

Direction
générale de
l'Aviation
civile

Service
technique de
l'Aviation civile

Juillet 2018

La capacité aéroportuaire

Guide technique



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE



Ministère de la Transition Écologique et Solidaire

www.stac.aviation-civile.gouv.fr

STAC

La capacité aéroportuaire

Guide technique

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

Rédacteurs:

Roland DEROO MASSON

Chef de Projet Modélisation et Simulation

Alexandre GAMA

Chef de Projet Modélisation et Simulation

Roland Deroo Masson et Alexandre Gama sont tous les deux chefs de projets au sein de la division Sécurité et Capacité des Aéroports. Ils fournissent leur expertise dans le domaine de la simulation et de la capacité aéroportuaire à différents partenaires institutionnels ou industriels.

Roland Deroo Masson, ingénieur des travaux publics de l'État a rejoint le STAC après une année de spécialisation dans le domaine de l'aide à la décision au Conservatoire National des Arts et Métiers et une mission au sein du programme CDM de l'aéroport de Paris Charles de Gaulle.

Alexandre Gama également ingénieur des travaux publics de l'État a rejoint le STAC après avoir mené des travaux de recherches liés à l'intégration des problématiques environnementales dans les outils de simulation aéroportuaire. Il possède une grande connaissance de la mécanique du vol possédant lui-même une qualification de vol aux instruments.

En complément de leurs activités d'expertise, ils sont tous les deux experts internationaux et représentent la DGAC à la fois au sein des organisations internationales (OACI, EUROCAE), et dans des entités qui fédèrent les utilisateurs d'outils de simulation aéroportuaire en Europe et dans le monde.



Résumé

Avec l'accroissement continu du trafic aérien mondial depuis plusieurs décennies (3,7 milliards de passagers transportés en 2016 dans le monde), la problématique de la capacité du réseau et donc des infrastructures qui le constituent devient un enjeu majeur. Sans une politique d'accompagnement de cette croissance, la saturation de l'ensemble du système est inévitable à terme.

L'objectif de cet ouvrage est d'aborder la question de la capacité d'un aéroport en le considérant dans son ensemble comme un système complexe. Ce guide couvre la définition même de la notion, traite des éléments l'influençant, et présente des méthodes disponibles pour l'évaluer et des moyens pouvant être mis en œuvre pour l'améliorer.

Mots-clés

Capacité, aéroport, aérogare, capacité opérationnelle, capacité soutenable, capacité maximale, qualité de service, évaluation de la capacité, amélioration, simulation, outils analytiques

Summary

With the continuous increase in global air traffic over the last few decades (3.7 billion passengers transported in 2016 worldwide), the problem of the network's capacity and therefore its infrastructure has become a major challenge. Without a policy to accompany this growth, the saturation of the entire system is inevitable in the long run.

The objective of this guide is to address the question of airport's capacity by considering it as a whole complex system. This guide covers the definition of the concept itself, then discusses the elements that influence it, and presents the methods available to evaluate it and the means that can be implemented to improve it.

KEYWORDS

Capacity, airport, terminal, operational capacity, sustainable capacity, maximal capacity, level of service, capacity assessment, improvements, simulation, analytical tools

Préface

La capacité aéroportuaire a été le fil rouge de toute ma carrière dans l'aviation civile. Le sujet est devenu dominant lorsque le trafic aérien a pris un nouvel essor à la fin des années 1980 après quinze années de quasi-stagnation dues aux chocs pétroliers de 1973 et 1979.

Auparavant la capacité aéroportuaire était une affaire de techniciens spécialistes des infrastructures ou du contrôle aérien; la saturation du trafic aérien en 1988 a mis en lumière les dimensions économiques, sociétales et environnementales, donc politiques de la capacité aéroportuaire.

Cela a été particulièrement ressenti en Europe où la Conférence Européenne de l'Aviation Civile a lancé le programme APATSI (Airport Air Traffic System Interface) pour réduire la congestion sur et autour des aéroports.

Dans le cadre de ce programme ont été créés l'observatoire européen des retards, une banque de données des capacités actuelles et futures des 100 plus grands aéroports européens et des groupes de travail pour améliorer les procédures d'exploitation, pousser les innovations, échanger les bonnes pratiques, tout un ensemble précurseur avec la CFMU du Gestionnaire de Réseau (Network Manager) européen actuellement en vigueur.

C'est à cette époque qu'ont été conçus les concepts HIRO, AMAN, DMAN actuellement déployés sur les grands aéroports, normalisé le système A-SMGCS qui sont présentés dans ce manuel, et imaginés les Local Runway Capacity Team préfigurateurs du concept A-CDM.

J'ai pris conscience comme directeur de ce programme, au travers des multiples échanges avec tous les acteurs du transport aérien, de la difficulté que ces derniers avaient à se comprendre lorsqu'ils évoquaient la capacité aéroportuaire et les moyens de l'augmenter du fait de leurs différents points de vue et horizons temporels.

Le manuel réalisé par le Service Technique de l'Aviation Civile (STAC) est le premier document, au niveau international depuis 30 ans, à présenter la problématique de la capacité dans toute sa globalité. Il y parvient en abordant la capacité du système complexe qu'est un aéroport sous l'angle du service rendu, et de la qualité de ce service, aux usagers, aux opérateurs et aux gestionnaires privés et institutionnels.

Il détaille ensuite les divers aspects et les moyens d'évaluation et d'amélioration de façon claire et simple. Il est un outil de référence précieux à la mise en place d'une gestion collaborative et harmonieuse de la capacité aéroportuaire à court, moyen et long terme.

J'ai pris un plaisir ineffable à le lire et à rédiger cette préface et vous souhaite une bonne lecture.

Jean-Louis **PIRAT**

Sommaire

Préface	4
Introduction	8
1. Capacité aéroportuaire : problématique et définition	9
1.1. Problématique	9
1.2. Définition systématique d'un aéroport	10
1.3. Définitions « standardisées » de la capacité	12
1.3.1. Éléments de vocabulaire	12
1.3.2. Définitions retenues	12
1.3.3. Champ d'application des définitions	15
1.4. Contexte réglementaire	15
1.4.1. Limitation des nuisances aéroportuaires	15
1.4.2. Procédure de coordination ou de facilitation	15
1.5. Le rôle de chacun sur les questions de capacité	18
2. Qualité de service, définition et impact sur la Capacité	20
2.1. Qualité de service dans les aérogares	21
2.2. Qualité de service côté avion	22

3. Facteurs d'influence de la capacité aeroportuaire	23
3.1. Les facteurs d'influence directe	23
3.1.1. Infrastructure	23
3.1.2. Trafic	24
3.1.3. Les procédures	26
3.2. Les facteurs d'influence indirecte	26
3.2.1. Contexte économique et stratégique	27
3.2.2. Facteurs environnementaux	29
3.2.3. Cadre réglementaire	30
3.2.4. Cadre technologique	30
3.2.5. Facteurs humains	31
3.3. Paramètres de base du calcul de la capacité	32
3.3.1. Côté avion	32
3.3.2. Côté aérogare	33
4. Évaluation de la capacité d'une infrastructure	34
4.1. Besoins et types d'études	34
4.2. Méthodologie générale	35
4.3. Données	37
4.4. Indicateurs	38
4.5. Scénarios	39
4.6. Outils analytiques et simulation	39
4.6.1. Les outils analytiques	39
4.6.2. Simulation en temps accéléré	42
4.6.3. La simulation en temps réel	44
4.7. Résultat	45

5. Méthodes d'amélioration de la capacité	47
5.1. Les améliorations procédurales	47
5.1.1. RECAT-EU	47
5.1.2. Point Merge	49
5.1.3. HIRO	50
5.1.4. Facilitation à l'inspection filtrage	50
5.2. Les améliorations systèmes	51
5.2.1. Time-Based Separation et Pair-Wise Separation	51
5.2.2. Norme radar	52
5.2.3. Arrival Manager et Departure Manager	52
5.2.4. Contrôles des passagers	54
5.3. Les améliorations d'infrastructures	55
5.4. Un exemple d'application : l'aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle	56
Récapitulatif	59
Glossaire	60
Annexe 1 : Bibliographie/Littérature conseillée	62
Annexe 2 : Exemples de calcul analytiques	63
Exemple 1 : Capacité piste	63
Exemple 2 : Capacité d'une zone d'enregistrement	66
Exemple 3 : Capacité d'une aire de stationnement	67

Introduction

Avec l'accroissement continu du trafic aérien mondial depuis plusieurs décennies (3,7 milliards de passagers transportés en 2016 dans le monde), la problématique de la capacité du réseau et donc des infrastructures qui le constituent devient un enjeu majeur. Sans une politique d'accompagnement de cette croissance, la saturation de l'ensemble du système est inévitable à terme.

Cette politique d'accompagnement se traduit à la fois par le développement des infrastructures, des systèmes utilisés et des procédures d'exploitation. L'objectif est double : il s'agit non seulement de développer le réseau existant, mais également d'utiliser celui-ci de façon plus optimale.

Pour permettre un développement efficient du système, il est primordial d'évaluer sa capacité, correspondant à la quantité de trafic qu'il peut traiter. Cette capacité, mise en regard de la demande actuelle ou prévue permet alors de planifier de façon optimale les besoins nécessaires pour l'avenir. Il est ainsi possible de réaliser un plan de développement viable du point de vue économique, environnemental et sociétal.

L'objectif de cet ouvrage est d'aborder la question de la capacité d'un aéroport en le considérant dans son ensemble comme un système complexe. Ce guide couvrira la définition même de la notion, puis traitera des éléments l'influençant, avant de présenter des méthodes disponibles pour l'évaluer et des moyens pouvant être mis en œuvre pour l'améliorer.

L'accent est ici mis d'une part sur les différents paramètres et éléments qui influencent la capacité aéroportuaire et d'autre part sur les différentes méthodes d'évaluation de la capacité. Il ne s'agit pas dans cet ouvrage d'établir un guide pratique du calcul étape par étape de la capacité d'une infrastructure, mais de fournir des bases solides d'un point de vue méthodologique. Ce guide se veut accessible à tous tant par son contenu que par sa forme.

1. Capacité aéroportuaire : problématique et définition

1.1. Problématique

La capacité d'une infrastructure est une information essentielle pour de nombreux acteurs intervenant sur une plate-forme tels que l'exploitant aéroportuaire, le contrôle aérien, l'organisme de tutelle (l'État, la région, le département) ou encore les compagnies aériennes. Les objectifs peuvent être multiples, à différentes échelles de décisions :

- Sur le plan stratégique à long terme pour permettre la planification des investissements ;
- Sur le plan tactique à moyen terme pour évaluer par exemple l'opportunité de modifier les pratiques d'exploitation sans modifier l'infrastructure ou pour mettre en place un management de la demande ;
- Sur le plan opérationnel, pour s'adapter en temps réel à la typologie effective du trafic se présentant à très court terme.

C'est en effet à partir de la capacité que peuvent être déterminées des informations telles que le trafic que l'infrastructure peut accueillir, l'horizon de saturation d'une infrastructure compte tenu de l'évolution prévue du trafic ou encore les éléments bloquants (maillons faibles) pour concentrer et optimiser les investissements.

Il est d'emblée essentiel de noter que la notion de capacité diffère suivant les enjeux et les horizons temporels qui leurs sont associés. Ce guide reviendra par la suite plus en détail sur différentes définitions de la capacité suivant le contexte.

Pour évaluer la capacité d'un aéroport dans sa globalité, il est nécessaire de déterminer la capacité de chacun des maillons qui le constituent. De façon générale, on peut distinguer les sous-ensembles suivants :

- Les accès terrestres (routiers, parkings, transports en commun) ;
- Les aérogares (passagers et fret) ;
- L'aire de mouvement des avions (aire de trafic + aire de manœuvre) ;
- Les accès aériens (espaces aériens terminaux).

En déterminant la capacité de chacun de ces sous-ensembles, il est ainsi possible de déterminer la capacité de l'ensemble du système aéroportuaire en considérant les interfaces entre ces différents sous-ensembles.

Le présent guide met l'accent sur la capacité des aérogares et de l'aire de mouvement des avions. Il évoquera les problématiques rencontrées dans les espaces aériens terminaux mais ne traitera pas de l'accès terrestre, lequel est traité par d'autres services.

1.2. Définition systémique d'un aéroport

Un aéroport peut être considéré comme un système dans sa définition la plus simple, c'est-à-dire un ensemble d'éléments organisés en une structure. Le système aéroportuaire est en outre lui-même composé de sous-systèmes où la même définition s'applique, qui sont les maillons de la chaîne aéroportuaire.

