulences de sillage.

Le contrôle doit assurer une séparation diagonale de 2 NM entre les avions à l'approche.

Le gain de capacité a été estimé par l'aéroport de Copenhague a environ 30 à 50 %. Il dépend de facteurs environnementaux et du mélange de trafic en catégories d'avions.

11 - seuil décalé pour des pistes sécantes,

Pour une utilisation spécialisée des pistes sécantes (une pour les atterrissages et l'autre pour les décollages) un seuil décalé peut être instauré sur la piste aux atterrissages afin de diminuer le temps d'occupation de la piste permettant à l'avion qui attend de décoller plus tôt. La longueur de la piste à l'atterrissage doit être suffisante pour y disposer un seuil décalé. La disposition des sorties doit permettre la procédure.

À Madrid-Barajas, les avions à l'atterrissage prenaient environ 35 à 40 secondes avant de libérer la piste pour un décollage suivant. Avec cette procédure, ce temps a été réduit à 10/15 secondes.

12 - procédures au décollage modifiées pour des avions ayant des distances courtes de décollage,

Des procédures au décollage pour des avions ayant des distances courtes de décollage peuvent être modifiées. Elles concernent essentiellement les avions régionaux turbo-propulsés. Ils doivent alors virer plus tôt pour quitter la trajectoire au décollage mais doivent respecter les contraintes de bruit.

En condition VMC, il faut :

- une visibilité au sol supérieure à 1,5 km,
- un plafond au niveau ou au-dessus du minimum d'altitude en IMC,
- la procédure a lieu de jour.

Le pilote est responsable du maintien de la clairance d'obstacle jusqu'à un niveau de vol défini.

En condition IFR, un SID doit être mis en place afin de pourvoir un guidage radar approprié.

13 - autorisation d'atterrir fondée sur une séparation anticipée,

Dans le cas où la séparation nécessaire entre un avion à l'atterrissage et un avion qui le précède en phase d'atterrissage ou de décollage n'est pas encore atteinte, l'autorisation d'atterrir peut être donnée à l'avion suiveur qui atterrit par le contrôleur qui juge que cette distance sera respectée au moment où cet avion aura atteint le seuil de piste. L'avion de tête aura quitté la piste à ce moment-là.

La responsabilité de la séparation est assumée par le contrôleur, comme dans une procédure normale.

Les gains de capacité proviennent de la réduction des séparations entre avions à l'atterrissage et de la diminution du déclenchement d'approche interrompue.

14 - résolution stratégique des conflits entre les routes à l'arrivée et au départ,

Cette procédure concerne l'alimentation de la zone aérienne terminale (TMA). Elle consiste à établir des routes d'arrivées et de départs entrant, sortant et comprises dans la TMA qui sont séparées les unes des autres de façon adéquate. Les

avions y sont contrôlés de manière standard.

L'organisation de ces routes standards doit être publiée dans les AIP. Elles doivent être désignées par un code alphanumérique en accord avec les règles de l'OACI.

L'objectif de cette procédure est d'augmenter la capacité en appliquant des procédures de contrôles standardisées qui réduisent les communications entre pilotes et contrôleurs. Même si la longueur des trajectoires des avions n'est pas forcément réduite, la charge de travail du contrôleur est diminuée pour un certain nombre d'avions contrôlés.

Cette procédure stratégique est compatible avec les procédures mûres n° 3-opérations simultanées sur des pistes sécantes ou convergentes et n° 12-procédures au décollage modifiées pour des avions ayant des distances courtes de décollage.

Cette procédure mûre a notamment été appliquée dans la zone aérienne terminale desservant les aéroports de Paris-Charles de Gaulle, Paris-Orly, Paris-Le-Bourget, Villacoublay, Toussus le Noble et Pontoise. Elle a consisté à organiser la zone en un carré. Les points d'entrée des avions à l'arrivée constituent les sommets, et les trajectoires des avions au départ se font au travers des côtés.

15 - facteurs opérationnels ayant trait à l'occupation de piste

Cette procédure comporte un ensemble de mesures qui ont pour objectifs de diminuer les temps d'occupation de piste et les séparations entre avions.

Le principe repose sur une meilleure utilisation des infrastructures par les pilotes en vue de diminuer les temps d'occupation de piste. Par ailleurs, les TOP étant diminués, les procédures étant standardisées et l'infrastructure adaptée, les contrôleurs aériens sont en mesure d'optimiser les séparations entre avions. Les principales mesures ont été détaillées dans le présent manuel.

Une coopération est nécessaire entre le gestionnaire, le service du contrôle de l'aéroport et les compagnies aériennes présentes.

Afin de mettre en application ces mesures HIRO (High Intensity Runway Operations), le gestionnaire doit :

- identifier et déclarer son aéroport comme aéroport HIRO,
- équiper l'aéroport de sorties rapides, bretelles d'entrée et zones de stockage adaptées,
- s'assurer que le marquage au sol de ses infrastructures est adéquat,
- fournir un marquage des départs des intersections,
- publier les procédures HIRO dans les AIP.

Les compagnies aériennes opérant sur les aéroports HIRO doivent :

- déterminer les types d'avions qui utiliseront les sorties rapides,
- déterminer le temps d'occupation de piste maximum associé à l'utilisation des sorties rapides,
- demander au pilote d'identifier, lors des briefing avant le vol et en vol, la sortie rapide qu'il utilisera,
  - fournir cette information au service du contrôle pendant l'approche,
  - informer le service du contrôle de l'incapacité d'utiliser la sortie rapide prévue,
- demander au pilote qu'au moment des départs de :
  - s'aligner rapidement,
  - décoller dès que la clairance est délivrée, ou,
  - informer le service du contrôle lors du roulage au sol que « n » secondes sont nécessaires pour mettre les gaz,
  - informer le service du contrôle de l'acceptation/refus de décoller à partir d'une intersection
- publier les procédures HIRO dans les manuels de vol,

En raison des turbulences de sillage, le service du contrôle doit :

- utiliser la connaissance du temps d'occupation de piste prévu afin d'appliquer une réduction de la séparation entre deux avions à l'atterrissage ou intercaler un départ,
- utiliser la phraséologie standard recommandée pour les procédures HIRO,
- publier les procédures HIRO dans les AIP et sur les cartes.

# Annexe 4

## Ensemble des données nécessaires à l'estimation des capacités techniques théoriques avec MACAO

La liste suivante présente les principaux facteurs :

### Infrastructure (piste, voies de circulation, aires de stationnement)

- nombre :
  - de piste(s),
  - de sorties par type, de taxiway, de voies de circulation,
  - postes de stationnement par catégorie,
- configuration :
  - piste(s) : unique, doublet sécant, doublet parallèle dépendant, doublet parallèle indépendant, autres… décalages des seuils d'exploitation « arrivées » et « départs »
  - positionnement des sorties, nature des sorties (rapide, droite), présence d'un taxiway, taxiway complet ou non, voies de circulation double sens,
  - géométrie des postes de stationnement pour les avions, nature (postes au contact, au large, présence de passerelles),

### Procédures

- règles d'espacement dépendant de l'avion (masse ou chargement)
  - piste :
    - distance minimale due aux « turbulences de sillage » à l'arrivée et au départ,
    - minima radar,
    - longueur de la trajectoire d'approche finale,
    - verrou[21],
    - croisement des trajectoires de vol (doublet sécant),
    - autres contraintes espacement dues à la qualité de la surveillance, au mode de séparation (vertical, longitudinal), aux routes utilisées (divergentes ou non - rattrapages),
  - voies de circulation :
    - distance minimale due aux « turbulences de sillage »,
  - aire de stationnement :
    - temps de traitement entre avions,
    - chargement et masse de l'avion,
- type d'avions
  - piste :
    - masse de l'avion,

### Trafic

- mélange arrivées-départs,
- mélange entre catégories d'avions,
- type d'avions
  - piste :
    - vitesse d'approche : dépend du type d'avion,
    - vitesse de décollage : dépend du type d'avion,
    - distance d'atterrissage,
    - distance de décollage,
    - masse de l'avion.

[21] *cf. définition page 34*

# Annexe 5

## Formulaire type pour l'entrée des données dans MACAO

Cette annexe présente une grille d'analyse remplie lors des études de capacité du système de piste(s). Elle permet d'identifier les principales hypothèses à entrer dans les modèles. Elle n'est pas exhaustive, mais constitue une base d'échange avec les partenaires impliqués dans l'étude de capacité (gestionnaire, service du contrôle…).

### Grille d'analyse

#### Configuration de piste(s) et mode d'utilisation

Scénarios étudiés

| | |
|---|---|
| Configuration 1 | |
| Configuration 2 | |
| Configuration 3 | |
| Configuration 4 | |

#### Trafic

| Typologie « moyenne » de la pointe de trafic (configurations 1, 2 et 3) | | |
|---|---|---|
| | cat1 (MTOW < 7 t) | % |
| | cat2 (7 < MTOW < 40 t) | % |
| | cat3 (40 < MTOW < 136 t) | % |
| | cat4 (136 t < MTOW) | % |

La méthode nécessite, outre la typologie « moyenne » de la pointe de trafic « critique », une description détaillée du programme de vols.

## Caractéristiques de(s) piste(s)

| | | |
|---|---|---|
| **Piste 1 (utilisée par les arrivées pour les trois configurations, utilisée par les départs pour la configuration 1)** | | |
| QFU | | |
| longueur | | m |
| Sortie(s) de piste | 1<br>Angle : | Distance par rapport du seuil de piste : |
| | 2<br>Angle : | Distance par rapport du seuil de piste : |
| | 3<br>Angle : | Distance par rapport du seuil de piste : |
| | 4<br>Angle : | Distance par rapport du seuil de piste : |
| | 5<br>Angle : | Distance par rapport du seuil de piste : |
| | 6<br>Angle : | Distance par rapport du seuil de piste : |
| | 7<br>Angle : | Distance par rapport du seuil de piste : |
| | 8<br>Angle : | Distance par rapport du seuil de piste : |
| **Piste 2 (dédiée aux départs pour les configurations 2 et 3)** | | |
| **Doublet de pistes parallèles** | | |
| Distance du seuil de la piste 1 au seuil de la piste 2 (< 0 si le seuil de la piste 1 en aval du seuil de ma piste 2) | | m |
| **Doublet des pistes sécantes** | | |
| Distance du seuil de la piste 1 au point de croisement des pistes | | m |
| Angle formé par les axes de piste | | ° |

## Règles de circulation aérienne

| | |
|---|---|
| **Arrivées (toutes configurations)** | |
| Longueur de la trajectoire d'approche finale | NM |
| Minima d'espacement (radar ou non) | NM<br>ou minutes |
| Distance de la limite d'autorisation d'atterrissage au seuil de la piste 1 | NM<br>ou minutes |
| Seuil d'exploitation décalé | OUI ☐ NON ☐<br>si oui, distance par rapport au seuil de piste 1 : m |
| Distance du verrou « arrivées » au seuil de la piste des arrivées | NM |

pas de contraintes d'espacement dues à la turbulence de sillage

## Utilisation de(s) piste(s)

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Arrivées** | | | | | | | | | |
| **Toutes configurations** | | | | | | | | | |
| Vitesse moyenne sur la trajectoire d'approche finale | | Catégorie 1 | | kts | | | | | |
| | | Catégorie 2 | | kts | | | | | |
| | | Catégorie 3 | | kts | | | | | |
| | | Catégorie 4 | | kts | | | | | |
| Vitesse de passage au seuil de piste | | Catégorie 1 | | kts | | | | | |
| | | Catégorie 2 | | kts | | | | | |
| | | Catégorie 3 | | kts | | | | | |
| | | Catégorie 4 | | kts | | | | | |
| Vitesse de sortie de piste | | 90° : | | kts | | sortie rapide : | | kts | |
| Temps d'occupation de piste à l'arrivée (mesuré) | | Catégorie 1 | | s | | | | | |
| | | Catégorie 2 | | s | | | | | |
| | | Catégorie 3 | | s | | | | | |
| | | Catégorie 4 | | s | | | | | |
| Affectations des arrivées aux sorties de la piste 1 (configurations 1, 2 et 3) [24] | | | | | | | | | |
| Catégorie 1 | Sorties | 1 : | % | 2 : | % | 3 : | % | 4 : | % |
| | | 5 : | % | 6 : | % | 7 : | % | 8 : | % |
| Catégorie 2 | Sorties | 1 : | % | 2 : | % | 3 : | % | 4 : | % |
| | | 5 : | % | 6 : | % | 7 : | % | 8 : | % |
| Catégorie 3 | Sorties | 1 : | % | 2 : | % | 3 : | % | 4 : | % |
| | | 5 : | % | 6 : | % | 7 : | % | 8 : | % |
| Catégorie 4 | Sorties | 1 : | % | 2 : | % | 3 : | % | 4 : | % |
| | | 5 : | % | 6 : | % | 7 : | % | 8 : | % |
| **Doublet de pistes parallèles** | | | | | | | | | |
| Temps d'occupation partielle de piste à l'arrivée (mesuré) | | Catégorie 1 | | s | | | | | |
| | | Catégorie 2 | | s | | | | | |
| | | Catégorie 3 | | s | | | | | |
| | | Catégorie 4 | | s | | | | | |
| **Doublet des pistes sécantes** | | | | | | | | | |
| Temps de croisement (mesuré) | | Catégorie 1 | | s | | | | | |
| | | Catégorie 2 | | s | | | | | |
| | | Catégorie 3 | | s | | | | | |
| | | Catégorie 4 | | s | | | | | |
| **Départs** | | | | | | | | | |
| Temps d'occupation de piste au départ (mesuré) | | Catégorie 1 | | s | | | | | |
| | | Catégorie 2 | | s | | | | | |
| | | Catégorie 3 | | s | | | | | |
| | | Catégorie 4 | | s | | | | | |

ou tableau des cadencements

| | Catégorie 1 | Catégorie 2 | Catégorie 3 | Catégorie 4 |
|---|---|---|---|---|
| Catégorie 1 | | | | |
| Catégorie 2 | | | | |
| Catégorie 3 | | | | |
| Catégorie 4 | | | | |

# Annexe 6

## Fiches d'analyse des logiciels de capacité

| LOGICIEL | **THE AIRPORT MACHINE** |
|---|---|
| **Caractéristiques du logiciel** | The Airport Machine est un model de simulation microscopique en temps accéléré. Il permet également de réaliser des simulations stochastiques ou statiques.<br>Les principales mesures de performance concernent les flux d'avions et la capacité (à flux tendu) côté piste par unité de temps et les retards. La structure du logiciel est comparable à celle de SIMMOD et couvre l'ensemble des opérations de quelques minutes avant l'atterrissage jusqu'à quelques minutes après le décollage. |
| **Champ d'application : zone aéroportuaire concernée** | Piste, voies de circulation et aires de stationnement |
| **Données en entrées** | L'aéroport considéré doit être assimilé et modélisé comme un réseau de points et de liaisons. Les autres données en entrée concernent les fichiers de vol, la configuration de l'aéroport, les procédures ATC, les caractéristiques des avions et les données météorologiques sur la nature des vents. On peut définir jusqu'à 8 types d'avions avec leurs caractéristiques techniques. Les opérations de contrôle peuvent être intégrées en temps réel pendant la simulation ou être paramétrées pour être exécutées automatiquement. |
| **Données en sortie** | The Airport Machine est équipé d'une bonne interface graphique, utile pour valider des propositions. Le "post-processor" permet de déterminer des flux ou des retards à des endroits précis, identifier les conflits potentiels et produire des graphes flux/retards. |
| **Fonctionnement du logiciel hypothèses principales** | The Airport Machine dépend étroitement du grand niveau de détails de représentation du côté "piste". Le trafic aérien est modélisé selon un réseau de liens et de points, chaque lien ne traitant qu'un seul avions à la fois. Si toutefois deux avions convergeaient vers le même lien, les procédures de traitement des avions (priorités, règles de circulation, etc.) intégrées dans le modèle permettent de déterminer quel avion est prioritaire et quelle est la nature du retard engendrée éventuellement. |
| **Souplesse d'utilisation** | Airport Machine nécessite un niveau moyen d'expertise de la part des utilisateurs (moins que pour l'utilisation de SIMMOD et de TAAM), mais demande autant de ressources et de formation.<br>Il permet une utilisation interactive et offre des potentialités graphiques intéressantes. |
| **Extensions possibles flexibilité** | The Airport Machine est un logiciel directement concurrent de SIMMOD et TAAM. Cependant, il offre beaucoup moins de flexibilité et d'options.<br>Modèle très largement déterministe. |
| **Développement du modèle** | Le logiciel commercial a été développé par Airport Simulation International (ASI) |
| **Distribution Coût du logiciel (licence et formation)** | 20 000 € pour une licence. |
| **Contacts éventuels** | |
| **Éléments d'évaluation** | The Airport Machine est un outil de simulation un peu moins détaillé que SIMMOD et TAAM. Il est dédié à l'analyse de l'aire de manœuvre sur les aéroports. Il nécessite moins de ressources qu'un logiciel généraliste et autant que SIMMOD et TAAM. Il est en revanche moins précis que les logiciels généralistes, SIMMOD et TAAM. |

| LOGICIEL | **ARCTerm** |
|---|---|
| **Caractéristiques du logiciel** | Le logiciel ARCTerm est un model de simulation microscopique en temps accéléré. Il permet également de réaliser des simulations stochastiques ou statiques.<br>Il mesure des quantités de passagers, d'accompagnants et de bagages et l'ensemble des temps (parcours, attente, retards…). Il permet la gestion des flux de personnes (passagers et accompagnants) et de bagages dans une aérogare. Les retards et temps d'attente obtenus permettent d'évaluer la limite de saturation du système. Il permet de détecter des problèmes de circulation des passagers et bagages dans l'aérogare et dans les systèmes de tri bagages en fonction d'un trafic réel. |
| **Champ d'application : zone aéroportuaire concernée** | L'aérogare<br>- flux de personnes (passagers et autres)<br>- flux de bagages (y compris à partir de l'avion vers l'aérogare)<br>- dispositifs divers (tapis roulants, P.I.F.,ascenseurs, escalators…) |
| **Données en entrées** | Nœuds et liens : la zone concernée par la simulation est modélisée à partir de nœuds et de liens, chacun possédant des caractéristiques (propres ou communes).<br>Evénements : événements qui résultent du traitement des passagers, accompagnants et bagages dans le réseau de nœuds et de liens. Ils sont : le chemeinement, l'attente à une ressource… et sont mesurés.<br>Les données sont saisies par l'utilisateur ou peuvent être importées d'un fichier externe. |
| **Données en sortie** | ARCTerm fournit deux types de résultats :<br>- une animation de scénarios en 3D (hall d'entrée, transport de bagages, comptoirs d'enregistrement…).<br>- des résultats sous forme graphique.<br>Large éventail de statistiques sur les temps de parcours, et les quantités dont voici un exemple :<br>Aérogare<br>- Distance parcourue entre l'entrée et la sortie<br>- Temps des files d'attente<br>- Temps passé dans l'aérogare<br>- Temps passé au service<br>- Temps passé à d'autres activités dans le système<br>- Utilisation des appareils (ascenseurs, escalators, tapis roulants…) indiquant les variations des niveaux d'activité durant le temps de service<br>- Nombre de passagers servis au total et en moyenne<br>- Longueur des files d'attente indiquant la durée d'attente à différents moments de la journée<br>- Paramètres critiques des files d'attente indiquant l'heure de pointe et la longueur maximale de la file d'attente<br>- Le nombre de passagers dans l'aérogare en fonction du temps<br>- Densité de passager dans des espaces définis en fonction du temps<br>- Nombre de passagers passant par des portails virtuels en fonction d'intervalles de temps |

| | |
|---|---|
| | - Taux de collisions entre passagers à certains endroits définis du terminal en fonction du temps<br>Aéronefs<br>- Distribution de facteurs simulés en fonction de plusieurs variables : type d'avion, type de ligne aérienne, d'aéroport et de créneau horaire<br>- Distribution des décollages et des atterrissages en fonction de plusieurs variables : type d'avion, type de ligne aérienne, d'aéroport et de créneau horaire<br>- Distribution simulée des retards prévus en fonction de plusieurs variables : type d'avion, type de ligne aérienne, d'aéroport et de créneau horaire<br>- Distribution des durées de stationnement des avions en fonction de plusieurs variables : type d'avion, type de ligne aérienne, d'aéroport et de créneau horaire<br>Au niveau économique<br>- Distribution des coûts d'opérations des processeurs<br>- Coûts du temps d'attente des passagers<br>- Revenus des activités suivantes :<br>- Frais d'atterrissage<br>- Frais de location de passerelles<br>- Frais de taxe de départ du passager<br>- Pourcentage des ventes au détail en fonction de la tendance à dépenser et de la proportion des passagers visitant les boutiques<br>- Aires de stationnement<br>- Systèmes de transport au sol commercial<br>Les aérogares sont modélisées à partir d'un système de nœuds et de liens. Des propriétés sont affectées à chaque élément ou à des ensembles d'éléments. |
| **Fonctionnement du logiciel hypothèses principales** | Les passagers, accompagnants et bagages sont répartis en plusieurs groupes et chaque groupe a des caractéristiques différentes (vitesse, nombre de bagage,..). Ils suivent un cheminement défini par l'utilisateur le long des liens. A chaque instant, l'état général du système change : les passagers, accompagnants et bagages évoluent entre les nœuds sur les liens en fonction des caractéristiques définies au nœuds, aux liens et aux ressources afin de modéliser les paramètres opérationnels qui régissent les comportements des passagers et des ressources. |
| **Souplesse d'utilisation** | ARCTerm est un outil complet nécessitant un effort d'apprentissage modéré. La maîtrise complète du logiciel requiert une formation d'un durée moyenne.<br>L'interface à disposition pour la modélisation est conviviale et intuitive. La détermination de chaque objet, attribut et ressource rend ces systèmes souples. Des ensembles de ressources peuvent être modélisés. La finesse de la modélisation peut donc être choisie. |
| **Extensions possibles flexibilité** | Le logiciel est conçu pour la simulation dans l'aérogare. Cependant, sa souplesse d'utilisation permet d'effectuer d'autres simulations (exemple : fret).<br>ARCTerm peut être couplé à ARCCapture. Pour ce dernier, le principe est de définir une zone de capture de cible (matérialisée par un carré) |