Sur la Figure 1, le système aéroportuaire et ses principaux sous-systèmes dédiés au traitement des flux sont représentés. Ces sous-systèmes sont donc eux-mêmes décomposables au second niveau etc.

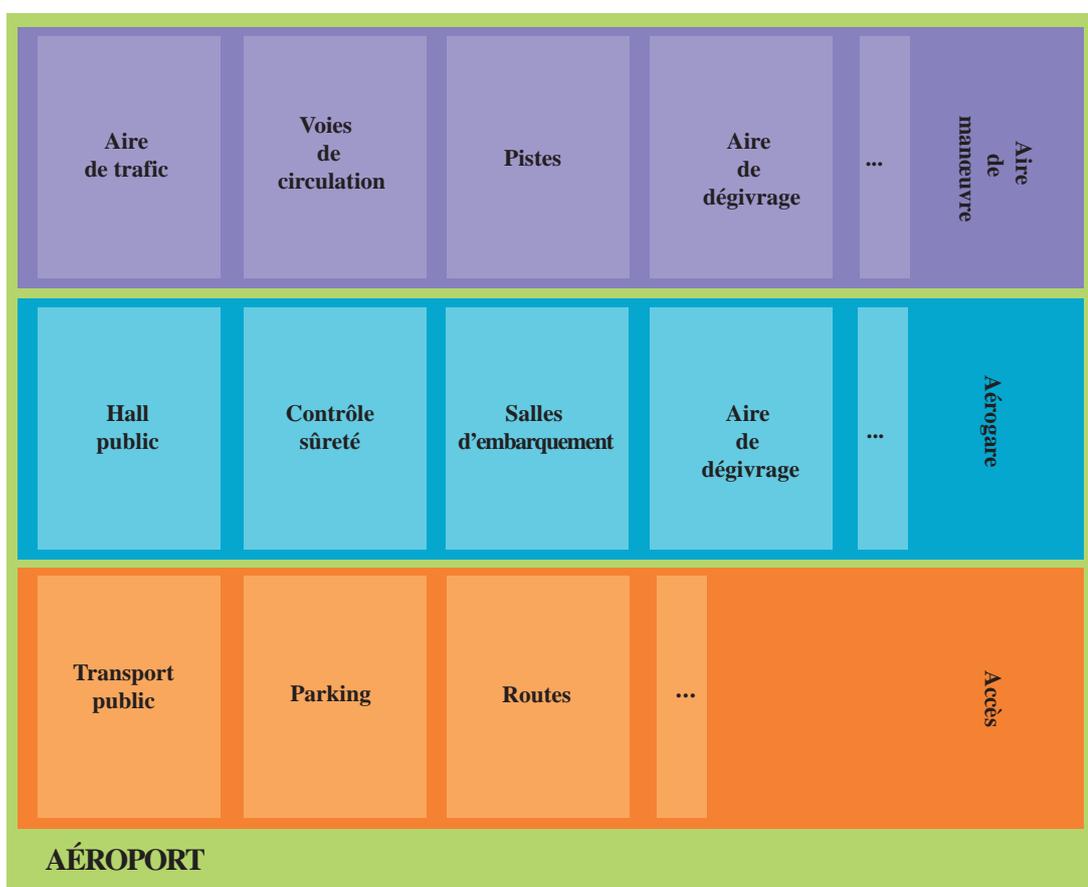


Figure 1: Schéma du système aéroportuaire et de ses sous-systèmes.

De façon plus précise, l'aéroport est un système de traitement de flux (d'avions, de passagers, de bagages, de fret, de véhicules) dont le rôle est de permettre le conditionnement de passagers, de bagages et/ou de fret en « lots » embarqués dans des avions, et inversement. Les sous-systèmes qui le composent peuvent être considérés comme des réseaux constitués des trois types d'éléments suivants :

- Des **liens**, dont le rôle est de permettre le déplacement d'un flux sans modifier ses caractéristiques intrinsèques. Ce sont par exemple dans les aérogares les espaces purement dédiés à la circulation (escaliers, couloirs, escalators...) et sur les aires de mouvements les voies de circulation avion.
- Des **processeurs**, qui opèrent une transformation modifiant les caractéristiques du flux au moyen d'un contrôle ou d'une transaction. Par exemple, un poste d'inspection filtrage transforme un flux de passagers « non sûrs » en un flux de passagers « sûrs », une piste transforme un flux d'avions au sol en un flux d'avions en l'air.
- Des **réservoirs**, dont le rôle est de stocker les éléments d'un flux. On retrouve généralement les réservoirs en amont des processeurs. Ce sont toutes les zones d'attentes en amont des contrôles dans les terminaux, ou les bretelles d'accès à une piste qui permettent de stocker les avions avant de pénétrer dans les servitudes.

Certains processeurs particuliers jouent le rôle d'interface entre deux sous-systèmes ; c'est le cas par exemple de l'esplanade entre les accès et l'aérogare passagers, des passerelles entre les aérogares et les avions (les parties violettes sur la Figure 1).

Au sens de l'analyse systémique, un aéroport est donc une succession logique de liens, de réservoirs et de processeurs, qui mis bout à bout permettent à des personnes ou des marchandises de prendre l'avion et inversement.

À partir de ces éléments, il est possible de donner une première définition de la capacité d'une infrastructure aéroportuaire. Elle correspond ainsi au nombre maximum d'entités qui peuvent être « traitées » par les liens, les réservoirs et les processeurs sur une période de temps donnée dans des conditions de fonctionnement et de qualité de service définies. De façon plus précise :

- Pour les liens, c'est le nombre d'entités qui peuvent être déplacées ;
- Pour les réservoirs, c'est le nombre d'entités qui peuvent être stockées, compte tenu du niveau d'alimentation en entrée et d'écoulement en sortie de celui-ci ;
- Pour un processeur, c'est le nombre d'entités qui peuvent être transformées.

Si cette vision du système aéroportuaire est relativement abstraite, elle présente l'intérêt d'être généralisable quel que soit le système ou le sous-système considéré et permet d'identifier le ou les goulets d'étranglements et leurs types. Elle reste en effet valide aussi bien côté avion que côté terminal, dans l'aérogare considérée dans son ensemble ou pour un service particulier (inspection filtrage, enregistrement, etc.). Par exemple, si l'on s'intéresse à l'aérogare dans son ensemble, l'intégralité du poste inspection filtrage peut être considérée comme un réservoir (c'est-à-dire un espace de stockage avec un niveau d'alimentation et d'écoulement), ou de manière détaillée avec d'abord un réservoir (la file d'attente) un lien (qui lie la file d'attente au portique) puis un processeur (le portique qui transforme un passager « non-sûr » en un passager « sûr »).

Le système aéroportuaire est lui-même connecté avec d'autres éléments dans son environnement proche. Il est ainsi en lien avec l'espace aérien terminal (l'espace d'approche) d'un côté, et la zone urbaine dans laquelle il s'insère de l'autre. Ce n'est en aucun cas un système clos, mais au contraire un ensemble qui s'insère dans un contexte bien plus large. De nombreuses questions nécessitent ainsi de se placer dans un cadre qui dépasse largement les frontières physiques de l'aéroport pour obtenir une réponse satisfaisante.

1.3. Définitions « standardisées » de la capacité

1.3.1. Éléments de vocabulaire

Par abus de langage le terme capacité est régulièrement utilisé pour désigner de nombreux paramètres sur une infrastructure. Ainsi, les notions de demande, d'offre, de débit et de capacité sont régulièrement confondues lorsque l'on parle de capacité ce qui peut entraîner des difficultés de compréhension et de dialogue entre les différents intervenants. Ces termes se distinguent en réalité de la façon suivante :

- **Demande** : c'est la quantité de trafic planifiée à un certain moment avant les opérations.
- **Offre** : c'est la quantité de trafic jugée assimilable par le système dans une situation donnée par les parties prenantes.
- **Débit** : c'est la quantité de trafic qui est réellement écoulee par le système sur une période de temps.
- **Capacité** : c'est la quantité de trafic qui pourrait théoriquement être traitée par un système.

Il convient de noter que ces définitions volontairement simplistes sont données à titre indicatif pour permettre de bien distinguer ces termes les uns des autres. Dans les faits, il existe de nombreuses variantes de chacune selon le point de vue considéré. Dans la suite de ce chapitre, la notion de capacité sera explicitée de manière détaillée.

Il est également intéressant de remarquer que dans un système « idéal », la demande, l'offre, le débit et la capacité sont confondus en une seule valeur. L'offre est ainsi fixée à sa valeur maximale qu'est la capacité, la demande remplit l'intégralité de l'offre, et le débit observé effectivement correspond exactement à ce qu'il est théoriquement possible de réaliser.

Toutefois dans un système réel, on observe des différences notables entre toutes ces valeurs. La capacité peut être supérieure à l'offre pour garantir des marges de fonctionnement, la demande peut être supérieure à la capacité ou le débit peut être ponctuellement supérieur à la demande initiale. L'offre peut également être supérieure à la capacité, afin de garantir une alimentation maximale du système quitte à générer du retard ponctuellement.

1.3.2. Définitions retenues

Il existe de très nombreuses définitions de la capacité aéroportuaire dans la littérature, chacune présentant ses spécificités et son champ d'intérêt propre. Pour plus de clarté, seules les définitions suivantes que l'on retrouve généralement dans la littérature récente sont retenues dans le présent guide :

- La **capacité maximale** C_m (ou capacité de saturation) : c'est la quantité de trafic qu'une infrastructure peut écouler dans le respect de la législation en vigueur et sans prendre en compte la qualité de service (par exemple le retard) dans des conditions de saturation (c'est-à-dire une demande continue) de l'infrastructure.

- La **capacité opérationnelle** C_o : c'est la quantité de trafic qu'une infrastructure peut écouler dans le respect de la législation en vigueur compte tenu d'un niveau de qualité de service défini (par exemple un retard acceptable ou des marges de manœuvre, cf. Chapitre suivant qui revient dans le détail sur cette notion).
- La **capacité soutenable** C_s : c'est la quantité de trafic qu'une infrastructure peut écouler de façon durable. Cela fait référence à l'aptitude des opérateurs à maintenir un niveau de performance pendant une période de temps longue et à reproduire ce niveau de performance en raison des problématiques de facteurs humains.

Ces définitions présentent l'avantage d'être simple et facilement compréhensible par l'ensemble des partenaires. De façon triviale, la relation suivante existe entre les trois définitions :

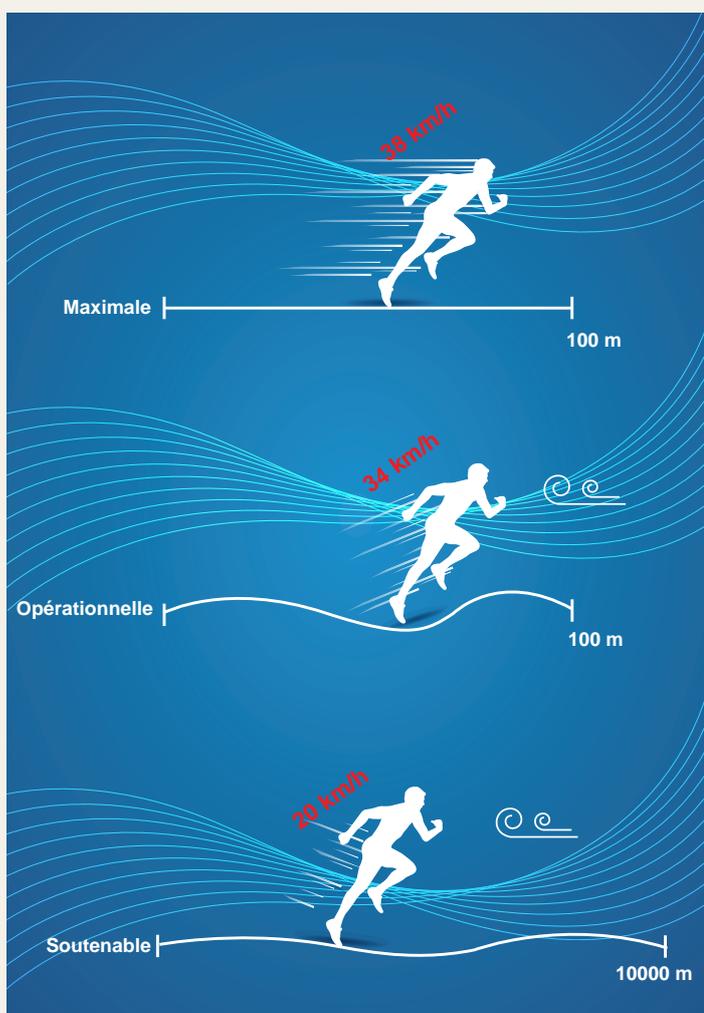
$$C_m \geq C_o \geq C_s$$

Il convient de noter que si les trois définitions sont différentes, les conditions locales d'exploitation peuvent entraîner dans la pratique des convergences entre les trois valeurs. Sur certains aéroports, l'intégralité de la capacité disponible est utilisée opérationnellement, ce qui revient à confondre les valeurs de capacité opérationnelle et de capacité maximale. À l'inverse, certaines plateformes ont une capacité maximale qu'il est particulièrement complexe d'atteindre en opération et encore plus de la maintenir pendant des périodes de temps longues. C'est notamment le cas sur les aéroports qui disposent de peu d'espace en l'air ou au sol pour permettre la régulation (modification de l'ordre de la séquence) du trafic d'avions.