| | |
|---|---|
| | dans une aérogare existante. Le logiciel détecte alors la présence ou l'absence d'objet dans le carré et procède ainsi au comptage et à la mesure de temps, et ce à l'aide de caméras. Le positionnement des caméras dépend de la (ou des) zone(s) à étudier. Les études sont possibles aussi bien dans les aérogares (bornes d'enregistrement, bagages, escalators…) que sur les pistes ( atterrissages et décollages, possibilité de connaître les sorties empruntées par les aéronefs…) ou les aires de stationnement. |
| **Distribution** | La distribution du logiciel est assurée par la société ARC (Aviation Research Corporation).<br>Le prix catalogue d'acquisition est d'environ 50 000 dollars, mais dépend du nombre de licences. La formation coûte 5 000 dollars, et la licence annuelle 8 000 dollars. |
| **Contacts éventuels** | K. Romi Singh<br>Président<br>Aviation Research Corporation<br>Tel : 360-945-2962<br>Fax : 360-945-2974<br>E-mail: krsingh@arc-us-ca.com<br>http://www.arc-us-ca.com |
| **Éléments d'évaluation** | ARCTerm est un logiciel de simulation permettant une analyse fine et détaillée donnant des résultats précis comme des flux de passagers, d'accompagnants et de bagages, et des mesures de temps (temps d'attente, retards…). Il nécessite cependant une grande expertise du fonctionnement d'une aérogare. La fiabilité des résultats est en général qualifiée de bonne par les utilisateurs. Son point fort est sa facilité d'utilisation et son couplage à ARCCapture facilitant le comptage des passagers, bagages et autres.<br>Il n'y a pas la possibilité de définir des zones de diffusion du comportement des passagers ni de simuler les chariots à bagages. |

| LOGICIEL | **CAMACA (Commonly Agreed Methodology for Airport Airside Capacity Assessment)** |
|---|---|
| **Caractéristiques du logiciel** | Modèle analytique d'évaluation de la capacité aéroportuaire<br>Modèle macroscopique |
| **Champ d'application : zone aéroportuaire concernée** | Côté piste<br>CAMACA est composé de trois modules :<br>- RunSysCap : module d'évaluation de la capacité piste(s),<br>- TaxiCap : module d'évaluation de la capacité des voies de circulation,<br>- ApronCap : module d'évaluation de la capacité des aires de stationnement.<br>Les trois modules sont en cours de développement. RunSysCap est en cours de validation. Il sera le seul à être analysé ici. |
| **Données en entrée** | Des menus déroulant permettent d'entrer les données :<br>- de la piste : nombre, configuration (unique, parallèles, sécantes, convergentes), type d'exploitation de chaque piste (dédiée aux arrivées, dédiée aux départs, mélange arrivées-départs), utilisation des pistes (temps d'occupation de piste à l'arrivée et au départ),<br>- des procédures : espacement radar, séparation pour turbulences de sillage au départ et à l'arrivée, verrou, longueur d'approche finale, nombre de SIDs,<br>- du trafic : pourcentage de catégories d'avions, vitesse d'approche des avions,<br>Les avions sont classés suivant la classification OACI (envergure des avions). |
| **Données en sortie** | Courbe de capacité horaire du système de piste en fonction du pourcentage d'arrivées,<br>Courbe présentant le nombre horaire de départs en fonction du nombre horaire d'arrivées,<br>Tableau présentant la capacité horaire, le nombre horaire d'arrivées, le nombre horaire de départs pour les pourcentages d'arrivées (0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %), |
| **Fonctionnement du logiciel hypothèses principales** | cf. description du modèle analytique, paragraphe 5.2.1.1. Nature du modèle. |
| **Souplesse d'utilisation** | Les menus déroulants permettent de modifier facilement les données d'entrée. Il est possible d'utiliser un scénario par défaut.<br>Le logiciel s'utilise avec une connexion internet. Il reste localisé sur le serveur d'Eurocontrol. Les problèmes de connexion entraînent parfois des impossibilités d'ouvrir un scénario déjà créé. Il est souvent nécessaire de créer un protocole d'échange particulier pour l'utilisateur potentiel afin de contourner les pare-feu internes. |
| **Extensions possibles flexibilité** | Sinon, le logiciel est considéré comme « mature » et aucune modification n'est envisagée.<br>Il est en cours d'intégration dans la plate-forme OPAL (cf. fiche OPAL). |

| | |
|---|---|
| **Développement du modèle** | CAMACA est développé par Eurocontrol à Bruxelles. Ses algorithmes ne sont pas publiés ni disponibles. Euroncontrol souhaite conserver un copyright sur le produit. |
| **Distribution**<br>**Coût du logiciel**<br>**(licence et formation)** | Eurocontrol<br>Gratuit |
| **Contacts éventuels** | Bruno Desart<br>CAMACA project manager<br>Airport Operation Unit<br>Eurocontrol<br>96, rue de la fusée<br>B-1130 Bruxelles — Belgique<br>Tel : (+32) 2 729 31 37<br>Fax : (+32) 2 729 91 93<br>bruno.desart@eurocontrol.int |
| **Éléments d'évaluation** | CAMACA (RunSysCap) est un logiciel analytique adapté aux réflexions stratégiques nécessitant une appréciation rapide de la sensibilité de la capacité « piste » lorsque des paramètres opérationnels de base tels que le nombre ou la configuration des pistes, le mix d'appareils, les espacements exigés, le temps d'occupation de la piste, etc. varient.<br>Il ne nécessite pas une grande expertise du fonctionnement d'un aéroport. Les résultats sont présentés sous forme de graphique et de tableau permettant d'obtenir la capacité horaire théorique en fonction de la répartition d'arrivées et de départs. Ses points forts sont sa gratuité, ses mises à jour continues par le groupe de travail d'Eurocontrol ACAM task force (Airport Capacity Assessment Model). Comme il est un outil récent (depuis 2000), des menus déroulants intuitifs ont été développés. Sa gestion des scénarios permet par ailleurs de visualiser les variations de capacité. Les utilisateurs se repartissent en Europe. Il est en cours d'intégration dans la plate-forme OPAL (cf. fiche OPAL).<br>Un de ses points faibles concerne son mode de diffusion : le logiciel ainsi que les fichiers d'entrée et de résultats restent localisés sur le serveur d'Eurocontrol. Son utilisation se fait donc via internet. Les pare-feu et les problèmes éventuels de connexion risquent de limiter son usage. Les résultats ne portent que sur une répartition fixe de catégories d'avions. Il ne peut pas être utilisé de manière automatisée pour évaluer les capacités sur une journée. |

| LOGICIEL | **FAA Airfield Capacity Model** |
|---|---|
| **Caractéristiques du logiciel** | Modèle analytique d'évaluation de la capacité aéroportuaire.<br>Modèle macroscopique.<br>Logiciel permettant de calculer la capacité de 15 configurations de pistes différentes (de 1 à 4 pistes exploitées) étant donné une demande continue.<br>Pas d'interface graphique disponible. |
| **Champ d'application : zone aéroportuaire concernée** | Côté piste(s). |
| **Données en entrées** | Fichier texte avec informations sur : configuration de la ou des piste(s) en service, type d'opérations sur chacune d'elle (départs, arrivées, ou les deux),<br>mélange des catégories d'avions, séparations (ATC) exigées entre chaque opération, caractéristiques des appareils (temps d'occupation de la piste, vitesse d'approche finale), données climatiques déterminant les conditions de vol. |
| **Données en sortie** | Capacité horaire du système de piste pour un ratio départ/arrivée donné. Des incrémentations de 10 % permettent d'obtenir la capacité « enveloppe »<br>èsoit 11 points s'étalant de (100% départs, 0% arrivées) à (0% départs, 100% arrivées). |
| **Fonctionnement du logiciel hypothèses principales** | Les 15 configurations de piste classiques sont considérées comme des combinaisons de 4 configurations de base : piste simple, doublet rapproché de pistes parallèles, doublet parallèle éloigné (indépendant), doublet sécant.<br>Pour chacune de ces configurations de base, le logiciel comprend un module intégré qui calcule la capacité de la configuration considérée. Ces modules sont basés sur le modèle d'une piste simple qui connaît la capacité piste "tout départ", la capacité "tout arrivée", capacité de la piste quand départs et arrivées sont alternés. Les autres capacités pour des ratios de départs/arrivées variables sont calculées par extrapolation des trois résultats précédents.<br>Les espacements requis entre chaque opération sont supposés être respectés à 5% près.<br>Une hypothèse est également faite sur le fait que les taxiways et les portes ont peu d'influence sur la capacité « côté piste ». |

| | |
|---|---|
| **Souplesse d'utilisation** | Logiciel nécessitant peu de temps pour préparer le fichier d'entrée et faire tourner le programme.<br>Toutes les variables sont précisées par l'utilisateur, ce qui fait que toutes les situations peuvent être envisagées. |
| **Extensions possibles flexibilité** | Étant donné que le résultat de sortie est numérique, FAA Airfield Capacity Model peut être facilement associé à d'autres logiciels.<br>Sinon, le logiciel est considéré comme "mature" et aucune modification n'est envisagée. |
| **Développement du modèle** | Programme rédigé en FORTRAN disponible sur machines IBM (200 kB de mémoire).<br>Consortium Peat, Marwick, Mitchell and company, Mac Donnell Douglas Automation (fin des années 1970)<br>Modification par FAA avec soutien de MITRE corporation (1981) |
| **Distribution - Coût du logiciel (licence et formation)** | Mitre Corporation |
| **Contacts éventuels** | William J.SWEDISH – CAASD – The Mitre Corporation<br>7525 Colshire Drive – McLean, Virginia 22102 |
| **Éléments d'évaluation** | FAA Airfield Capacity Model est un outil particulièrement adapté aux réflexions politiques nécessitant une appréciation rapide de la sensibilité de la capacité "piste" lorsque des paramètres opérationnels de base tels que le nombre ou la configuration des pistes, le mix d'appareils, les espacements exigés, le temps d'occupation de la piste, etc. varient.<br>Le modèle pourrait être amélioré sur le calcul des capacités piste dans le cas où un départ s'insère entre deux arrivées, car jusqu'à présent, les résultats fournis par le logiciel dans le cas où une piste traite approximativement le même nombre de départs et d'arrivées ne sont pas toujours très précis. |