Sur certains aéroports, une autre notion est introduite, celle de **capacité déclarée**. Il s'agit d'une valeur qui est fournie par les acteurs locaux (généralement par le prestataire de service de la navigation aérienne pour le cas français) qui agrège l'ensemble des valeurs et correspond à la capacité de l'infrastructure qui est affichée auprès des autres partenaires. C'est une valeur qui est notamment fournie à EUROCONTROL (organisme européen qui a en charge la gestion des flux aériens au sein d'une Europe élargie) pour permettre une gestion plus efficace des flux et éviter les problèmes de congestion dans les espaces aériens européens. Attention, il est important de noter que cette notion est différente de sa version anglaise « *declared capacity* » qui peut selon le contexte être traduite en France par la notion de capacité de programmation (cf. Chapitre sur le cadre réglementaire).

CAPACITÉ MAXIMALE, OPÉRATIONNELLE, SOUTENABLE : MIEUX S'IMPRÉGNER DES TROIS DÉFINITIONS

Pour mieux appréhender ces trois notions, il est possible d'effectuer une analogie avec un coureur à pied. Dans cet exemple, la « capacité » est assimilée à la vitesse que peut atteindre le coureur. Le schéma ci-après illustre les différentes définitions :



- Dans le premier cas, notre coureur cherche à atteindre sa vitesse maximale dans des conditions parfaites, à savoir un parcours idéal, dans des conditions météorologiques optimales. Il atteint alors 38 km/h. Les conditions nécessaires pour atteindre cette vitesse ne sont quasiment jamais remplies dans un environnement normal.

- Dans le deuxième cas, notre coureur cherche à se déplacer le plus rapidement possible sur un parcours non idéal qui présente un dénivelé, dans des conditions météorologiques défavorables (un vent de face). Il atteint ici 34 km/h, vitesse qu'il ne peut maintenir que sur une distance courte.

- Dans le dernier cas, notre coureur vise cette fois-ci une vitesse de course qui doit lui permettre une endurance importante afin de parcourir une distance plus longue, et ce sur un parcours non idéal et dans des conditions météorologiques non optimales. Il atteint ici 20 km/h, vitesse qu'il est capable de maintenir sur l'ensemble du parcours.

Cette analogie, bien que simpliste, illustre bien les trois différentes définitions, et l'intérêt que chacune peut représenter dans l'évaluation d'un système aéroportuaire.

1.3.3. Champ d'application des définitions

Lorsque l'on cherche à répondre à une question portant sur la capacité d'une infrastructure, la première difficulté consiste à choisir *quelle* capacité doit être déterminée.

La capacité maximale est une valeur de référence connue qu'il sera impossible de dépasser. Ainsi, si la demande est supérieure à celle-ci, il ne sera pas possible de l'accueillir sans générer du retard. Pour évaluer l'opportunité de réaliser de nouvelles infrastructures à moyen long terme (nouveaux terminaux, nouvelles pistes...) il est généralement plus opportun de déterminer la capacité opérationnelle et la corrélérer avec les prévisions de trafic pour évaluer un horizon de saturation. Ces deux notions complémentaires de capacité sont au cœur des documents de planification aéroportuaire (Master Plan, Avant-Projet Plan de Masse ou Schéma de Composition Générale), essentiels pour permettre un développement anticipé, réfléchi et rationnel des installations et de l'emprise aéroportuaires. L'évaluation capacitaire réalisée dans ces documents de planification, confrontée à la prévision de trafic est à la base de la définition des besoins futurs.

Pour une étude de capacité ayant comme objectif la mise en place de la coordination sur un aéroport (cf. chapitre sur le cadre réglementaire), c'est-à-dire la détermination d'un nombre de créneaux allouables aux compagnies aériennes sur une plate-forme, il s'agit davantage de déterminer la capacité opérationnelle ou la capacité soutenable pour offrir un nombre de créneaux que l'aéroport est réellement en mesure de traiter. À noter que dans certains cas d'étude, la spécificité de la question posée peut nécessiter une réponse « sur-mesure » et de fait une notion de capacité ad-hoc.

1.4. Contexte réglementaire

La notion de capacité n'est que très peu présente dans la réglementation, qu'elle soit nationale ou internationale. Celle-ci est en effet généralement la conséquence d'autres éléments qui font pour leur part l'objet de nombreux textes réglementaires compte tenu des forts enjeux de sécurité qui les caractérisent (par exemple l'espacement entre deux aéronefs, ou encore les mesures de sûreté obligatoires lors de l'inspection filtrage des passagers).

1.4.1. Limitation des nuisances aéroportuaires

Le régulateur peut être amené, en collaboration avec les acteurs locaux, à imposer des limitations de la capacité aéroportuaire pour des questions relatives aux nuisances causées par les mouvements d'avions telles que pour les problématiques liées au bruit ou aux émissions de polluants. À titre d'exemple, certains aéroports se voient imposer une limite sur le nombre maximum de mouvements (décollages ou atterrissages) d'aéronefs réalisables sur une période de temps définie. C'est le cas à Orly, où le nombre annuel de créneaux est limité à 250 000 sur deux saisons aéronautiques consécutives (été et hiver) et où un couvre-feu nocturne interdit les mouvements pendant certaines heures de la nuit.

1.4.2. Procédure de coordination ou de facilitation

Pour les cas de congestion d'une infrastructure, l'outil réglementaire principal du législateur pour intervenir sur la capacité d'une infrastructure est la *coordination* et son niveau inférieur la *facilitation*. Il s'agit d'un moyen de gérer la demande des compagnies aériennes en fixant une valeur maximale de l'offre, appelée *capacité de programmation*.

Sur un aéroport coordonné, les compagnies aériennes ont l'*obligation* d'être en possession d'un créneau pour pouvoir effectuer des mouvements sur celui-ci. Les créneaux sont alloués par un coordonnateur qui est désigné par le législateur. En France, c'est l'association indépendante **COHOR**¹ qui a pour mission d'attribuer

¹ Association pour la Coordination des horaires. Créée en 1995, l'association a pour missions d'attribuer les créneaux horaires et de contrôler leur bonne utilisation. Son bureau est composé de représentants de compagnies aériennes et d'exploitants d'aéroports.

les créneaux aux compagnies aériennes et de contrôler leur bonne utilisation. En cas de manquement aux règles qui régissent la coordination d'une plate-forme (mouvements sans créneaux, ou à une autre heure que celle du créneau alloué), la compagnie aérienne peut être sanctionnée par les services de l'État compétents. La facilitation d'horaire reprend les principes de la coordination, sans les aspects contraignants (il n'y a pas d'obligation à disposer d'un créneau pour effectuer un mouvement, mais les compagnies aériennes sont fortement incitées à le faire). La réussite du processus de facilitation repose donc sur une bonne coopération entre les compagnies aériennes et l'entité en charge de l'allocation des créneaux.

Pour l'Europe, ce sont les règlements européens 95/93, 793/2004 et 545/2009 (qui modifient en partie le premier) qui fixent les conditions et les modalités de mise en œuvre de la coordination et de la facilitation sur un aéroport. En particulier, le règlement prévoit la réalisation d'une étude de capacité *basée sur des méthodes généralement reconnues, qui doit déterminer les insuffisances de capacité et examiner les possibilités de remédier à ces insuffisances à l'aide d'infrastructures nouvelles ou modifiées, de changements opérationnels ou de tout autre changement [...]. Lorsque des problèmes de capacité se posent, [...] l'État membre veille à ce que l'aéroport soit désigné comme coordonné pour les périodes concernées uniquement lorsque les insuffisances de capacité sont tellement graves que des retards importants ne peuvent être évités et qu'il n'y a aucune possibilité de résoudre ces problèmes à court terme.*

La mise en place de la coordination est donc généralement considérée comme un « ultime recours » pour pallier un problème de congestion (c'est-à-dire que la demande planifiée est supérieure à la capacité). Lorsque cela est possible et pertinent, il sera souvent préférable pour un exploitant aéroportuaire d'augmenter la capacité de son infrastructure en adéquation avec l'évolution de la demande plutôt que de recourir à la coordination qui revient à éviter la congestion en refusant une partie de la demande mais également en se privant des revenus aériens associés.

Une procédure de coordination peut-être permanente si la problématique de congestion est récurrente sur l'ensemble de l'année, sur une seule saison pour les aéroports avec un trafic saisonnier (saison hiver ou saison été), ou ponctuelle sur une période plus courte en cas d'évènements particuliers.

Dans d'autres cas, la mise en place de la coordination peut être judicieuse en prévision d'évènement exceptionnel. Ce fut le cas par exemple en France en 2016 avec l'organisation du championnat d'Europe de football, où des mesures préventives ont été prises pour anticiper l'augmentation de l'affluence sur les aéroports à proximité des stades utilisés pour la compétition.



AÉROPORTS COORDONNÉS EN FRANCE ET DANS LE MONDE

En France, quatre aéroports sont coordonnés toute l'année (saison hiver et saison été) :

- Paris-Charles-de-Gaulle
- Paris-Orly
- Lyon-Saint-Exupéry
- Nice-Côte d'Azur

Pour ces aéroports, le régulateur fixe avant chaque saison les paramètres de coordination en collaboration avec les acteurs locaux, pour prendre en compte les évolutions de l'infrastructure et des outils opérationnels qui permettent régulièrement d'améliorer la capacité de l'infrastructure et donc le seuil fixé par le régulateur. Les modalités de la coordination sont spécifiques sur chaque aéroport, avec par exemple des conditions sur les flux de passagers par heure dans les terminaux à Paris-CDG, des contraintes de stationnement avions à Nice, ou encore le couvre-feu imposé à Orly au milieu de la nuit.

Trois aéroports sont déclarés à facilitation d'horaire, à savoir Chambéry, Annecy et Figari. Pour les deux premiers, l'arrêté de facilitation est commun, étant donné l'imbrication des routes aériennes permettant d'y accéder (l'espace aérien terminal est commun aux deux aéroports). Sur ces trois aéroports, la facilitation est saisonnière (hiver pour Chambéry et Annecy, été pour Figari) compte tenu de la forte saisonnalité de la demande liée aux activités touristiques sur place.

L'aéroport de Cannes est également coordonné chaque année à l'occasion du Grand Prix de Formule 1 de Monaco qui entraîne une forte affluence sur la Côte d'Azur.

Dans le monde, tous les pays n'ont pas les mêmes pratiques vis-à-vis de la coordination des plateformes. Aux États-Unis, seulement deux aéroports sont coordonnés (New-York JFK et Newark) et deux autres sont à facilitation d'horaires (Chicago O'Hare et San Francisco). L'accès aux autres aéroports se fait donc librement pour les compagnies aériennes, la demande s'autorégulant en fonction de l'offre et la quantité de retard subie.

Au total en 2018, 293 aéroports sont déclarés facilités ou coordonnés sur tout ou partie de l'année.

1.5. Le rôle de chacun sur les questions de capacité

Le rôle et les contributions des différents partenaires peuvent être différents selon le type de question qui est posé (et en particulier quelle capacité est considérée) et plus précisément selon qui pose la question et pourquoi. De façon simplifiée, on peut, dans le cadre de l'analyse de la capacité, classer les acteurs d'une plate-forme selon trois catégories distinctes :

- Les usagers, qui utilisent le système ;
- Les opérateurs, qui exploitent (qui traitent les usagers) ;
- Les aménageurs, qui conçoivent et planifient le développement du système.

Les acteurs suivants sont les principaux interlocuteurs des discussions relatives à la capacité.