<table>
<tr><td>LOGICIEL</td><td colspan="3">OPAL (Optimisation Platform for Airports, including Landside)</td></tr>
<tr><td>Caractéristiques du logiciel</td><td colspan="3">OPAL est une plate-forme virtuelle permettant l'utilisation de logiciels déjà existants de simulation et analytiques concernant le côté piste et les aérogares.<br>Le choix de l'un ou l'autre des logiciels présents dans la plate-forme permet de réaliser des simulations stochastiques ou statiques, et des évaluations analytiques de capacité.<br>Suivant l'utilisation de l'un ou l'autre des outils, c'est un outil microscopique lorsque des logiciels de simulation sont utilisés ou macroscopique si des outils analytiques sont utilisés.<br>Il peut être utilisé comme outil de planification ou comme outil d'analyse.</td></tr>
<tr><td rowspan="8">Champ d'application :<br>zone aéroportuaire concernée</td><td>Capacité</td><td>Analytique</td><td>Simulation</td></tr>
<tr><td>aérogares(s) ou (parties d'aérogares)</td><td>SLAM (passagers)<br>MACS (fret)</td><td>POWERSIM (passagers)<br>WITNESS (passagers)<br>PAX/BAX (passagers et bagages)</td></tr>
<tr><td>aires de stationnement</td><td></td><td>SIMMOD<br>TAAM</td></tr>
<tr><td>voies de circulation</td><td></td><td>SIMMOD<br>TAAM</td></tr>
<tr><td>piste(s)</td><td>MACAD</td><td>SIMMOD<br>TAAM</td></tr>
<tr><td>espace aérien terminal (hors cadre d'étude)</td><td></td><td>SIMMOD<br>TAAM</td></tr>
<tr><td>Environnement</td><td>INM</td><td></td></tr>
<tr><td>Sécurité</td><td>TRIPAC</td><td>TOPAZ</td></tr>
<tr><td>Coût/bénéfice</td><td>CBM</td><td></td></tr>
<tr><td>Données en entrées<br>Logiciels de simulation</td><td colspan="3">Node et link : les infrastructures et les procédures sont modélisées à partir de nœuds et de liens, chacun possédant des caractéristiques (propres ou communes)<br>Event : type d'avion, de passagers, destination, n° de vol, routes, parking</td></tr>
<tr><td>Données en entrées<br>Logiciels analytiques</td><td colspan="3">Ensemble de valeurs reflétant les hypothèses relatives au trafic (volume et structure des catégories d'avions), procédures réglementaires et propres à l'environnement de l'aéroport et de l'infrastructure</td></tr>
<tr><td>Données en sortie<br>Logiciels de simulation</td><td colspan="3">Animations : interface graphique qui permet de visualiser la simulation.<br>Large éventail de statistiques sur les retards, les temps de parcours, la consommation de carburant. Les données du fichier de résultats sont compatibles avec INM 6.x. Les données en entrée de liens et de nœuds sont transformées en données INM.</td></tr>
<tr><td>Données en sortie<br>Logiciels analytiques</td><td colspan="3">Valeurs de capacité en nombre d'unité (passagers, fret et mouvements)</td></tr>
<tr><td>Fonctionnement de la plate-forme OPAL<br>hypothèses principales</td><td colspan="3">La plate-forme OPAL est constituée de 5 modules :<br>- interface homme machine (IHM),<br>- base de modèles : elle est constituée des outils suivants :<br>- outils d'évaluation de capacité et de retards,<br>- outils de sécurité,</td></tr>
</table>

| | |
|---|---|
| | - outils environnementaux,<br>- outils d'évaluation coût/bénéfice,<br>- module d'optimisation et de diagnostic, constitué de:<br>- outils d'optimisation,<br>- outils de diagnostic,<br>- module de communication,<br>- base de données centrale,<br>L'IHM permet de construire les scénarios en entrant les données et de choisir l'outil ou les outils à utiliser et à prendre dans la base de modèles. La définition des scénarios se fait soit avec une interface graphique standard ou avec l'interface graphique propre à chaque outil. Les données d'entrée et les résultats sont sauvegardés sur la base de données centrale. Le module de communication gère l'échange de données et de résultats entre les outils et la base de données centrale. Il convertit les données standards en données utilisables par chaque outil, et inversement il convertit les résultats de chaque outil en données standards. Lorsque les résultats sont estimés, les modules d'optimisation et de diagnostic permettent d'optimiser les scénarios en faisant varier un ou un ensemble de paramètre(s) et de faire une analyse.<br>La plate-forme peut être utilisée en réseau. Les logiciels constituant OPAL peuvent ainsi être répartis entre plusieurs sites. Pour cela, le protocole ssh est utilisé. |
| **Fonctionnement du logiciel hypothèses principales Logiciels de simulation** | cf. SIMMOD |
| **Fonctionnement du logiciel hypothèses principales Logiciels analytiques** | Le principe de calcul consiste à prendre en compte les données d'entrées descriptives de l'infrastructure, du trafic, des procédures et des caractéristiques des éléments présents sur le maillon considéré (passagers, fret, avions). Ces données sont ensuite réparties sous forme de matrices.<br>La combinaison matricielle permet d'évaluer les résultats recherchés (capacité passagers, fret, avions…). |
| **Souplesse d'utilisation** | OPAL est un logiciel conçu pour pouvoir être utilisé facilement par toute personne ayant de bonnes notions en matière de Circulation Aérienne et de simulation. Les interfaces sont supposées être conviviales et sont proposées sous forme d'interfaces graphiques. |
| **Extensions possibles flexibilité** | Le projet OPAL est en cours de développement. Il entre dans sa phase de finalisation et de validation qui aurait dû être achevée en octobre 2002.<br>Par la suite, il sera possible d'intégrer d'autres logiciels à condition qu'ils puissent communiquer avec la plate-forme. |
| **Développement du modèle** | Il est développé conjointement par 16 partenaires de 7 pays européens différents (pour plus de détails cf. www.nlr.nl/public/hosted-sites/opal). Ce projet a été financé par la Commission Européenne (Directorate General for Transport and Energy) |

| | |
|---|---|
| **Distribution**<br>**Coût du logiciel**<br>**(licence et formation)** | Prix d'acquisition : non défini car pas encore commercialisé |
| **Contacts éventuels** | Contact : M. Van Eenige<br>Program Manager<br>National Aerospace Laboratory<br>NLR<br>opal@nlr.nl<br>www.nlr.nl/public/hosted-sites/opal |
| **Éléments d'évaluation** | OPAL présente l'avantage d'être un outil complet comportant différentes approches méthodologiques (analytique, simulation), et de couvrir l'ensemble des niveaux de détail. Son champ d'application couvre l'ensemble de l'aéroport (de l'aérogare à l'en route).<br>Il nécessite une grande expertise du fonctionnement d'un aéroport. La fiabilité des résultats dépend de celle des outils utilisés (cf. SIMMOD, TAAM).<br>OPAL n'est pas encore complètement développé. Son prix n'est pas défini. Ses points faibles sont ceux des outils présents. |

CBM : Cost Benefit Modeller
INM : Integrated Noise Model
MACAD : MANTEA Airfield Capacity and Delay
MACS : Macro Cargo Simulator
PAX/BAX : Passenger/baggage Flow Model
POWERSIM : System Dynamics Passenger Flow
SIMMOD : SIMulation MODel (Airport and Airspace Simmulator)
SLAM : Simple Landside Aggregate Model
TAAM : Total Airspace and Airport Modeller
TOPAZ : Traffic Organisation and Perturbation Analyser
TRIPAC : Third Party Risk Analysis Package for Aircraft Accidents around Airports
WITNESS : Passenger Flow Model

| LOGICIEL | **PAXSIM** |
|---|---|
| **Caractéristiques du logiciel** | Le logiciel PAXSIM est un model de simulation microscopique en temps accéléré. Il permet également de réaliser des simulations stochastiques ou statiques.<br>Il mesure des quantités de passagers et de bagages et l'ensemble des temps (parcours, attente, retards…). Il permet la gestion des flux de passagers et de bagages dans une aérogare. Les retards et temps d'attente obtenus permettent d'évaluer la limite de saturation du système. Il permet de détecter des problèmes de circulation des passagers et bagages dans l'aérogare et dans les systèmes de tri bagages en fonction d'un trafic réel. |
| **Champ d'application : zone aéroportuaire concernée** | L'aérogare<br>- flux de personnes (passagers)<br>- flux de bagages<br>- dispositifs divers (tapis roulants, P.I.F.,ascenseurs, escalators…) |
| **Données en entrées** | Nœuds et liens : la zone concernée par la simulation est modélisée à partir de nœuds et de liens, chacun possédant des caractéristiques (propres ou communes),<br>Zone de diffusion : des zones dans laquelle le passagers bouge d'un point à l'autre suivant une loi de diffusion (évite les autres passagers en déviant de trajectoire…)<br>Evénements : événements qui résultent du traitement des passagers et bagages dans le réseau de nœuds et de liens. Ils sont : les circulation, l'attente à une ressource… et sont mesurés.<br>Les données sont saisies par l'utilisateur ou peuvent être importées d'un fichier externe. |
| **Données en sortie** | PAXSIM fournit deux types de résultats :<br>une animation de scénarios en 3D (hall d'entrée, transport de bagages, comptoirs d'enregistrement…).<br>des résultats sous forme graphique.<br>Large éventail de statistiques sur les temps de parcours, et les quantités dont voici un exemple :<br>Aérogare<br>- Distance parcourue entre l'entrée et la sortie<br>- Temps des files d'attente<br>- Temps passé dans l'aérogare<br>- Temps passé au service<br>- Temps passé à d'autres activités dans le système<br>- Utilisation des appareils(ascenseurs, escalators, tapis roulants…) indiquant les variations des niveaux d'activité durant le temps de service |

| | |
|---|---|
| | - Nombre de passagers servis au total et en moyenne<br>- Longueur des files d'attente indiquant la durée d'attente à différents moments de la journée<br>- Paramètres critiques des files d'attente indiquant l'heure de pointe et la longueur maximale de la file d'attente<br>- Le nombre de passagers dans l'aérogare en fonction du temps<br>- Densité de passager dans des espaces définis en fonction du temps<br>- Nombre de passagers passant par des portails virtuels en fonction d'intervalles de temps<br>- Taux de collisions entre passagers à certains endroits définis du terminal en fonction du temps<br>Aéronefs<br>- Distribution de facteurs simulés en fonction de plusieurs variables : type d'avion, type de ligne aérienne, d'aéroport et de créneau horaire<br>- Distribution des décollages et des atterrissages en fonction de plusieurs variables : type d'avion, type de ligne aérienne, d'aéroport et de créneau horaire<br>- Distribution simulée des retards prévus en fonction de plusieurs variables : type d'avion, type de ligne aérienne, d'aéroport et de créneau horaire<br>- Distribution des durées de stationnement des avions en fonction de plusieurs variables : type d'avion, type de ligne aérienne, d'aéroport et de créneau horaire |
| **Fonctionnement du logiciel hypothèses principales** | Les aérogares sont modélisés à partir d'un système de nœuds, de liens et de zones de diffusion. Des propriétés sont affectées à chaque élément ou à des ensembles d'éléments.<br>Les passagers et bagages sont répartis en plusieurs groupes et chaque groupe a des caractéristiques différentes (vitesse, nombre de bagage,..). Ils suivent un cheminement défini par l'utilisateur le long des liens. A chaque instant, l'état général du système change : les passagers et bagages évoluent entre les nœuds sur les liens en fonction des caractéristiques définies au nœuds, aux liens et aux ressources afin de modéliser les paramètres opérationnels qui régissent les comportements des passagers et des ressources. |
| **Souplesse d'utilisation** | PaxSim est un outil complet nécessitant un effort d'apprentissage modéré. La maîtrise complète du logiciel requiert une formation d'une durée moyenne.<br>L'interface à disposition pour la modélisation est conviviale et intuitive. La détermination de chaque objet, attribut et ressource rend ces systèmes souples. Des ensembles de ressources peuvent être modélisés. La finesse de la modélisation peut donc être choisie. |