L'exploitant de l'infrastructure est systématiquement un interlocuteur essentiel, puisqu'il a en charge la gestion de l'infrastructure, son exploitation et parfois son développement. C'est en particulier le cas pour la partie aérogare, même s'il a la possibilité de déléguer certaines parties de l'exploitation à des sociétés spécialisées comme l'inspection filtrage. Il est donc le plus à même d'être intéressé par l'évaluation de la capacité de ses infrastructures dans leur globalité ou d'un point particulier puisque les résultats lui permettront d'adapter ses modes de gestion ou d'anticiper la réalisation de nouvelles infrastructures.

Le prestataire de service de la navigation aérienne est également un partenaire essentiel pour les questions qui portent sur l'aire de mouvement des aéronefs. C'est lui qui a en effet en charge l'essentiel des déplacements des avions au sol et dans l'espace aérien. Il a donc la connaissance des procédures d'exploitation de la plate-forme (liées aux mouvements des aéronefs) et a également en charge la définition de ces procédures. Il est donc également particulièrement concerné par les questions portant sur la capacité de l'aire de mouvement et de l'espace aérien terminal de la plate-forme, non seulement pour fournir les données nécessaires à la réalisation des études mais aussi comme destinataire des résultats.

Comme indiqué précédemment, certains processus peuvent être délégués par l'exploitant à des sociétés spécialisées. Aussi, lorsque l'on s'intéresse à la capacité des processus concernés, il est donc naturel de les impliquer dans l'analyse puisque si l'exploitant dicte les règles à suivre par ces entreprises, ce sont elles qui en ont la maîtrise opérationnelle et tactique qu'il est essentiel de connaître. On retrouve régulièrement ces sous-traitants au niveau de l'inspection filtrage ou de l'assistance en escale des aéronefs sur leur poste de stationnement.

Les services de l'État sont également des interlocuteurs importants, à la fois ceux qui interviennent en tant qu'organe régalien sur le plan économique ou réglementaire tout comme ceux qui ont la maîtrise opérationnelle de certains processus notamment dans les aéroports (services de douanes, police aux frontières, gendarmerie des transports aériens). Certains services peuvent également intervenir pour fournir des données particulières comme les données météorologiques par exemple.

Les compagnies aériennes possèdent leurs procédures et consignes d'exploitation, lesquelles sont parfois méconnues des autres acteurs de la plate-forme. Dans le cadre d'une étude de capacité, il est souhaitable de sonder les compagnies aériennes pour éviter de construire des infrastructures ou des procédures d'exploitation qui ne leur conviendraient pas.

Les passagers peuvent également être des interlocuteurs pertinents, en particulier pour acquérir des données permettant une modélisation la plus fidèle de leurs comportements et de leurs préférences. Ils peuvent également être une source intéressante du point de vue du retour d'expérience pour l'évaluation de la qualité de service.

La coopération entre ces différents acteurs est essentielle pour qu'un projet qui concerne la capacité aéroportuaire avance au bon rythme et dans la bonne direction. Les missions des différents intervenants sont en effet particulièrement imbriquées, et il est nécessaire que tous avancent ensemble, en pleine conscience de la situation de chacun. Pour faciliter cette collaboration entre les parties prenantes, l'Europe a développé à partir du début des années 2000 le concept A-CDM² (*Airport – Collaborative Decision Making*). L'objectif principal est de permettre aux partenaires de travailler ensemble, et de prendre des décisions sur la base d'informations plus précises et de meilleure qualité, où chaque élément d'information a la même signification pour tous. Une telle collaboration repose notamment sur le partage des pratiques entre les acteurs afin de connaître les préférences et les contraintes de chacun, à l'instant présent et dans le futur. Début 2018, ce sont près d'une trentaine d'aéroports européens qui ont obtenu le label A-CDM donné par EUROCONTROL, une douzaine d'autres devant les rejoindre d'ici 2020.

² Pour plus d'information sur le sujet, le lecteur pourra se référer au Doc 9971 *Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management* publié par l'OACI.

2. Qualité de service, définition et impact sur la capacité

La qualité de service est un élément important qui intervient lorsque l'on définit la capacité d'une infrastructure. Comme abordé dans la partie précédente, on retrouve cette notion dans certaines définitions de la capacité (opérationnelle et soutenable). La qualité de service traduit l'adéquation entre la capacité et la demande, c'est-à-dire la façon dont une infrastructure répond aux attentes de ses usagers en termes de confort et d'efficacité. Cette demande correspond à un niveau et une typologie de trafic de référence, qu'il convient d'établir en concertation avec l'ensemble des acteurs concernés. Il s'agit généralement d'un trafic de pointe caractéristique des opérations usuelles sur la plate-forme.

La qualité de service peut être considérée comme un levier d'action du gestionnaire d'une infrastructure. La capacité d'un système donné dépend du niveau de service admis par l'exploitant : par exemple, une aérogare donnée pourra traiter 1000 passagers par heure dans de bonnes conditions (confort, ponctualité...), contre 1500 avec un niveau de service médiocre.

De très nombreux et différents facteurs contribuent à ce que l'on nomme de manière générique la qualité de service. On retrouve par exemple, la densité d'occupation, les temps d'attente et de traitement, la lisibilité et la compréhensibilité des circulations, les distances à parcourir, les équipements d'aide à la circulation. Pour le cas spécifique des aérogares, on peut également inclure l'offre en places assises dans les zones d'attente, la disponibilité des chariots à bagages, le nombre et la propreté des sanitaires, les services commerciaux, l'accessibilité pour les personnes à mobilité réduite, etc. Pour les aires avions, on peut citer le nombre et la typologie des postes de stationnement (poste au contact avec ou sans passerelle, au large,...), l'adéquation entre le poste de stationnement requis et le poste de stationnement effectif, la disponibilité des véhicules d'avitaillement, etc.

Ce qui rend la qualité de service souvent difficile à quantifier est que ces facteurs sont modulés par le ressenti des usagers, fonction de schémas psychologiques et comportementaux variés. Les attentes des passagers sont ainsi très différentes selon leur niveau d'exigence (un passager de la classe affaire d'une grande compagnie nationale aura un niveau d'exigence supérieur à un passager de la classe économique d'une compagnie à bas coûts) ou le motif du voyage (un passager voyageant pour un motif professionnel sera moins enclin à attendre qu'un passager voyageant pour un motif loisir). De la même façon, les compagnies aériennes n'ont pas les mêmes attentes, que ce soit du point de vue du service rendu à leurs passagers, ou de leurs exigences en matière de ponctualité.

La notion de qualité de service est plus simple et mieux cadrée pour les aérogares que pour les aires de mouvement et l'espace aérien. Il existe en effet des standards pour la définir et la mesurer. Deux critères quantifiables et objectifs principaux se dégagent pour l'évaluer :

- Le temps d'attente aux points de passage obligatoires ;
- L'espace disponible par passager dans les zones d'attentes et de circulation (dans un sens large, une zone commerciale à proximité des salles d'embarquement étant considérée comme une zone d'attente disponible).

L'évaluation de la qualité de service à partir de ces deux seuls éléments est évidemment réductrice. Toutefois, les autres paramètres influant sur la qualité de service étant difficiles à quantifier, ils permettent de la mesurer de façon relativement simple et de comparer facilement des infrastructures entre elles.

En ce qui concerne l'aire de mouvement, la notion de qualité de service est beaucoup moins standardisée. Néanmoins, quelques paramètres mesurables peuvent être utilisés pour l'évaluer. Nous reviendrons dans la suite de cette partie sur la problématique de la qualité de service côté avion.

2.1. Qualité de service dans les aéroports

Comme indiqué précédemment, l'évaluation du niveau de qualité dans les aéroports est aujourd'hui standardisée, via une méthode reconnue définie par l'IATA (International Air Transportation Association) dans son ADRM (*Airport Development Reference Manual*). Revue dans l'édition de 2014, la classification des niveaux de qualité de service permet une meilleure prise en compte des aspects économiques et environnementaux liés à un surdimensionnement des infrastructures.

Trois niveaux de qualité de service sont ainsi définis :

- **Optimum** : Espace suffisant pour accueillir les fonctions nécessaires dans un environnement confortable et temps d'attente et de traitement acceptables ;
- **Sub-Optimum** : Espace encombré et inconfortable et temps d'attente et de traitement inacceptables ;
- **Overdesign** : Espaces vides ou trop importants et surabondance des ressources.

		ESPACE DISPONIBLE		
		Sur-dimensionnement	Dimensionnement adéquat	Sous-dimensionnement
TEMPS D'ATTENTE	Sur-dimensionnement			
	Dimensionnement adéquat			
	Sous-dimensionnement			

Figure 2 : Matrice espace-temps d'évaluation de la qualité de service dans un aéroport

La principale nouveauté dans cette définition vient donc de l'introduction du concept d'aéroport overdesign, ou surdimensionnée. Elle introduit un contexte économique qui n'existait pas auparavant, qui permet de prendre en compte tous les aspects de l'adéquation entre offre et demande :

- Si l'offre correspond à la demande, le niveau de service est considéré comme bon ;
- Si l'offre est inférieure à la demande, le niveau de service est considéré comme insatisfaisant ;
- Si l'offre est supérieure à la demande, le niveau de service est également non-satisfaisant, bien que le ressenti des passagers soit bon. Toutefois, cette situation reste préférable à un sous-dimensionnement des infrastructures.

Il est néanmoins important de noter qu'il est généralement inévitable qu'un aéroport soit surdimensionné durant une période de temps spécifique. En effet, compte tenu des coûts et du temps nécessaires à la réalisation de nouvelles infrastructures, le dimensionnement se fait généralement de manière proactive à une échelle de temps relativement longue, en utilisant des prévisions de trafic à long terme, afin d'éviter d'avoir à réagir à une situation de saturation des installations. Ainsi, une nouvelle infrastructure peut parfaitement être sous-utilisée pendant un temps défini avant d'être exploitée à plein potentiel.

Le tableau ci-dessous issu des concepts décrits dans l'ADRM présente sous la forme d'une matrice espace-temps le niveau de qualité de service en croisant les informations liées au temps d'attente et à l'espace disponible aux passagers.

2.2. Qualité de service côté avion

Contrairement à la qualité de service aérogare, il n'existe pas de standard mondial concernant la qualité de service côté avion. Il existe néanmoins certaines valeurs permettant de la quantifier qu'il est possible de mesurer :

- Le temps de roulage ;
- Le temps d'attente en entrée de piste ;
- Le retard.

La définition même de ces valeurs peut cependant s'avérer complexe ce qui rend de fait la mesure difficile à effectuer. Ainsi, en prenant l'exemple du temps de roulage au départ, le début de la mesure peut ainsi être donné :

- Au départ bloc (et ainsi inclure le temps de repoussage) ;
- Au début du roulage (et donc ne pas tenir compte de la phase de repoussage).

De la même façon, la fin de la mesure peut être :

- À l'entrée dans la file d'attente pour le décollage (soulevant la problématique de l'identification d'une entrée en file d'attente, par exemple l'avion doit-il être arrêté ou rouler en dessous d'une certaine vitesse à définir) ;
- À l'entrée dans les servitudes de la piste (et donc inclure dans le temps de roulage le temps d'attente en entrée de piste mais pas le temps d'attente éventuel sur la piste) ;
- Après l'alignement sur la piste ;
- Au début de la course au décollage (soulevant la question de l'identification du début de décollage, l'avion pouvant ne pas s'être arrêté entre la phase d'alignement et son accélération pour décoller).

De la même manière, le retard peut représenter de nombreuses valeurs selon l'endroit où la mesure est effectuée. Cela peut ainsi correspondre :

- À un retard au départ bloc, c'est-à-dire la différence entre l'heure prévue de départ bloc (la EOBT, *Estimated Off-Block Time*) et l'heure effective de départ bloc (l'AOBT, *Actual Off-Block Time*) ;
- À un retard au décollage, c'est-à-dire la différence entre l'heure prévue de décollage (la ETOT, *Estimated Take-Off Time*) et l'heure effective (l'ATOT, *Actual Take-Off Time*) ;
- À un retard à l'atterrissage, c'est-à-dire la différence entre l'heure prévue d'atterrissage (la ELDT, *Estimated Landing Time*) et l'heure effective (l'ALDT, *Actual Landing Time*) ;
- À un retard à l'arrivée au bloc, c'est-à-dire la différence entre l'heure prévue d'arrivée au poste de stationnement (la SIBT, *Schedule In-Block Time*) et l'heure effective (l'EIBT, *Estimated In-Block Time*) ;
- À un allongement du temps de parcours observé entre deux jalons par rapport à un temps de parcours théorique optimal entre ces deux mêmes jalons.