| | |
|---|---|
| **Extensions possibles flexibilité** | Le logiciel est conçu pour la simulation dans l'aérogare. Un lien statique avec le logiciel de simulation TAAM est à l'étude. |
| **Distribution** | La distribution du logiciel est assurée par la société PRESTON Aviation. Le prix catalogue d'acquisition est d'environ 250 000 €, mais dépend du nombre de licences. |
| **Contacts éventuels** | Ian SIMPSON<br>European Business Development Manager<br>Preston Aviation Solutions Ltd.<br>Golden Cross House<br>8 Duncannon Street<br>London<br>WC2N 4JF<br>United Kingdom<br>Email. ian.simpson@preston-aviation.co.uk<br>Tel. +44 207 484 5234<br>Fax. +44 207 484 4951<br>Mob. +44 7966 170255<br>e-mail : ian.simpson@preston-aviation.co.uk<br>Internet. http://www.preston.net/ |
| **Éléments d'évaluation** | PaxSim est un logiciel de simulation permettant une analyse fine et détaillée donnant des résultats précis comme des flux de passagers, de bagages, et des mesures de temps (temps d'attente, retards…). Il nécessite cependant une grande expertise du fonctionnement d'une aérogare. La fiabilité des résultats est en général qualifiée de bonne par les utilisateurs. Son point fort est sa facilité d'utilisation et la possibilité de définir des zones de diffusion du comportement des passagers.<br>Il n'y a pas la possibilité de simuler les accompagnants, ni les chariots à bagages. Le développement de la simulation des accompagnants est à l'étude. |

| LOGICIEL | **RAMS Plus (Reorganized ATC Mathematical Simulator)** |
|---|---|
| **Caractéristiques du logiciel** | RAMS Plus est un model de simulation microscopique en temps accéléré. Il permet également de réaliser des simulations stochastiques ou statiques. Il a été développé en langage C++.<br>Il mesure des quantités d'avions et l'ensemble des temps (parcours, attente, retards…). Les retards obtenus permettent d'évaluer la limite de saturation du système. Il permet de détecter des problèmes de circulation au sol et en l'air en fonction d'un trafic réel. Il permet par ailleurs d'évaluer la charge de travail des contrôleur pour une sectorisation donnée. |
| **Champ d'application : zone aéroportuaire concernée** | RAMS Plus est un simulateur « gate to gate ».<br>Le modèle comprend deux composants intégrés : RAMS Plus airside et RAMS Plus groundside.<br>Le premier couvre la partie En route et la zone aérienne terminale (TMA), et le second contient, outre la TMA, les système de piste(s), les voie de circulation et les postes de stationnement.<br>Il permet par ailleurs de modéliser les interactions entre plusieurs aéroports. |
| **Données en entrées** | Nœuds et liens : la zone concernée par la simulation est modélisée à partir de nœuds et de liens, chacun possédant des caractéristiques (propres ou communes).<br>Evénements : événements qui résultent du traitement des avions dans le réseau de nœuds et de liens. Ils sont : les vols, l'attente d'un vol… et sont mesurés. |
| **Données en sortie** | Large éventail de statistiques sur les retards, les temps de parcours, la charge de travail des contrôleurs.<br>Animations : interface graphique qui permet de visualiser la simulation. |
| **Fonctionnement du logiciel hypothèses principales** | Le ou les aéroports et l'espace aérien terminal sont modélisés à partir d'un système de nœuds et de liens. Des propriétés sont affectées à chaque élément ou à des ensembles d'éléments.<br>Les avions sont répartis en plusieurs groupes et chaque groupe a des caractéristiques différentes (distances d'atterrissage, vitesse d'approche,..). Ils suivent un cheminement défini par l'utilisateur le long des liens. A chaque instant, l'état général du système change : les avions évoluent entre les nœuds sur les liens en fonction des caractéristiques définies aux avions, au nœuds et aux liens afin de modéliser les paramètres opérationnels qui régissent les vols dans les zones considérées. |

| | |
|---|---|
| **Souplesse d'utilisation** | RAMS est un outil complet nécessitant un effort d'apprentissage modéré. La maîtrise complète du logiciel requiert une utilisation d'un mois environ.<br>L'interface à disposition pour la modélisation est conviviale et intuitive. |
| **Extensions possibles flexibilité** | Pas d'extension possible, puisque le logiciel intègre déjà l'ensemble des parties airside (simulateur gate to gate). Par contre, un couplage avec un simulateur d'aérogare peut être envisagé. |
| **Développement du modèle** | RAMS est un produit d'Eurocontrol à l'origine, son développement et sa maintenance sont assuré par la société ISA Software depuis 1996. |
| **Distribution**<br>**Coût du logiciel**<br>**(licence et formation)** | ISA Software<br>Il faut compter 10 000 euros pour la version « groundside », 17 500 euros pour la version « airside » et 25 000 euros pour les deux. Les mises à jour annuelles coûtent 30% du prix d'achat initial. |
| **Contacts éventuels** | ISA Software : Ian Crook<br>38, rue des gravilliers<br>75003 Paris<br>ian@isa-software.com |
| **Éléments d'évaluation** | RAMS est un logiciel de simulation permettant une analyse fine et détaillée donnant des résultats précis comme des flux d'avions, et des mesures de temps (temps d'occupation de piste, temps d'attente, retards…). Il nécessite cependant une grande expertise du fonctionnement d'un aéroport. La fiabilité des résultats est en général qualifiée de bonne par les utilisateurs. Ses points forts sont son faible prix, ses mises à jour fréquentes et la réponse rapide à des demandes particulières des utilisateurs.<br>La modélisation de la zone aérienne terminale est simplifiée (pas de générations de trajectoires) limitant la représentation des stratégies de contrôle. |

| LOGICIEL | **SIMMOD (SIMulation MODel)** |
|---|---|
| **Caractéristiques du logiciel** | SIMMOD est un model de simulation microscopique en temps accéléré. Il permet également de réaliser des simulations stochastiques ou statiques. (langage C ++ et le moteur de simulation est en SIMSCRIPT)<br>Il mesure des quantités d'avions et l'ensemble des temps (parcours, attente, retards…). Les retards obtenus permettent d'évaluer la limite de saturation du système. Il permet de détecter des problèmes de circulation au sol et en l'air en fonction d'un trafic réel |
| **Champ d'application : zone aéroportuaire concernée** | En route, zone aérienne terminale (TMA), système de piste(s), voie de circulation et parking<br>Il permet de modéliser les interactions entre plusieurs aéroports |
| **Données en entrées** | Node et link : la zone concernée par la simulation est modélisée à partir de nœuds et de liens, chacun possédant des caractéristiques (propres ou communes).<br>Event : événements qui résultent du traitement des avions dans le réseau de nœuds et de liens. Ils sont : les vols, l'attente d'un vol… et sont mesurés. |
| **Données en sortie** | Large éventail de statistiques sur les retards, les temps de parcours, la consommation de carburant<br>Animations : interface graphique qui permet de visualiser la simulation. |
| **Fonctionnement du logiciel Hypothèses principales** | La modélisation est composée de trois fichiers :<br>*Airspace* : définit les caractéristiques de la circulation aérienne<br>*Ground* : définit les caractéristiques de circulation au sol et des parkings<br>*Events* : définit le trafic<br>Le ou les aéroports et l'espace aérien sont modélisés à partir d'un système de nœuds et de liens. Des propriétés sont affectées à chaque élément ou à des ensembles d'éléments.<br>Les avions sont répartis en plusieurs groupes et chaque groupe a des caractéristiques différentes (distances d'atterrissage, vitesse d'approche,…). Ils suivent un cheminement défini par l'utilisateur le long des liens. À chaque instant, l'état général du système change : les avions évoluent entre les nœuds sur les liens en fonction des caractéristiques définies aux avions, aux nœuds et aux liens afin de modéliser les paramètres opérationnels qui régissent les vols dans les zones considérées. |
| **Souplesse d'utilisation** | SIMMOD est un outil complet nécessitant une grande expertise chez les utilisateurs. La maîtrise complète du logiciel requiert une formation importante des utilisateurs.<br>Deux versions sont disponibles :<br>une version dont l'interface « utilisateur » est assez pauvre et apporte assez peu d'éléments de diagnostics. Le codage se fait à partir de fichier texte,<br>les versions interfacées (SIMMOD) possèdent une interface homme machine afin d'entrée les données et d'interpréter les résultats. Ces interfaces intuitives avec menus déroulants facilitent l'utilisation du logiciel. |

| | |
|---|---|
| **Extensions possibles flexibilité** | Plusieurs logiciels ont été développés ou sont en cours de développpement à partir du moteur de simulation de SIMMOD :<br>SIMMOD + : interface de saisie des données et d'exploitation développée par ATAC et comprenant des améliorations du moteur de simulation,<br>PASSIM : interface de saisie des données et d'exploitation des résultats développée par Eurocontrol qui utilise le moteur de simulation de la version de base de SIMMOD, |
| | TotalAirportSim : logiciel développé par IATA intégrant le moteur de simulation SIMMOD comportant des améliorations et permettant de traiter l'ensemble de l'aéroport (en route, TMA, aire de manœuvre, aérogares),<br>TRACS : logiciel permettant de traiter l'ensemble de l'aéroport (en route, TMA, aire de manœuvre, aérogares) intégrant SIMMOD pour le côté piste et ARENA pour le côté ville. |
| **Développement du modèle** | Plusieurs sociétés privées développent des outils « améliorés » (cf. extension possible et flexibilité). ATAC a reçu un financement de la FAA pour améliorer le moteur de base. |
| **Distribution**<br>**Coût du logiciel**<br>**(licence et formation)** | Eurocontrol pour la version de base (gratuite) et PASSIM (gratuit mais le développement a été suspendu fin 2002).<br>ATAC pour la version de base (gratuite) et SIMMOD +. Il faut compter 5 950 $ pour une licence SIMMOD + et 18 % de plus par an pour avoir une mise à jour annuelle.<br>TransSolution propose des stages de formation sur SIMMOD. |
| **Contacts éventuels** | FAA : John Zinna<br>US department of transportation<br>Federal Aviation Authority<br>800 independance avenue, SW<br>Washington, DC 20591, USA<br>Tel : + 1 609 485 6330<br>john.zinna@faa.gov<br>Peter.crick@eurocontrol.int<br>ATAC : David Holl<br>VP Aviation Modelling Technology<br>ATAC corporation<br>757 N. Mary Avenue<br>Sunnyvale<br>CA94085, USA<br>Tel : + 1 408-736-2822<br>Fax : + 1 408-736-8447<br>davidholl@atac.com<br>IATA : cf. fiche sur Total Airport Sim |