On remarque donc à travers ces différentes définitions et modes de calcul du retard qu'un même avion peut être ou ne pas être en retard selon les cas. Par exemple, un avion quitte le bloc en retard, est retardé dans la file d'attente en entrée de piste mais arrive néanmoins à l'heure prévue à destination. Est-il en retard, ou à l'heure ?

Le retard est l'élément qui est généralement utilisé pour quantifier le niveau de qualité de service associé à une valeur de capacité. Même s'il n'existe pas de définition universelle et unique du retard, il reste cependant relativement facilement mesurable et constitue une évaluation objective du niveau de saturation d'une infrastructure.

3. Facteurs d'influence de la capacité aéroportuaire

La capacité d'une infrastructure est influencée par de nombreux paramètres. Elle est la synthèse d'un nombre important de facteurs à la typologie variée (équipements, procédures d'exploitation, facteurs humains...) dont l'influence sur celle-ci est plus ou moins directe.

Le calcul de la capacité d'une infrastructure s'effectue généralement à partir d'un nombre de paramètres restreints tels que les temps d'occupation de piste, les séparations minimales ou encore les temps de passage aux contrôles frontaliers dans les aéroports. Ces paramètres de base peuvent être mesurés ou déduits d'un certain nombre de facteurs d'influence directe (tels que la configuration géométrique de l'infrastructure ou les procédures d'exploitation en vigueur). Ces derniers sont eux-mêmes affectés par d'autres facteurs ayant des niveaux d'influence plus ou moins importants comme le relief ou le développement urbain environnant un aéroport lesquels peuvent influencer sur ses procédures d'exploitation voire sur sa géométrie.

3.1. Les facteurs d'influence directe

Les facteurs d'influence peuvent être regroupés dans trois catégories selon les parties de l'exploitation concernées :

- L'infrastructure – Où ?
- Le trafic – Quoi ?
- Les procédures – Comment ?

Nous allons dans la suite de cette partie rentrer dans le détail de chacune de ces catégories.

3.1.1. Infrastructure

Les facteurs correspondant à l'infrastructure sont ceux dont l'influence sur la capacité du système est la plus simple à appréhender. Ils correspondent à :

- **La géométrie** des éléments (et donc à leur niveau de performance maximale possible);
- **L'état** des éléments (et donc à leur niveau de performance instantané, qui peut être dégradé en cas de contamination ou perturbation extérieure);
- **Leur configuration**, c'est-à-dire leur mode d'exploitation comme le sens d'exploitation des pistes, ou l'affectation des banques d'enregistrement entre les différentes compagnies (il n'est en effet pas possible d'obtenir la performance maximale d'un élément dans toutes les conditions);
- **Leur nombre**.

Il est essentiel ici de comprendre les liens entre ces différents concepts. Il est généralement nécessaire de jouer sur plusieurs aspects de façon simultanée pour améliorer la performance générale du système. Par exemple, augmenter le nombre des éléments ne permet pas toujours d'augmenter le niveau de performance, si la géométrie de ces éléments n'est pas favorable. Ainsi, l'ajout d'une seconde piste n'est pas systématiquement synonyme d'un doublement de la capacité si les deux pistes ne peuvent pas être opérées de manière indépendante (par exemple avec des pistes sécantes, ou des pistes parallèles trop proches l'une de l'autre).

Pour le côté avion, ces éléments correspondent aux éléments listés ci-dessous :

- Les postes de stationnement, et leur typologie (au contact du terminal ou au large, connectés via une passerelle ou non, le nombre de postes, la possibilité de les utiliser simultanément, etc.);
- Les pistes (leur nombre, la possibilité de les utiliser simultanément, l'état de contamination, etc.);

- Les voies d'accès à la piste au décollage ;
- Les bretelles de sorties des pistes ;
- Les voies de circulation connectant les pistes et les postes de stationnement ;
- Le dispositif de circulation aérienne en approche qui se trouve à l'interface entre les espaces aériens et l'infrastructure au sol.

Pour le côté aérogare, ils correspondent aux éléments suivants :

- Les banques d'enregistrement : leur nombre, leur configuration (dédiées à des compagnies ou banalisées) ;
- Le contrôle sûreté ;
- Le contrôle aux frontières et le contrôle douanier ;
- Les salles et portes d'embarquement ;
- Les espaces de circulation entre les points de passage ;
- Les zones d'attentes, incluant les zones commerciales (restauration, boutiques).

Ce sont ces éléments d'infrastructures qui influencent directement les paramètres qui permettent de définir la capacité du système.

3.1.2. Trafic

Pour reprendre la définition du point de vue système donnée au début de ce guide, le trafic correspond au flux qui circule à travers les liens, les processeurs et les réservoirs. Si l'impact du trafic sur la performance du système est moins directement visible que celui de l'infrastructure, il reste cependant loin d'être négligeable. Ce sont les caractéristiques de ce trafic qui influencent directement la capacité de l'aéroport dans son ensemble, en termes de typologie et de proportion. Par exemple, la présence de personnes à mobilité réduite (PMR) dans les aérogares va avoir une influence directe sur les niveaux d'écoulement dans les zones de circulation (elles occupent en effet un espace plus important, et se déplacent avec une vitesse réduite) ainsi qu'aux points de passage. Mais si la proportion de PMR est faible, l'impact sur le flux ne sera ressenti qu'instantanément et sera quasiment invisible à une échelle de temps plus longue.

Côté avion, ces facteurs correspondent à :

- La typologie du trafic en matière de types avions (catégorie de turbulence de sillage pour les séparations à la piste, et catégorie d'envergure pour les postes de stationnement, ou catégorie de performances pour d'autres facteurs comme les contraintes d'occupation de piste) ;
- La proportion d'avions de chaque catégorie dans la flotte globale ;
- La répartition du trafic entre départs et arrivées.

Côté aérogare, ils correspondent à :

- La typologie des passagers (passagers « habitués », PMR, passagers en groupes) ;
- L'origine ou la destination des passagers (domestique ou international qui nécessitent des contrôles différents) ;
- La typologie des vols (régulier, charter ou bas coût) qui a un impact par exemple sur le nombre de bagages par passager (bagages cabine ou de soute) ;
- La répartition des passagers entre passagers au départ, à l'arrivée ou en transit ;
- La présentation des passagers au départ dans l'aérogare (c'est-à-dire la répartition temporelle de l'arrivée à l'aéroport et aux différents points de passage).

Comme pour les facteurs liés à l'infrastructure, ils ont une influence directe sur les paramètres de base du calcul de la capacité.



TURBULENCE DE SILLAGE

La turbulence de sillage est la raison principale qui requiert d'imposer des séparations entre les aéronefs dans les espaces aériens et sur les pistes. Tous les aéronefs en vol génèrent de la turbulence de sillage qui prend essentiellement la forme de deux tourbillons. Le risque pour l'aéronef qui traverse la turbulence de sillage de l'aéronef qui le précède est d'autant plus important que l'aéronef qui génère la turbulence de sillage est grand et l'aéronef qui la subit est petit.

Il s'agit d'un phénomène physique de mécanique des fluides qui s'explique par la différence de pression entre le dessous et le dessus des ailes qui permet la génération de portance. À chaque bout d'aile, l'air en haute pression sous l'aile s'enroule vers la zone de basse pression située au-dessus de l'aile pour former un tourbillon.

Pour les avions de lignes, la formation du tourbillon à partir de l'enroulement initial s'établit derrière l'avion en l'espace d'une distance d'environ 10 fois l'envergure de l'appareil. Le tourbillon subsiste généralement quelques minutes en s'enfonçant doucement sous la trajectoire de l'avion. On peut donc retrouver la turbulence de sillage jusqu'à 10NM derrière un avion de ligne et moins de 1000 pieds sous sa trajectoire. Les tourbillons restent concentrés dans un volume très restreint (moins de 2 envergures de large) et conservent leur énergie jusqu'à leur désintégration.

Au voisinage des aéroports, les interactions avec le sol notamment les rebonds rendent leurs trajectoires difficiles à prévoir.

Pour plus d'information sur le sujet, le lecteur pourra se référer à la Note d'Information Technique disponible sur LIBELaéro (La Turbulence de Sillage, avril 2016).

3.1.3. Les procédures

La dernière catégorie de facteurs d'influence directe correspond aux procédures opérationnelles, c'est-à-dire l'ensemble des règles qui définissent la façon dont les entités (passagers ou avions) interagissent aussi bien avec leur environnement qu'entre elles. L'ensemble du processus aéroportuaire est très réglementé pour des raisons de sécurité et de sûreté et la très grande partie des interactions que l'on peut observer sont définies par des procédures, qui définissent le comportement des entités au sein du système. Ces contraintes sont particulièrement visibles du côté avion où tout le processus du poste de stationnement de départ au poste de stationnement à l'arrivée est cadré aussi bien du côté du contrôle aérien et de l'exploitant que du côté de la conduite des appareils au sein des compagnies aériennes, alors que côté aérogare, une plus grande liberté est laissée aux passagers, bien qu'ils aient un certain nombre de missions obligatoires qui font, elles, l'objet de procédures spécifiques.

Il est important de noter que ces procédures peuvent être des règles formelles (c'est-à-dire des règles écrites – textes réglementaires, manuels d'exploitation) comme des pratiques opérationnelles locales (us et coutumes liés aux habitudes et au savoir-faire des personnes sur place).

Côté avion, ces procédures réglementaires régissent notamment la façon dont les avions doivent être séparés les uns des autres pour éviter les risques de collision ou de rencontre avec les turbulences de sillage d'autres appareils.

Les pratiques d'exploitation locales sont par définition beaucoup plus variées, puisqu'elles dépendent d'une part de critères locaux très spécifiques, et d'autre part des personnels présents sur place. Il s'agit souvent de décisions tactiques (c'est-à-dire à des échelles de temps courtes), permettant d'optimiser dans l'instant l'exploitation. Ce sont des pratiques empiriques, qui découlent souvent de l'expérience des agents sur place. C'est pour cette raison que lors de la réalisation d'une étude sur la capacité d'un système, il est fondamental de passer du temps avec les opérationnels pour comprendre leurs pratiques d'exploitation au-delà du seul contexte réglementaire. Ce besoin est d'autant plus vrai lorsque l'on réalise une étude par simulation (cf. Chapitre 4), où une reproduction fidèle et détaillée du comportement des entités est requise.

3.2. Les facteurs d'influence indirecte

Contrairement aux facteurs d'influence directe, les facteurs qui seront présentés dans ce paragraphe n'ont pas besoin d'être étudiés dans le cadre de l'évaluation de la capacité d'un système aéroportuaire donné. Il est toutefois important de les mentionner car, à l'échelle de la planification d'infrastructures aéroportuaires, la compréhension des effets qu'ils peuvent indirectement entraîner sur les problématiques liées à la circulation du trafic aérien permettent souvent d'anticiper les besoins futurs et d'orienter le développement des infrastructures de façon plus optimale que par simple réaction à l'évolution de la demande.

Ils sont de différentes natures et font partie des catégories suivantes :

- Le contexte économique et stratégique,
- L'environnement (dans un sens large),
- Le cadre réglementaire,
- L'évolution technologique,
- Les facteurs humains.

Nous allons dans la suite de ce paragraphe revenir sur ces différentes catégories et les expliciter.

3.2.1. Contexte économique et stratégique

Le contexte économique national et international a un impact fort sur les volumes des échanges de passagers et de fret, c'est-à-dire sur la demande de trafic. L'impact du contexte économique est particulièrement visible lors des grandes crises récentes (crise financière de 2008, attentats du 11 septembre 2001) où des baisses du trafic ont été observées dans les zones concernées ainsi qu'une modification notable de la typologie du trafic dans un objectif d'optimisation des coûts (augmentation de l'empport moyen, c'est-à-dire le nombre moyen de passagers par avion).

En complément du contexte économique global, le contexte local a également un impact. Les caractéristiques de l'activité économique locale influencent en effet la nature même du trafic. Ainsi, la forte présence d'entreprises va induire un trafic affaire important, et nécessitera des liaisons vers les grands hubs proches, voire la création d'un hub sur place. Une forte activité touristique entraînera un fort trafic non-régulier des tour-opérateurs ainsi que la présence de compagnies à bas coûts. Les avions utilisés et l'organisation des vols (du point de vue des horaires) en seront influencés.

Le contexte stratégique correspond à la fois à celui des compagnies aériennes, et à celui des aéroports. Côté aéroport, la stratégie s'exprime par différents leviers :

- Le choix du type d'investissements retenu et du montant qui leur est alloué. Ils impactent directement l'infrastructure, et donc sa capacité.
- La politique tarifaire qui peut permettre d'attirer des types de trafic particuliers (compagnies à bas coûts, aviation d'affaires), avec un impact sur les types d'avions et de passagers et sur la répartition du trafic sur la journée.
- La qualité de service et les services offerts aux passagers de manière générale ; pour maximiser l'utilisation de ses ressources, un exploitant peut faire le choix de « dégrader » sa qualité de service (ce qui s'exprime généralement par des retards plus importants et un confort moindre pour les passagers). Il peut également proposer des services spécifiques pour attirer certains types de passagers, par exemple en mettant en place des salons d'attente pour les passagers haute-contribution.
- La gestion opérationnelle des ressources, qui peut varier d'un aéroport à un autre, par exemple en matière d'allocation des postes de stationnement, ou en matière de mise à disposition des ressources lors des pointes horaires.

Ces paramètres sont évidemment souvent liés les uns aux autres. Par exemple, attirer des passagers à haute contribution peut nécessiter à la fois des investissements spécifiques et un haut niveau de qualité de service.

Concernant les compagnies aériennes, celles-ci cherchent à cibler leurs marchés, du point de vue de la nature des passagers transportés et des destinations de leur réseau. Pour cela, elles choisissent au mieux leurs avions en fonction de critères économiques (coûts d'acquisition, de fonctionnement, de maintenance) ainsi que leurs produits (fréquence, services à bord, services au sol...) afin de satisfaire leurs clientèles. Cette stratégie se traduit en une nature de l'offre spécifique à chaque compagnie aérienne, leur permettant ainsi de se différencier vis-à-vis des passagers.

Les stratégies des deux entités (compagnies aériennes et aéroports) sont étroitement liées, l'une influençant directement l'autre et vice versa. La modification de la politique tarifaire d'un aéroport peut entraîner l'arrivée ou le départ de certaines compagnies aux caractéristiques particulières. Inversement, une compagnie aérienne qui souhaite s'implanter sur une infrastructure spécifique peut entraîner de la part de l'aéroport des modifications de sa stratégie, si l'enjeu économique de cette implantation est suffisant.

3.2.2. Facteurs environnementaux

Comme indiqué au début de ce chapitre, les facteurs environnementaux correspondent à l'environnement dans lequel s'insère l'aéroport. Cela correspond aussi bien à la météorologie de la zone, qu'à la topographie locale ainsi qu'au contexte urbain dans lequel s'insère l'aéroport. Bien que ces facteurs soient d'influence indirecte sur la capacité, leur impact est particulièrement important sur celle-ci et sur le fonctionnement du système de manière générale.

La météorologie a une influence sur le côté avion (ainsi que sur l'accès à l'aéroport, partie qui n'est toutefois pas traitée dans ce guide), puisqu'elle entraîne parfois des modifications importantes des paramètres de base utilisés dans l'évaluation de la capacité :

- Les séparations à appliquer entre les avions peuvent être augmentées de façon importante lorsque les conditions de visibilité sont mauvaises, ou qu'un événement particulier survient à proximité de l'aéroport (orage, vents forts). Les mauvaises conditions météorologiques peuvent entraîner jusqu'à la fermeture pure et simple de la plate-forme dans certains cas, entraînant d'importants retards et des annulations de vols.
- La contamination de l'infrastructure (son état) par la pluie, la neige ou le gel peut entraîner une augmentation des distances d'atterrissage et donc modifier les contraintes d'occupation de piste, ce qui nécessite des précautions supplémentaires sur la séparation entre aéronefs pour limiter le taux d'approche interrompue. Une approche interrompue implique la perte d'un mouvement à la piste, et la nécessité de réinsérer dans la séquence d'approche l'avion ayant remis les gaz.

L'impact sur la capacité d'un système des conditions météorologiques est généralement limité dans le temps. Cela peut-être un événement de quelques minutes (orage), de quelques heures (brouillard) ou saisonnier (neige et conditions givrantes). Lorsqu'un événement météorologique devient fréquent et récurrent, l'exploitant de l'infrastructure met généralement en place des moyens lui permettant de maintenir au plus haut son niveau de performance durant l'évènement. C'est le cas par exemple sur les aéroports du nord de l'Europe, où des moyens importants sont mis en œuvre durant la saison hiver pour maintenir l'accessibilité et la performance des infrastructures.

La topographie locale ainsi que l'urbanisation sont au contraire des éléments immuables auxquels il faut s'adapter de manière permanente. Ils ont un impact sur :

- Les procédures; en raison de la topographie, certaines procédures particulières peuvent être mises en place. Celles-ci sont généralement plus contraignantes que les procédures « standards ».
- Les infrastructures; la présence d'éléments naturels contraignants (montagne, mer) peut limiter l'expansion des infrastructures et représenter un frein au développement des installations et de l'activité de manière globale.



L'AÉROPORT DE NICE CÔTE D'AZUR, ENTRE MONTAGNE, MER ET VILLE

L'aéroport de Nice Côte d'Azur, premier aéroport de France en termes de trafic passagers après les aéroports parisiens (plus de 12,4 millions de passagers en 2016), s'insère dans un environnement local particulièrement contraint.

La présence de montagnes d'abord, avec des sommets culminant à plus de 10 000 pieds au nord de l'aéroport, entraîne une forte dissymétrie de l'espace aérien terminal, avec une importante concentration des procédures sur la moitié sud de l'espace au-dessus de la mer. En particulier, dans les cas où l'aéroport est exploité en configuration 22 (c'est-à-dire lorsque les atterrissages et les décollages se font en direction du sud-ouest), une approche directe est impossible compte tenu du relief, et pose des problèmes d'accessibilité à l'aéroport lorsque cette configuration se couple avec une basse visibilité. En effet, la seule approche aux instruments possible se termine par une manœuvre à vue qu'il n'est possible de réaliser que lorsque la visibilité est suffisante.

La mer est évidemment présente autour de l'aéroport, puisque celui-ci est construit sur un terre-plein gagné sur la Méditerranée. Cette configuration représente un frein évident au développement de l'infrastructure compte tenu des coûts que peuvent représenter des extensions sur la mer. L'aéroport doit donc composer avec son foncier existant pour assurer son expansion.

Enfin, il faut noter que l'aéroport s'insère dans un tissu urbain particulièrement dense. Du point de vue des infrastructures, si la mer limite l'extension au sud, c'est la ville qui limite l'extension au nord. Du point de vue de l'exploitation, plusieurs procédures spécifiques sont mises en place pour limiter l'impact négatif de l'exploitation sur les populations, comme par exemple la procédure en configuration 04 qui permet d'éviter le survol du cap d'Antibes.

3.2.3. Cadre réglementaire

Le cadre réglementaire influence la quasi-totalité des autres facteurs d'influence. Comme abordé au paragraphe 1.4, le régulateur peut avoir une influence directe sur la capacité, à travers les mécanismes de limitation du trafic (fermetures nocturnes, limitation du nombre de mouvements annuel...) pour des raisons environnementales, généralement dans les zones urbaines denses.

Compte tenu de la nature internationale du transport aérien, le cadre réglementaire dépasse généralement les frontières du seul pays sur lequel se situe l'aéroport. À l'échelle mondiale, l'OACI (l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale) produit des normes et des recommandations qui sont ensuite transcrites dans les réglementations nationales par chaque État membre. Dans certaines régions du monde, des agences intergouvernementales permettent l'uniformisation de la réglementation auprès des pays affiliés. C'est le cas par exemple au sein de l'Union Européenne avec l'AESA (Agence Européenne de la Sécurité Aérienne).

Le cadre réglementaire représente deux aspects principaux :

- D'une part l'évolution de la norme qui a une influence sur l'aménagement des infrastructures et les procédures requises pour leur exploitation. Elles définissent par exemple :
 - Les espacements minimaux entre les différents éléments de l'infrastructure (voies de circulation, pistes, postes de stationnement);
 - La nature des équipements nécessaires pour assurer la conformité de l'exploitation (postes d'inspection filtrage, contrôles transfrontaliers, systèmes de navigation aérienne);
 - Les séparations minimales entre aéronefs en vol;

Cet aspect du contexte réglementaire a un impact sur l'infrastructure et les procédures qui sont des paramètres d'influence directe de la capacité.

- D'autre part les questions relatives à la régulation économique du transport aérien, qui va notamment avoir de l'influence sur :
 - La tarification des redevances et taxes aéronautiques liées au service de l'État;
 - Les politiques de désenclavement du territoire au travers des obligations de services publics aboutissant à la création et au maintien de certaines lignes aériennes;
 - Les procédures de coordination déjà évoquées précédemment.

Cet aspect du cadre réglementaire a un impact sur le trafic, c'est-à-dire d'un côté la nature et la quantité de l'offre de transport pour les usagers et de l'autre la demande en nombre de mouvements et de passagers dans les différents aéroports.

3.2.4. Cadre technologique

Le cadre technologique est également un facteur impactant plusieurs paramètres d'influence directe sur la capacité. Il joue sur deux aspects principaux :

- D'une part les caractéristiques des flux de trafic utilisant les infrastructures. Elles correspondent par exemple à :
 - L'amélioration des systèmes embarqués dans les aéronefs qui permettent la mise en place de nouvelles procédures de navigation aérienne plus optimales;

- La modification des caractéristiques physiques des avions permettant une augmentation de l'emport moyen mais pouvant s'accompagner d'une augmentation de l'encombrement au sol ou des contraintes de turbulences de sillage ;
- La systématisation de l'utilisation de services en ligne pour l'enregistrement des passagers.
- D'autre part l'amélioration des systèmes de traitement du trafic aérien comme :
 - Des nouveaux moyens permettant de renforcer les contrôles des passagers dans les aérogares et modifiant leur temps de traitement ;
 - Des nouveaux systèmes de gestion des flux aériens qui optimise le traitement des avions ;
 - Le développement de nouvelles aides à la navigation comme le positionnement par satellite qui autorise l'établissement de nouvelles procédures qui n'étaient pas permises par les moyens conventionnels.

3.2.5. Facteurs humains

Les facteurs humains représentent un facteur d'influence non négligeable, mais qui présente la double problématique d'être difficilement quantifiable et long à étudier.

Ils correspondent à tout ce qui a trait au comportement humain et vont dépendre à la fois de la formation des agents, de la fatigue, du stress induit par des situations particulières ou encore des consignes opérationnelles qui leur sont fournies. Ce sont les facteurs humains qui contribuent entre autres à la différenciation en les notions de capacité maximale, de capacité opérationnelle et de capacité soutenable.

Ils introduisent également de l'aléa et de l'incertitude dans le système (par exemple les temps de traitement ou de réaction aux consignes) qui implique l'utilisation de marges opérationnelles pour assurer la robustesse et la résilience de celui-ci.

Ils ont ainsi un impact direct sur l'efficacité des opérations et donc la capacité générale du système. Les facteurs humains ne sont bien évidemment pas spécifiques au côté avion ou au côté aérogare, puisque bien qu'aides par des systèmes, ce sont toujours des hommes qui sont au cœur du fonctionnement des processus d'un côté comme de l'autre.

Pour illustrer ces notions, prenons l'exemple des pilotes. Ils influencent le niveau de capacité à travers :

- Leur temps de réaction aux clairances données par les contrôleurs aériens, en particulier à l'alignement sur la piste et au décollage où la réactivité aux consignes est particulièrement importante ;
- L'entraînement et l'expérience : une connaissance fine de l'avion permet par exemple d'ajuster la gestion du freinage afin d'emprunter des bretelles de sortie permettant de minimiser les contraintes d'occupation de piste à l'arrivée ;
- La connaissance du terrain : elle permet aux pilotes d'anticiper les manœuvres à effectuer et ainsi d'être plus réactif aux consignes. La bonne connaissance du terrain se ressent en particulier chez les pilotes dont la compagnie est basée sur l'aéroport et qui sont donc amenés à s'y rendre de façon très régulière.

3.3. Paramètres de base du calcul de la capacité

Des facteurs précédemment évoqués découlent un certain nombre de paramètres utilisés dans les méthodes d'évaluation de la capacité d'une infrastructure. Ces méthodes seront décrites plus en détail dans le chapitre suivant.