| | |
|---|---|
| **Éléments d'évaluation** | SIMMOD est un logiciel de simulation permettant une analyse fine et détaillée donnant des résultats précis comme des flux d'avions, la consommation des avions et des mesures de temps (temps d'occupation de piste, temps d'attente, retards…). Il nécessite une grande expertise du fonctionnement d'un aéroport. La fiabilité des résultats est en général qualifiée de bonne par les utilisateurs. Ses points forts sont son faible prix, ses mises à jour continues par des utilisateurs et par ATAC (pour la version de base et SIMMOD +). Les utilisateurs se repartissent dans 30 pays des cinq continents. Il peut par ailleurs être connecté à INM. SIMMOD est également un atout en matière de communication (grâce à une visualisation très conviviale des projets).<br>Le point faible de la version de base est la complexité à utiliser des fichiers texte. Dans ce cas, la ressource devient importante. Par ailleurs, une formation sur le codage des données est nécessaire. La version interfacée évite ce problème et accélère et rend plus souple son utilisation.<br>La modélisation de la zone aérienne terminale est simplifiée limitant la représentation des stratégies de contrôle. |

| LOGICIEL | **TAAM (Total Airspace and Airport Modeller)** |
|---|---|
| **Caractéristiques du logiciel** | TAAM est un modèle de simulation microscopique en temps accéléré. Il permet également de réaliser des simulations stochastiques ou statiques.<br>Il peut être utilisé comme outil de planification aéroportuaire ou comme outil d'analyse et de faisabilité des concepts ATM. Il peut simuler la majorité des fonctions ATM en détail et peut également fournir des scénarios en « temps réel » pour des simulateurs ATC. |
| **Champ d'application : zone aéroportuaire concernée** | En route, zone aérienne terminale (TMA), système de piste(s), voie de circulation et parking<br>Il permet de modéliser les interactions entre plusieurs aéroports. |
| **Données en entrée** | Deux types de données d'entrée :<br>1. Les éléments graphiques entrés grâce à l'éditeur graphique Gtool tels que :<br>- la description du système aéroportuaire : pistes définies par l'axe de piste, les taxiways définis par les contours et des arcs entre deux nœuds (= intersection), les aires stationnement, les portes ou gates définis par des points, etc.<br>- la définition des routes et la sectorisation<br><br>2. Des éléments saisis par l'éditeur de données, IDIS concernant :<br>- les règles de contrôle du trafic aérien,<br>- le système de balises,<br>- des paramètres de détection et les tactiques de résolution de conflits,<br>- la stratégie d'utilisation des pistes, taxiways… (à l'aide de règles dynamiques sous la forme « if… then » engendrant des contraintes pour l'algorithme d'optimisation de trajectoire, et pouvant également modifier dynamiquement le comportement d'un avion en évolution)<br>- les turbulences de sillage,<br>- la sélection des SIDs et STARs,<br>- la programmation des vols (échantillon de trafic considéré),<br>- des données de performance avion (modèle tabulé, fourni dans TAAM)… |
| **Données en sortie** | Animations : interface graphique qui permet de visualiser la simulation.<br>TAAM fournit en sortie de simulation des graphiques relatifs aux indicateurs suivants :<br>- les retards,<br>- les conflits : comptage par degré de gravité, classement en conflits résolus ou pas,<br>- les mouvements d'aéroport, les opérations sur les pistes et les taxiways, les temps d'occupation de piste,<br>- la charge de trafic sur les routes, les secteurs, les balises…<br>- la consommation de carburant,<br>- les profils des avions,<br>- la charge de travail du contrôleur (en TMA ou en-route, pas possible au sol)… |

| | |
|---|---|
| | Plus généralement, on peut obtenir tout type de résultats numériques pouvant être établis à partir des fichiers « événements » de la simulation (= fichiers « rapport » générés par TAAM pendant la simulation, dans lesquels sont reportés de manière exhaustive tous les événements survenus à chaque avion). |
| **Fonctionnement du logiciel hypothèses principales** | Par défaut, TAAM génère une trajectoire 4D optimale du point de vue du pilote. Puis, en fonction des règles et des procédures qui ont été définies, TAAM modifie cette trajectoire, et fait évoluer les avions les uns en fonction des autres, en gérant les conflits, les files d'attentes, les allocations de portes…<br>L'architecture de TAAM peut être décomposée en 5 modules utilisables indépendamment :<br>2 modules de données en entrée : IDIS, éditeur de données et Gtool, outil graphique<br>1 module de traitement : TAAM, moteur de simulation<br>2 modules de données en sortie : RPF, générateurs de rapports (tableaux et courbes), et TAAM Viewer, interface graphique. |
| **Souplesse d'utilisation** | TAAM est un outil complet nécessitant une grande expertise chez les utilisateurs. La maîtrise complète du logiciel requiert une formation importante. Les interfaces sont supposées être conviviales, mais il est souvent nécessaire de développer des outils de pré- ou de post-processing pour pouvoir traiter un grand nombre de données. |
| **Extensions possibles flexibilité** | SimShow est une interface permettant de visualiser les simulations sous PC par exemple (affichage de type visu radar).<br>Globalement TAAM est un simulateur autonome dont la flexibilité est relativement limitée. |
| **Développement du modèle** | TAAM est développé par The Preston Group, une société de services australienne, qui fait maintenant partie du groupe Boeing, en coopération avec la CAA (Australian Civil Aviation Authority). Le programme a été écrit spécifiquement pour mettre en œuvre le modèle. Le code source n'est pas connu des utilisateurs et toute modification/amélioration doit être demandée à Preston. Les utilisateurs de TAAM se réunissent au moins 2 fois par an pour faire le point sur les modifications/corrections/améliorations qu'ils souhaitent voir apporter au logiciel, et les transmettre à Preston, qui tente d'y répondre selon ses moyens. |
| **Distribution Coût du logiciel (licence et formation)** | À titre d'exemple, sous certaines conditions, la licence de TAAM a été achetée par le SCTA en 1996 pour 2,10 MF et le coût de la maintenance est actuellement de 70 000 $ US/an. Des stages de formation sont organisés par Preston (à titre d'exemple, un stage de 2 semaines nous a été proposé à 9 500 €), ainsi que par certains utilisateurs (FS, Skyguide), ou consultants. |
| **Contacts éventuels** | Euroncontrol :<br>Louis Sillard<br>Centre Experimental d'Eurocontrol<br>BP15, 91 222 Brétigny sur Orge<br>Tel : 01 69 88 75 58<br>Fax : 07 69 88 72 11<br>louis.sillard@eurocontrol.int |

| | |
|---|---|
| | The Preston Group (Australian Office)<br>Phil Raftery<br>Service commercial<br>+61 (3) 9428 8899<br>www.preston.net |
| **Éléments d'évaluation** | TAAM est un logiciel de simulation permettant une analyse fine et détaillée donnant des résultats précis comme des flux d'avions, la consommation des avions et des mesures de temps (temps d'occupation de piste, temps d'attente, retards…). Il nécessite une grande expertise du fonctionnement d'un aéroport. La fiabilité des résultats est en général qualifiée de bonne par les utilisateurs. Son principal avantage est la richesse des résultats (qui permettent le choix d'un grand nombre d'indicateurs).<br>TAAM est également un atout en matière de communication (grâce à une visualisation très conviviale des projets). Les utilisateurs se repartissent sur les cinq continents. Il est utilisé par de nombreux services à travers le monde, qu'il s'agisse de fournisseurs de service ATC (FS, NATS, Skyguide…), de gestionnaires d'aéroports (AENA) ou de compagnies aériennes (FedEx, Delta…). Il peut par ailleurs être connecté à INM. Il nécessite une formation assez longue (de deux à quatre semaines).<br>En ce qui concerne les aspects négatifs, on peut souligner quelques limitations fonctionnelles du logiciel, notamment pour l'aspect « guidage radar » (différent des procédures standard) dont le mécanisme est très simplifié. Quelques difficultés sont également rencontrées pour le séquencement des avions à l'arrivée mais des améliorations sont en cours. Enfin, la procédure dite « alternate taxiway routing » n'est pas gérée par le logiciel.<br>Son prix d'acquisition est très élevé et l'utilisateur n'a pas accès aux fichiers sources du programme. Ses mises à jour sont donc limitées à celles que The Preston Group accepte de faire. |

| LOGICIEL | **TOTAL AIRPORT SIM** |
|---|---|
| **Caractéristiques du logiciel** | Total AirportSim est un modèle de simulation microscopique en temps accéléré et temps réel. Il permet également de réaliser des simulations stochastiques ou statiques.<br>Il peut être utilisé comme outil de planification ou comme outil d'analyse. |
| **Champ d'application : zone aéroportuaire concernée** | En route, zone aérienne terminale (TMA), système de piste(s), voie de circulation et parking, aérogare(s) (ou parties d'aérogares).<br>Il permet de modéliser les interactions entre plusieurs aéroports. |
| **Données en entrées** | Node et link : les infrastructures et les procédures sont modélisées à partir de nœuds et de liens, chacun possédant des caractéristiques (propres ou communes)<br>Event : type d'avion, de passagers, destination, n° de vol, routes, parking |
| **Données en sortie** | Animations : interface graphique qui permet de visualiser la simulation.<br>Large éventail de statistiques sur les retards, les temps de parcours, la consommation de carburant. Les données du fichier de résultat sont compatibles avec INM 6.x. Les données en entrée de liens et de nœuds sont transformées en données INM. |
| **Fonctionnement du logiciel hypothèses principales** | Le logiciel est composé de trois modules :<br>- module « flux d'avions »,<br>- module « gate »,<br>- module « flux de passagers ».<br>Le principe de la simulation de chacun des modules est le même que celui de SIMMOD (cf. fiche d'analyse de SIMMOD) : les éléments (avions ou passagers) évoluent sur les liens et aux nœuds en fonction de leurs caractéristiques, et des procédures retenues aux liens et aux nœuds.<br>Le module « gate » permet de gérer le transfert des passagers de et vers les avions. |
| **Souplesse d'utilisation** | Total Airport Sim est un outil complet nécessitant une grande expertise chez les utilisateurs. La maîtrise complète du logiciel requiert une formation importante. Les interfaces sont supposées être conviviales et sont proposées sous forme de menus déroulant. |
| **Extensions possibles flexibilité** | Pas d'extension possible, puisque le logiciel intègre déjà l'ensemble des parties de l'aéroport. |
| **Développement du modèle** | Il est développé conjointement par IATA et Lti. Le programme a été écrit spécifiquement pour mettre en œuvre le modèle et constitue une amélioration de celui de SIMMOD. Le code source est connu et est similaire à celui de SIMMOD si bien que Total Airport Sim est compatible avec SIMMOD 2.3. |

| | |
|---|---|
| **Distribution**<br>**Coût du logiciel**<br>**(licence et formation)** | Il est développé conjointement par IATA et Lti.<br>Prix d'acquisition : 150 000 euros. |
| **Contacts éventuels** | Chris Mirfin<br>Assistant Director<br>Airport Consultancy Services<br>International Air Transport Association<br>800 place Victoria, PO Box 113<br>Montreal, Quebec, Canada H4Z 1M1<br>Tel : 1 (514) 874 0202<br>Fax : 1 (514) 874 2662<br>airportdev@iata.org |
| **Éléments d'évaluation** | Total AiportSim est un logiciel de simulation permettant une analyse fine et détaillée donnant des résultats précis comme des flux d'avions, la consommation des avions et des mesures de temps (temps d'occupation de piste, temps d'attente, retards…). Il nécessite une grande expertise du fonctionnement d'un aéroport. La fiabilité des résultats est en général qualifiée de bonne par les utilisateurs. Outre la richesse des résultats (qui permettent le choix d'un grand nombre d'indicateurs), son principal avantage est la modélisation des aérogares avec la continuité des données de trafic avec les aires de stationnement permettant une analyse du lien entre les aérogares et l'aire de mouvements. Il permet aussi la simulation temps réel.<br>Total AirportSim est également un atout en matière de communication (grâce à une visualisation très conviviale des projets). Les utilisateurs se repartissent sur les cinq continents. Il est notamment utilisé par le service d'études de l'IATA. Il peut par ailleurs être connecté à INM. Il nécessite une formation assez longue (de deux à quatre semaines).<br>Son prix d'acquisition est élevé. |

| LOGICIEL | **OUTILS GÉNÉRALISTES DE SIMULATION** |
|---|---|
| **Caractéristiques du logiciel** | Les outils généralistes de simulation sont des logiciels de simulation dynamique en temps accéléré et ont été développés afin de simuler les processus de production de n'importe quel type. Ils répondent aux problématiques de la productique et peuvent être utilisés pour la modélisation d'aéroport.<br>Ils permettent de réaliser des simulations stochastiques ou statiques.<br>Ce sont des outils microscopiques (niveau de détails élevé).<br>Ils peuvent être utilisés comme outil de planification ou comme outil d'analyse. |
| **Champ d'application : zone aéroportuaire concernée** | Simulation de la totalité du système de trafic aérien :<br>- aérogares,<br>- Aires de stationnement,<br>- Taxiways,<br>- Piste(s) et zone d'approche finale,<br>- Espace aérien terminal et en-route. |
| **Données en entrée** | Deux types de données d'entrée :<br>- les caractéristiques physiques du système (dessin du circuit),<br>- détermination des attributs des objets (avions, passagers, fret, bagages…) :<br>1. vitesse,<br>2. nombre,<br>3. principes de gestion.<br>- caractéristiques générales (durée de la simulation…).<br>Tout objet peut être créé et défini. |
| **Données en sortie** | Visualisation de la simulation<br>Plus généralement, on peut obtenir tout type de résultats numériques pouvant être établis à partir des fichiers « événements » de la simulation, dans lesquels sont reportés de manière exhaustive tous les événements survenus à chaque objet |
| **Fonctionnement des logiciels hypothèses principales** | Leur principe d'utilisation est celui d'un flow chart, qui permet d'organiser et d'assembler des ressources, pouvant être organisées en bibliothèque, et s'appropriant des entités en entrée. Plus concrètement, le processus de traitement des objets est décomposé en tâches élémentaires, chacune d'entre elles pouvant être modélisée. Les ressources induisent des actions (assemblages, changement de propriétés des entités…) du type « cease », « delay », « release » (c'est-à-dire « octroi d'une ressource à une entité pour un traitement de X minutes puis libération de cette ressource »). Les entités sont créées par l'utilisateur qui définit leurs propriétés.<br>Vocabulaire :<br>- Objet ou entité = passager ou bagage, chaque entité pouvant avoir différentes propriétés ou « attributs »<br>- attribut = classe, destination, n°de vol, nombre de bagages (si l'entité est un passager)<br>- ressource = banque d'enregistrement, PIF, manutentionnaire, etc.<br>Ce fonctionnement nécessite : |

| | |
|---|---|
| | - génération de nombres aléatoires nécessaires pour les simulations,<br>- gestion du temps de la simulation,<br>- évolution du système pas à pas en notant les états de chaque objet qui réagit dans le système modélisé en fonction de ses attributs,<br>- gestion par file d'attente,<br>- enregistrement pas à pas de chaque événement et d'état des objets,<br>- module d'analyse et de représentation des résultats,<br>- module d'optimisation des flux par variation de paramètres choisis |
| **Souplesse d'utilisation** | La détermination de chaque objet, attribut et ressource rend ces systèmes souples. Des ensembles de ressources peuvent être modélisés. La finesse de la modélisation peut donc être choisie. Une grande finesse nécessite en général une bonne connaissance du domaine aéroportuaire, une analyse permettant de déterminer les attributs des objets et des ressources, et donc beaucoup de temps. |
| **Extensions possibles flexibilité** | Ces logiciels peuvent être compatibles avec d'autres logiciels tels que AUTO CAD, Excel… Des modules complémentaires sont parfois proposés (représentation 3D…). Des catalogues d'objets peuvent être commandés aux développeurs. |
| **Liste et distribution de ces logiciels** | ARENA — SEGULA<br>Tel : 04 37 49 61 00<br>www.segula.fr<br>AUTOMOD — simcore<br>Tel : 04 47 78 53 53<br>simcore@simcore.com<br>www.simcore.com<br>eMPlant (anciennement SIMPLE ++) — Tecnomatix<br>Tel : 01 34 58 24 00<br>info@tecnomatix.com<br>www.tecnomatix.com<br>FLOWSIM — NOVAL conseil<br>Tel : 04 72 53 98 78<br>contac@noval.fr<br>www.noval.fr<br>WITNESS — Lanner Group<br>Tel : 01 45 70 57 51<br>www.lanner.fr |
| **Éléments d'évaluation** | Ces logiciels sont des outils très fins, qui nécessitent par conséquent une validation solide. Leur avantage est aussi la richesse des résultats (qui permettent le choix d'un grand nombre d'indicateurs).<br>Ils constituent également un atout en matière de communication (grâce à une visualisation très conviviale des projets). |

# Annexe 7

## Exemple de ratios détaillés

(tous les paramètres n'ont pas été pris en compte) source : IATA

| | |
|---|---|
| **DEPARTURES KERB** | |
| a = peak hour number of ORIGINATING passengers | 1,000 |
| p = proportion of passengers using car/taxi | 0,700 |
| tn = average number of passengers per car/taxi | 1,700 |
| l = average kerb length required per car/taxi (mètres) | 6,500 |
| t1 = average departure kerb occupancy time per car/taxi (minutes) | 1,500 |
| **L = (a*p*l*t1)/(60*n)** | **0,067 mètres linéaires** |
| **DEPARTURES CONCOURSE** | |
| a = peak hour number of ORIGINATING passengers | 1,000 |
| b = number of TRANSFER passengers NOT processed airside | |
| t2 = average occupancy time per passenger/visitor (minutes) | 25,000 |
| s = space required per person (square metres) | 1,250 |
| o = number of visitors per passenger | 1,200 |
| **A = s * (t2/60) *3 *(a*(1 + o) + b)/2** | **1,719 mètres carrés** |
| **CHECK-IN DESKS (CENTRALIZED, COMMON CHECK-IN)** | |
| a = peak hour number of ORIGINATING passengers | 1,000 |
| b = number of TRANSFER passengers NOT processed airside | - |
| t3 = average processing time per passenger (minutes) | 1,500 |
| **N = (a + b) * t3/60** | **0,025** |
| **QUEUEING AREA — CHECK-IN** | |
| a = peak hour number of ORIGINATING passengers | 1,000 |
| b = number of TRANSFER passengers NOT processed airside | |
| s = space required per passenger (square metres) | 1,500 |
| **A = s * (20/60)*((3*(a + b)/2)- (a + b) = (s*(a + b)) / 6** | **0,250 mètres carrés** |
| **PASSPORT CONTROL — DEPARTURES** | |
| a = peak hour number of ORIGINATING passengers | 1,000 |
| b = number of TRANSFER passengers NOT processed airside | |
| t4 = average processing time per passenger (minutes) | 0,500 |
| N **= ((a + b) * t4)/60** | **0,008 positions** |
| **DEPARTURE LOUNGE** | |
| (excluding concessions except bar/snack bar facilities) | |
| c = peak hour number of DEPARTING passengers | 1,000 |
| u = average occupancy time per long-haul passenger (minutes) | |
| v = average occupancy time per short-haul passenger (minutes) | 30,000 |
| i = proportion of long-haul passengers | |
| k = proportion of short-haul passengers | 1,000 |
| s = space required per passenger (square metres) | 2,000 |

| | | |
|---|---|---|
| **A = s * c * (u*i + v*k)/60** | | **1,000 mètres carrés** |
| **SECURITY CHECK — CENTRALIZED** | | |
| a = peak hour number of ORIGINATING passengers | | 1,000 |
| b = peak hour number of TRANSFER passengers NOT processed airside | | |
| x = capacity of X-ray Hand Baggage Unit (pcs./hour) | | 400,000 |
| w = number of hand baggage items per passenger | | 2,000 |
| **N = ((a + b) * w)/x** | | **0,005 nombre de contrôle** |
| **SECURITY CHECK — GATE HOLD ROOM** | | |
| m = maximum number of seats on largest aircraft handled at the gate | | 1,000 |
| x = capacity of X-ray Hand Baggage Unit (pcs./hour) | | 400,000 |
| w = number of hand baggage items per passenger | | 2,000 |
| g = time of arrival of first passenger at gate hold room (mins. before STD) | | 50,000 |
| h = time last passenger should board (mins. before STD) | | 5,000 |
| **N = (60 * m * w)/(x * (g-h)** | | **0,007 positions** |
| **GATE HOLD ROOMS** | | |
| (excluding concessions except bar/snack bar facilities) | | |
| m = maximum number of seats on largest aircraft handled at the gate | | 420,000 |
| s = space required per passenger (square metres) | | 2,000 |
| **A = m * s** | | **840,000 mètres carrés** |
| **ARRIVALS HEALTH CHECK** (where required) | | **10,000** |
| t5 = average service time per passenger (minutes) | | 0,170 |
| z = maximum number of seats on largest aircraft handled at the airport | 540,000 | |
| T = Time clearance to process the largest aircraft handled at airport | | 30,000 |
| **N = z * t5/T** | | **3,060** |
| **PASSPORT CONTROL — ARRIVAL** | | |
| d = peak hour number of TERMINATING passengers | | 1,000 |
| b = number of TRANSFER passengers NOT processed airside | | - |
| t6 = average processing time per passenger (minutes) | | 0,500 |
| **N = ((d + b) * t6)/60** | | **0,008 positions** |
| **QUEUEING AREA — PASSPORT CONTROL — ARRIVAL** | | |
| d = peak hour number of TERMINATING passengers | | 1,000 |
| b = number of TRANSFER passengers NOT processed airside | | - |
| s = space required per passenger (square metres) | | 1,000 |
| **A = s * 15/60*((4*(d*b)/2- (d + b))** | | **0,250 Mètres carrés** |
| 50 % of peak hour number of passengers arrive within the first 10 minutes | | |
| **A = s * 10/60*((4*(d*b)/2- (d + b))** | | **0,333 Mètres carrés** |