3.3.1. Côté avion

Pour le cas de la capacité côté avion, un nombre limité de paramètres de base peuvent être utilisés pour évaluer la performance d'une infrastructure. Ils correspondent notamment :

- Aux séparations temporelles à la piste entre deux mouvements successifs (deux départs, deux arrivées ou un départ et une arrivée) ;
- Aux contraintes d'occupation de piste (temps d'occupation de piste ou TOP, c'est-à-dire le temps pendant lequel le système de piste est indisponible pour un autre avion) ;
- Au séquençement des avions à la piste ;
- Au temps d'escale des avions (qui est utilisé plus spécifiquement pour évaluer la capacité du stationnement).

Ces paramètres sont déterminés par les caractéristiques physiques de l'infrastructure, la typologie du trafic ainsi que les procédures d'exploitation en vigueur. Par exemple, les séparations temporelles vont dépendre des catégories de turbulence de sillage des avions et de contraintes liées à la géométrie de l'infrastructure ; et le temps d'escale des avions va dépendre de la stratégie des compagnies aériennes et de la taille des avions.

À l'aide d'outils d'évaluation de la capacité, il devient possible de réaliser le calcul à partir de ces paramètres. Nous reviendrons plus en détail sur le calcul dans le chapitre 4 portant sur la détermination de la capacité aéroportuaire.

Le schéma ci-dessous résume les principaux éléments discutés ici et leur type d'influence sur la capacité du système côté avion.

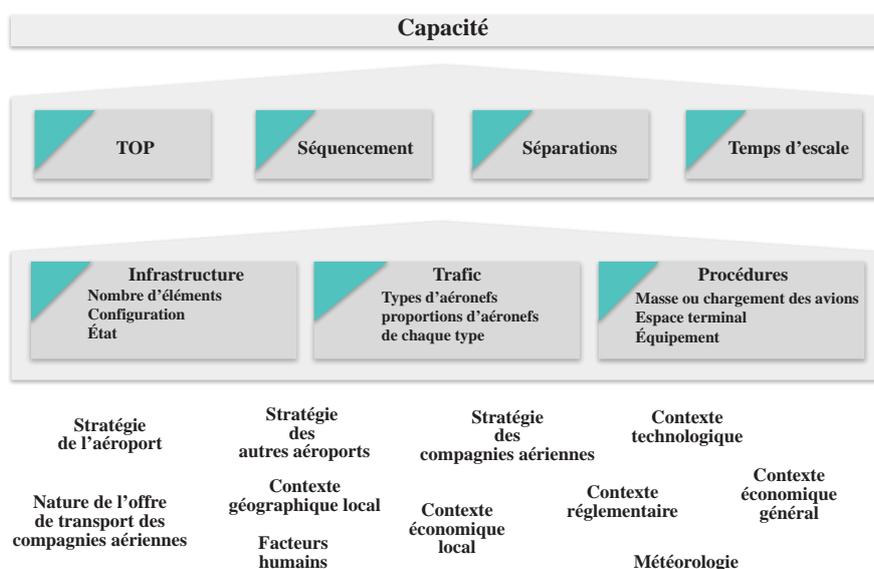


Figure 3 : Schéma des paramètres d'influence de la capacité côté avion

3.3.2. Côté aérogare

Pour le cas de la capacité côté aérogare, la quantité de données à prendre en compte pour l'évaluation est un peu plus importante que pour le côté avion, en raison de la plus faible homogénéité des processus et des entités à traiter et la plus forte dispersion des passagers dans les aérogares. En effet, les passagers ont tous leurs propres caractéristiques, avec un certain nombre de « missions » à effectuer. Ils doivent ainsi (selon qu'ils arrivent ou qu'ils partent) :

- S'enregistrer ;
- Franchir le contrôle d'inspection filtrage ;
- Franchir le contrôle frontalier ;
- Embarquer/Débarquer ;
- Franchir le contrôle douanier ;
- Récupérer leurs bagages.

D'autre part, tous les passagers ne doivent pas nécessairement effectuer l'ensemble de ces formalités. C'est le cas par exemple des passagers en transit, ou de ceux qui se présentent au départ sans bagage de soute (et donc n'ont pas à les enregistrer), des passagers en provenance et à destination d'un aéroport domestique qui n'ont pas à passer de contrôle transfrontalier ou de contrôle douanier, etc. La quantité de données nécessaire liée à cette hétérogénéité des profils est donc importante.

Les paramètres du calcul de la performance d'un système pour le côté aérogare sont les suivants :

- Le temps de traitement aux différentes étapes ;
- La stratégie d'allocation des ressources selon les caractéristiques des passagers ;
- Les surfaces disponibles pour l'installation des ressources et leurs espaces d'attente respectifs ;
- Le niveau de qualité de service ciblé, exprimé sous forme de ratio de densité de passagers et de temps d'attente maximum au niveau des filtres.

Les caractéristiques des passagers (c'est-à-dire la typologie du trafic) vont influencer directement ces différents paramètres. Il est donc nécessaire d'acquérir en complément des données sur ces caractéristiques comme la proportion de passagers avec des bagages de soute (paramètres dépendant lui-même de la stratégie des compagnies aériennes présentes), la proportion de passagers qui s'enregistrent en ligne ou le nombre moyen d'accompagnants par passager pour la problématique des espaces publics.

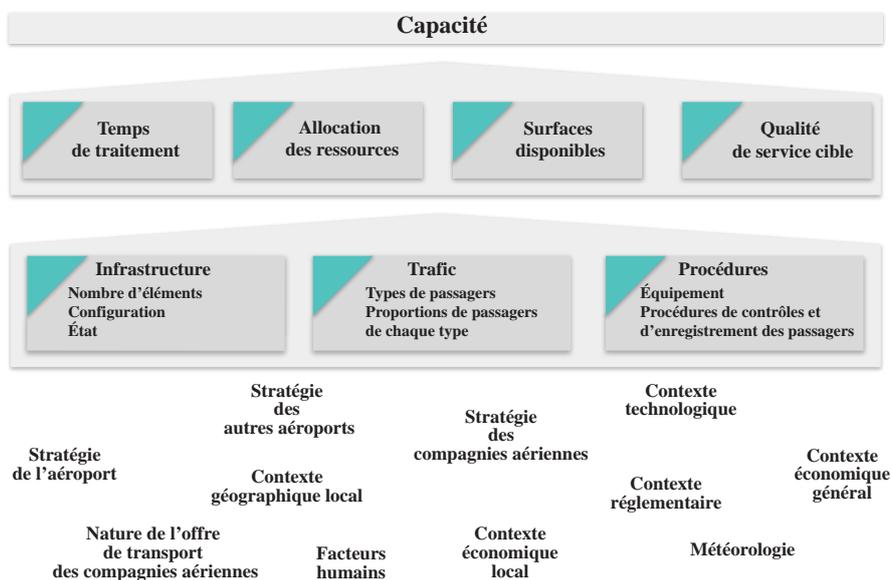


Figure 4 : Schéma des paramètres d'influence de la capacité côté aérogare

4. Évaluation de la capacité d'une infrastructure

Lorsque l'on souhaite évaluer la capacité d'une infrastructure, il est essentiel de se poser un certain nombre de questions en amont du processus afin d'anticiper au plus tôt les moyens nécessaires à sa bonne mise en œuvre, du point de vue des ressources matérielles comme humaines. Ces questions sont les suivantes :

- *Pourquoi?* – Selon l'objectif visé par l'étude, il ne sera pas toujours requis d'entrer dans des niveaux de détails très élevés. Il ne sera donc pas nécessaire d'utiliser des outils de simulation complexes et d'acquérir une grande quantité de données pour la mise en œuvre de l'étude. Le but visé est également important pour déterminer les indicateurs à produire au cours de l'étude permettant de présenter de la meilleure façon les résultats.
- *Quand?* – Le temps requis pour la mise en œuvre de certains types d'outils est variable, il est donc nécessaire de planifier le démarrage des études en conséquence.
- *Comment?* – La préparation d'une méthodologie adaptée est importante pour évaluer les ressources nécessaires à la réalisation de l'étude, et ce sur l'ensemble du processus (de la phase d'acquisition de données à la phase de production et d'analyse des résultats).
- *Qui?* – Si certains types d'études ne nécessitent pas une expertise poussée dans le domaine de la capacité pour être réalisées, l'utilisation de certains outils, et en particulier les logiciels de simulation demandent eux des utilisateurs aguerris pour être utilisés de manière juste et efficace.

Dans cette partie, nous reviendrons sur l'ensemble du processus en suivant son déroulement logique.

4.1. Besoins et types d'études

Si les études de capacité ont régulièrement comme finalité l'évaluation de la performance d'une infrastructure dans le cadre des problématiques d'aménagement ou de coordination, il est réducteur de ne considérer que ces cas.

D'une part nous avons vu à travers les définitions fournies au Chapitre 1 que la capacité peut correspondre à plusieurs notions, chacune ayant son intérêt propre pour les différents acteurs qui gravitent autour d'une plate-forme aéroportuaire. Ainsi, il est possible de définir trois catégories d'études types, chacune étant associée à une notion de capacité différente :

- **Les études dites structurelles** qui correspondent à des études à une échelle macroscopique à moyen long terme qui consiste à mesurer la capacité maximale dans un objectif d'aménagement. Dans ce type d'étude, l'aspect le plus critique concerne les hypothèses qui sont prises, en particulier les hypothèses de trafic à long terme.
- **Les études de programmation** à une échelle de temps plus courte afin d'évaluer pour une infrastructure existante les quantités de trafic qui pourraient être traitées pour les saisons aéronautiques à venir. Il s'agit généralement de déterminer la capacité soutenable de l'infrastructure, pour assurer une bonne adéquation entre offre et demande, et anticiper d'éventuelles difficultés au sol comme en l'air.
- **Les études opérationnelles** qui s'intéressent à des problématiques à court terme de gestion des opérations. Il s'agit ici de déterminer la capacité opérationnelle. L'objectif est d'intégrer dans ce type d'étude les contraintes qui apparaissent à très court terme afin d'obtenir le niveau de performance « instantané » de l'infrastructure. Cela permet de mettre à jour le niveau de performance des infrastructures, et d'anticiper les mesures de régulation opérationnelles à mettre en place.

Il doit être noté que la capacité d'une infrastructure peut varier sensiblement en fonction des conditions d'exploitation. Il peut être utile pour l'exploitant de connaître son niveau de performance dans des conditions dégradées, notamment lorsque celles-ci se présentent de manière récurrente (conditions météorologiques spécifiques, indisponibilité de certaines infrastructures, etc.). Les trois types d'études décrites précédemment peuvent donc être déclinés dans différentes conditions.

4.2. Méthodologie générale

Quelle que soit la question qui se pose, et que l'on s'intéresse au côté passagers ou au côté avions, il est possible de décliner de manière générale une méthodologie commune à l'évaluation de la capacité sur une infrastructure aéroportuaire. Une fois que le cadre est parfaitement défini (c'est-à-dire une fois que la réponse à la question pourquoi précédente est donnée), il faut dans un premier temps être capable de déterminer les outils qui seront utilisés pour réaliser l'étude. Ce sont en effet les outils qui conditionnent à la fois la quantité de données nécessaires à la réalisation de l'évaluation, la typologie des indicateurs qu'il est possible de produire, ainsi que la nature des scénarios qui peuvent être considérés.