| | |
|---|---|
| 50 % of peak hour number of passengers arrive within the first 20 minutes | |
| **A = s * 20/60*((4*(d*b)/2- (d + b))** | **0,167** |
| | **Mètres carrés** |
| **BAGGAGE CLAIM AREA (excluding claim devices)** | |
| e = peak hour number of TERMINATING passengers, including | 1,000 |
| INTERNATIONAL/DOMESTIC TRANSFER passengers, where applicable | |
| t7 = average occupancy time per passenger (minutes) | 30,000 |
| s = space required per passenger (square metres) | 1,800 |
| **A = e * t7 * s/60** | **0,900** |
| | **Mètres carrés** |
| **ARRIVAL CUSTOMS** | |
| e = peak hour number of TERMINATING passengers, including | 1,000 |
| INTERNATIONAL/DOMESTIC TRANSFER passengers, where applicable | |
| f = proportion of passengers to be customs checked | 0,250 |
| t8 = average processing time per passenger (minutes) | 1,500 |
| N = e * f * t8/60 | 0,006 |
| | positions |
| **QUEUEING AREA — ARRIVALS CUSTOMS** | |
| e = peak hour number of TERMINATING passengers, including | 1,000 |
| INTERNATIONAL/DOMESTIC TRANSFER passengers, where applicable | |
| f = proportion of passengers to be customs checked | 0,250 |
| s = space required per passenger (square metres) | 1,500 |
| 50 % of peak hour number of passengers arrive within the first 10 minutes | |
| **A = f*s*10/60*(3*e/2-e) = f*s*e/12** | **0,031** |
| | **Mètres carrés** |
| 50 % of peak hour number of passengers arrive within the first 15 minutes | |
| **A = f*s*15/60*(3*e/2-e) = f*s*e/8** | **0,047** |
| 50 % of peak hour number of passengers arrive within the first 20 minutes | |
| **A = f*s*20/60*(3*e/2-e) = f*s*e/6** | **0,063** |
| | **Mètres carrés** |
| **NUMBER OF BAGGAGE CLAIM DEVICES** | |
| e = peak hour number of TERMINATING passengers, including | 1,000 |
| INTERNATIONAL/DOMESTIC TRANSFER passengers, where applicable | |
| q = proportion of passengers arriving by wide-body aircraft | 0,200 |
| r = proportion of passengers arriving by narrow-body aircraft | 0,800 |

| | |
|---|---|
| t9 = average claim device occupation time per wide-body aircraft (minutes) | 45,000 |
| t10 = average claim device occupation time per narrow-body aircraft (minutes) | 20,000 |
| Nwb = number of passengers per wide-body aircraft at 80 % load factor | 320,000 |
| Nnb = number of passengers per narrow-body aircraft at 80 % load factor | 100,000 |
| **Wide-body aircraft : N = (e * q * t9)/(60 * Nwb)** | **0,0005** |
| **Required claim length : 50 — 65 ml** | **devices** |
| **Narrow-body aircraft : N = (e * r * t10)/(60 * Nnb)** | **0,003** |
| **Required claim length : 30 — 40 ml** | **devices** |
| **ARRIVALS CONCOURSE WAITING AREA** | |
| (excluding concessions) | |
| d = peak hour number of TERMINATING passengers | 1,000 |
| b = number of TRANSFER passengers NOT processed airside | - |
| t11 = average occupancy time per passenger (minutes) | 5,000 |
| t12 = average occupancy time per visitor (minutes) | 30,000 |
| S = space required per person (square metres) | 1,500 |
| o = Number of visitors per passenger | 1,200 |
| **A = s * ((t11 * (d + b)/60) + (t12 * d * o)/60))** | **1,025** |
| | **Mètres carrés** |
| **ARRIVALS KERB** | |
| d = peak hour number of TERMINATING passengers | 1,000 |
| p = proportion of passengers using car/taxi | 0,600 |
| n = average number of passengers per car/taxi | 1,700 |
| l = average kerb length required per car/taxi (metres) | 6,500 |
| t13 = average arrival kerb occupancy time per car/taxi (minutes) | 1,500 |
| **L = (d * p * l * t13)/(60 * n)** | **0,057** |
| | **mètres linéaires** |

| Description des variables | symbole |
|---|---|
| Nombre de passagers LOCAUX AU DÉPART en heure de pointe | **a** |
| Nombre de passagers EN CORRESPONDANCE non enregistrés en heure de pointe | **b** |
| Nombre de passagers AU DÉPART (LOCAUX + CORRESPONDANCE) en heure de pointe | **c** |
| Nombre de passagers LOCAUX À L'ARRIVÉE en heure de pointe | **d** |
| Nombre de passagers LOCAUX À L'ARRIVÉE et en CORRESPONDANCE INTERNATIONAL/DOMESTIQUE en heure de pointe | **e** |
| Proportion de passagers devant subir un contrôle douanier | **f** |
| Temps entre l'arrivée du premier passager et la clôture de l'embarquement | **g** |
| Temps entre l'arrivée du dernier passager et la clôture de l'embarquement | **h** |
| Proportion de passagers long-courrier pendant l'heure de pointe AU DÉPART (LOCAUX + CORRESPONDANCE) | **i** |
| Proportion de passagers court -courrier pendant l'heure de pointe AU DÉPART (LOCAUX + CORRESPONDANCE) | **k** |
| Longueur moyenne de parvis nécessaire, par véhicule particulier ou taxi, en mètres linéaires | **l** |
| Nombre maximal de sièges du plus gros avion que l'on puisse traiter à la porte considérée | **m** |
| Nombre moyen de passagers par v.p. ou taxi | **n** |
| Nombre d'accompagnant :<br>a) passager LOCAL AU DÉPART<br>b) passager LOCAL À L'ARRIVÉE | **o** |
| Proportion de passagers utilisant v.p./taxi :<br>a) au départ<br>b) à l'arrivée | **p** |
| Proportion de passagers À L'ARRIVÉE débarquant d'un gros-porteur pendant l'heure de pointe | **q** |
| Proportion de passagers À L'ARRIVÉE débarquant d'un petit/moyen porteur pendant l'heure de pointe | **r** |
| Espace requis par personne (passager ou accompagnant) (en mètres carrés) | **s** |
| Temps nécessaire pour traiter le plus gros avion fréquentant l'aéroport (minutes) | **T** |
| Durées moyennes de traitement ou d'occupation/minutes | |
| Durée moyenne d'occupation du parvis départ par v.p./taxi | **t1** |
| Durée moyenne d'occupation par passager/accompagnant | **t2** |
| Durée moyenne d'enregistrement au départ | **t3** |
| Durée moyenne de contrôle de passeport au départ | **t4** |
| Durée moyenne du contrôle de santé à l'arrivée | **t5** |
| Durée moyenne de contrôle de passeport à l'arrivée | **t6** |
| Durée moyenne d'occupation de la zone livraison-bagages | **t7** |
| Durée moyenne de contrôle de passeport à l'arrivée | **t8** |
| Durée moyenne d'occupation de tapis bagage (gros porteur) | **t9** |
| Durée moyenne d'occupation de tapis bagage (moyen porteur) | **t10** |
| Durée moyenne d'occupation du hall arrivée par passager | **t11** |
| Durée moyenne d'occupation du hall arrivée par accompagnant | **t12** |
| Durée moyenne d'occupation du parvis arrivée par v.p./taxi | **t13** |
| Durée moyenne d'occupation de la salle d'embarquement par :<br>a) passager long-courrier<br>b) passager court-courrier | <br>**u**<br>**v** |
| Nombre de bagages à main par passager | **w** |
| Capacité d'une unité de rayons X pour bagages à main (en bagages par heure) | **x** |
| Nombre maximal de sièges du plus gros avion que l'on puisse traiter sur cet aéroport | **z** |

# Annexe 8

## Bibliographie


Airport capacity benchmark reprot 2001, rapport, FAA and MITRE/CAASD, avril 2001,

Airside capacity enhancement implementetion manual, Eurocontrol, edition 1, octobre 2003,

Aiport operations glossary of commonly used terminology, information paper, Eurocontrol,

Airport system capacity - strategic choices, TRB, special report 226, 1990,

Choix des simulateurs de trafic pour réaliser une étude de circulation aérienne, mémoire de fin d'étude, ENAC, Laurent Laugier, juillet 2001,

ECAC APATSI manual on mature air traffic control procedures, ECAC, février 1997,

Enhancing airside capacity - The complete guide, Eurocontrol, edition 2, septembre 2003,

Etudes sur les contraintes à la croissance, CEAC et Eurocontrol, mars 2001,

Eurocontrol manual for airspace planning, Eurocontol, edition 3, octobre 2003,

European database of major airports in the ECAC states, rapport, Eurocontrol, édition 1998, décembre 1999,

Guidelines on runway capacity enhancement, G De Clercq, Eurocontrol, novembre 2001,

Heures de pointe, STBA, février 1981,

La capacité aéroportuaire, STBA, octobre 1986,

La capacité aéroportuaire - les défis pour l'avenir, CEAC, avril 1999,

Maximising runway capacity, Airports International, avril 2003,

Méthode d'évaluation des besoins en poste de stationnement - application à Toulouse-Blagnac, mémoire de fin d'études, ENAC, Jérôme Petitjean, septembre 1998,

OPAL: optimisation platform for airports, including landside, article, MJA van Eenige, International airport review, volume 6 issue 3, 2002,

OPS 1, arrêté du 12 mai 1997 relatif aux conditions techniques d'exploitation d'avions par une entreprise de transport aérien public, SIA, 2e édition, septembre 1998,

OPTAS B - rapport final, Red Scientific-Airsys ATM-Flughafen Franfurt-Main, CEAC, mai 2000,

Planning and design of airports, R Horonjeff, McGraw-Hill, 2e édition, 1975,

Réglementation de la Circulation Aérienne - Procédures aux organismes rendant les services de la circulation aérienne aux aéronefs de la circulation aérienne générale (RCA3), DGAC, mai 1997,

WPR1.2 Global MSR (Model and Simulation Representation) studies - Part 2: review of available techniques/facilities - MUFTIS, rapport, CEAC, JM Gouweleeuw, AJ Hughes, JL Mann, AR Odoni, K Zografos, mars 1996.

**Conception :** STAC/SINA groupe Documentation et diffusion des connaissances
**Photos de couverture :** Aéroport de Paris-Charle-de-Gaulle
Photographie Graphix Images/V. PAUL
**Impression :** atelier de reprographie du STAC
**Prix de vente :** 43 €

**Novembre 2005**

dgac

direction générale
de l'Aviation civile

**service technique
de l'Aviation civile**

31, avenue du Maréchal Leclerc
94381 Bonneuil-sur-Marne cedex
téléphone : 01 49 56 80 00
télécopie : 01 49 56 82 19
www.stac.aviation-civile.gouv.fr

ISBN 2-11-094291-6

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

ministère
des Transport
de l'Équipem
du Tourisme
et de la Mer