Une fois cette étape préalable concernant le choix du ou des outils effectuée, le processus générique est le suivant :

- *Identification des données nécessaires* : comme indiqué précédemment, le type et la quantité des données requises pour l'étude dépend du type d'outils utilisés, mais également d'autres facteurs comme le niveau de détail de l'étude, ainsi que la précision recherchée dans les résultats et les conclusions.
- *Production des données* : dès que les données sont identifiées, il convient de procéder à leurs productions dès que possible, certaines pouvant requérir un temps long pour être acquises. C'est par exemple le cas pour des données qui nécessitent de réaliser des enquêtes de terrain. Les délais de production des données peuvent dans certain cas fortement contraindre le planning de l'étude.
- *Mise au point des scénarios d'étude* : cette phase peut se faire en parallèle de la phase d'acquisition des données, lorsqu'elle est requise (c'est-à-dire lorsque l'on cherche à évaluer la performance d'une infrastructure dans des conditions futures, ce qui est le cas pour des études à moyen ou long terme). Les scénarios consistent généralement en la modification d'un ou plusieurs éléments, comme le trafic (quantité et/ou typologie), l'infrastructure (ajout ou retrait d'éléments, reconfiguration de certaines zones) ou les règles d'utilisation du système ou de certaines sous-parties.
- *Définition des indicateurs pertinents* : avant de passer à la phase de conception des modèles, il est essentiel de définir les indicateurs qui permettront de présenter les résultats de l'étude. Lors de l'évaluation de la capacité d'une infrastructure, il ne s'agit pas systématiquement d'évaluer la quantité de trafic qui s'écoule (en passagers par heure ou mouvements par heure). Il est de plus en plus nécessaire de produire des indicateurs mettant en lumière d'autres problématiques, par exemple des problématiques environnementales, de sécurité ou des indicateurs mettant davantage en valeur le niveau de saturation d'une infrastructure. Cette réflexion doit se faire avant la mise au point des modèles car elle a généralement une forte influence sur celle-ci, les modèles devant parfois être adaptés spécifiquement à la production d'un indicateur en particulier.
- *Mise au point des modèles* : quel que soit le type d'outil utilisé (outils analytiques, outils de simulation en temps réel ou outils de simulation en temps accéléré), il convient de mettre au point le modèle correspondant à chacun des scénarios définis. Leur réalisation s'effectue en paramétrant d'une part l'infrastructure (via un certain nombre de paramètres pertinents pour les outils analytiques, ou en reproduisant l'infrastructure pour les outils de simulation), ainsi que ses règles de fonctionnement.
- *Vérification, calibration et validation des modèles* : Il s'agit d'un processus itératif comportant trois étapes. Afin de s'assurer du bon fonctionnement des modèles, il est important de réaliser une première étape de vérification, consistant à s'assurer de la bonne implémentation des règles d'exploitation et à l'absence d'erreur mathématique ou de programmation dans le fonctionnement global. La deuxième étape correspond à la calibration du modèle. Il s'agit ici, en ajustant les paramètres et les règles du modèle de reproduire le plus fidèlement possible une situation réelle mesurée, sur la base d'éléments quantitatifs, mais également qualitatifs dans certains cas. La dernière étape est la validation, qui s'effectue sur un échantillon de données différent de celui utilisé pour la calibration. Les indicateurs

quantitatifs utilisés dans cette phase de vérification, calibration et validation correspondent aux indicateurs définis précédemment dans la méthodologie auxquels peuvent être associés des éléments qualitatifs supplémentaires. Les étapes de vérification et de calibration doivent être répétées si nécessaire jusqu'à la validation définitive du modèle. Cette phase est importante, puisqu'elle permet d'une part d'asseoir la crédibilité des modèles et donc des résultats qu'ils produiront, et d'autre part de mesurer le biais induit par la modélisation dont il faudra tenir compte lors de l'interprétation des résultats.

- *Production et analyse des résultats*: la dernière étape consiste à produire et analyser les résultats, sur la base des indicateurs pertinents choisis précédemment et du biais mesuré dans la phase précédente (voir Figure 5 ci-après). Cette étape est importante et mérite beaucoup d'attention, puisque c'est à travers celle-ci que la qualité de l'évaluation de la capacité de l'infrastructure est mise en avant. L'analyse des résultats peut dans certains cas conduire à modifier les scénarios d'études pour permettre la prise en compte d'éléments qui n'avaient pas été anticipés.

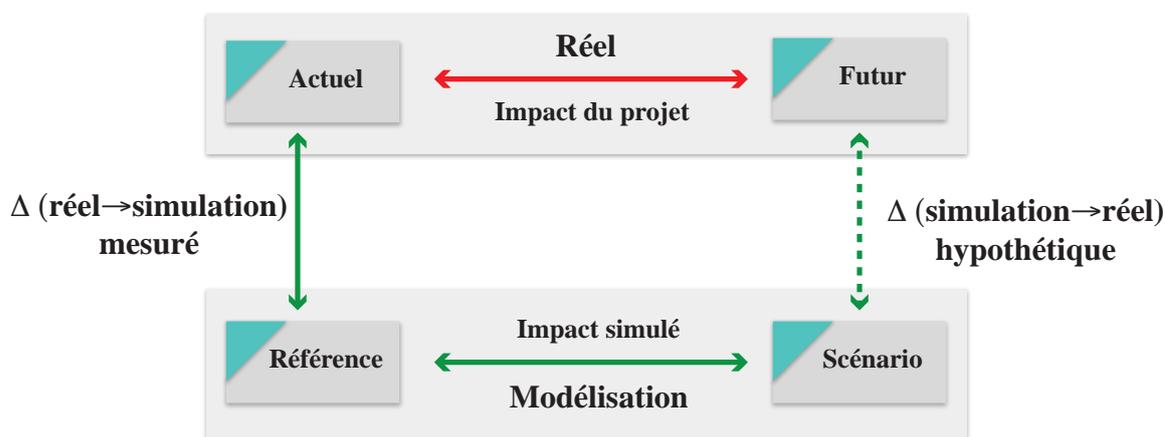


Figure 5 : Schéma d'évaluation d'un impact à l'aide d'une modélisation

Le schéma ci-dessous résume l'ensemble de ces différentes étapes.

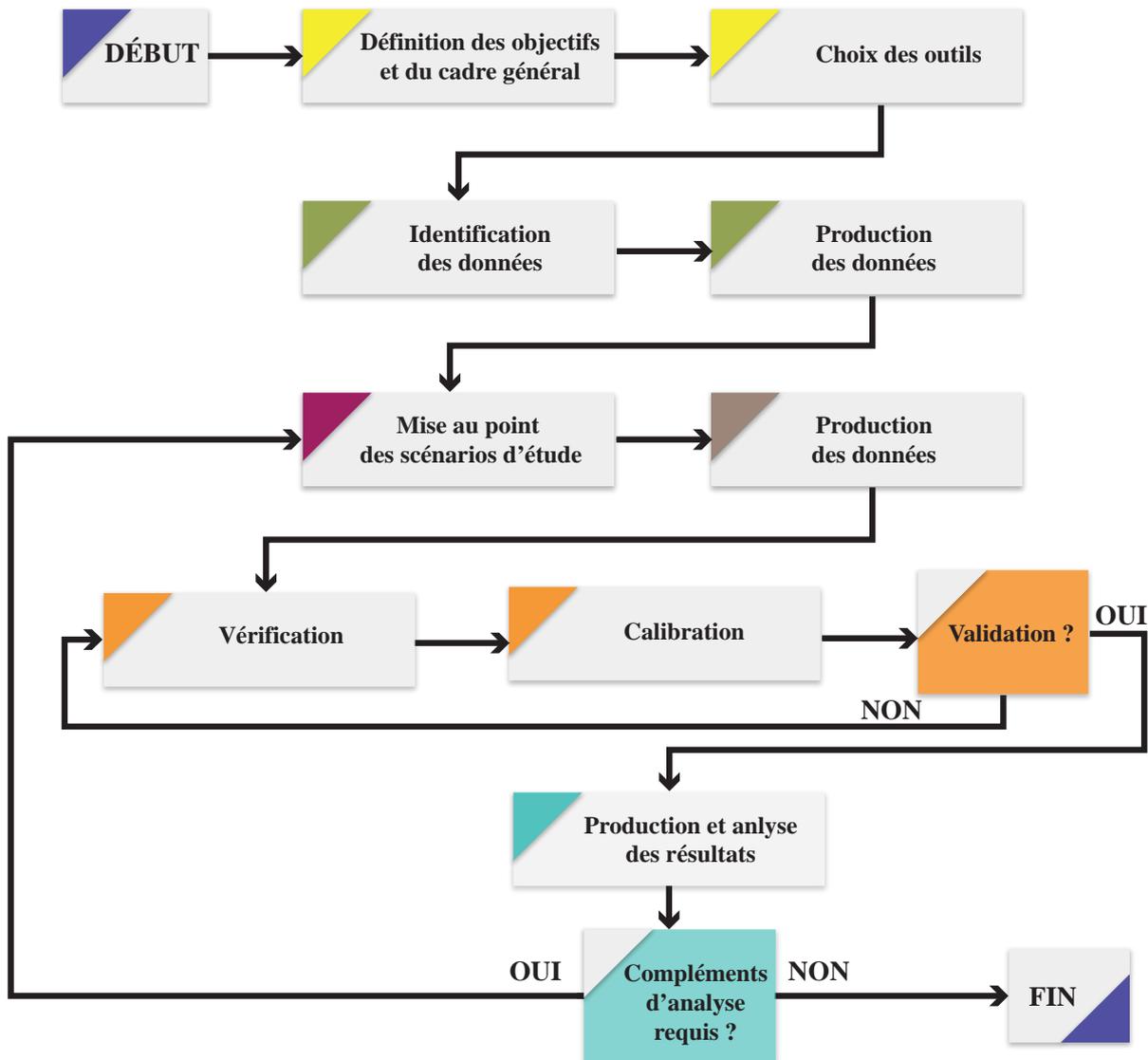


Figure 6 : Méthodologie générale d'une étude d'évaluation de la capacité aéroportuaire

4.3. Données

Les données nécessaires à l'évaluation de la capacité d'une infrastructure aéroportuaire peuvent être de natures très variées selon la question posée. Toutefois, trois catégories de données sont systématiquement requises (avec un niveau de détail plus ou moins important) :

- Les données d'infrastructure ;
- Les données de trafic ;
- Les règles d'utilisation des ressources.

Les données d'infrastructure correspondent à l'aspect « physique » du système. Pour une aérogare, cela correspond à l'agencement des terminaux (surface des halls, positionnement des entrées et des sorties, des escalators, etc.) ainsi qu'au nombre et à la disposition des différentes ressources (comptoirs, postes d'inspection filtrage, etc.). Pour le côté avion, cela correspond au réseau de voies de circulation et de pistes, ainsi qu'aux postes de stationnement ou tout autre élément pouvant présenter un intérêt dans l'étude, comme les aires de dégivrage. Lorsque l'on s'intéresse au système de piste, il est nécessaire de considérer au moins l'interface entre l'espace aérien terminal et l'infrastructure au sol (approches finales et montées initiales). Ces données peuvent être obtenues à partir de plans fournis par l'exploitant, des informations aéronautiques publiées, ou encore à partir de relevés effectués sur place.

Comme indiqué précédemment (cf. Chapitre 3 sur les facteurs d'influences), le trafic a un impact fort sur le débit d'une infrastructure. Les données de trafic sont relativement différentes selon que l'on s'intéresse au côté passagers ou au côté avion. Concernant l'aérogare, les données correspondent d'une part aux vols (horaire, nombre de passagers, provenance/destination, compagnie, etc.) et à la typologie des passagers d'autre part. La connaissance de ces données est déterminante pour l'étude de la capacité d'une aérogare dans la mesure où les formalités à accomplir, les comportements ou le niveau de qualité de service acceptable peuvent différer selon les passagers. Si les données des vols peuvent être acquises à partir des plannings, celles concernant la typologie des passagers nécessitent généralement de réaliser des enquêtes sur place en interrogeant un échantillon représentatif de passagers. À défaut, des hypothèses selon le type d'aéroport, de compagnie et de destination peuvent être prises. Suivant les outils utilisés, il peut également s'avérer nécessaire de savoir à quel moment les passagers se présentent à un point particulier de leur parcours (à l'entrée dans l'aérogare par exemple). Cette donnée s'obtient à partir des courbes de présentation des passagers qu'il est possible d'obtenir localement ou en utilisant des courbes standards selon le type de vol (affaire, loisir, charter, low-cost, etc.). Pour le côté avion, les données de trafic (type d'avion, horaire) peuvent être obtenues à partir du planning ou à l'aide des trajectoires enregistrées par les systèmes radar lorsqu'elles sont disponibles.

4.4. Indicateurs

Le débit en nombre de mouvements ou de passagers par unité de temps est en général l'indicateur le plus souvent utilisé pour quantifier un niveau de capacité. Mais il est souvent utile d'exprimer les résultats également avec d'autres indicateurs, révélateurs d'autres phénomènes, et notamment des conditions opérationnelles pour lesquelles le niveau de performance calculé est atteint. On peut citer par exemple :

- Le temps de roulage moyen par avion entre la piste et le poste de stationnement (au départ comme à l'arrivée); cet indicateur peut mettre en évidence des problématiques de congestion, sur les aires de trafic, sur les voies de circulation ou au niveau des bretelles d'accès à la piste.
- La longueur des files d'attentes en amont des points de filtrage dans les aérogares; ces données peuvent être importantes, en complément de la capacité (en nombre de passagers par heure) de chaque point de filtrage pour dimensionner efficacement les espaces d'attente.
- La consommation globale de carburant et les émissions de polluant; il est aujourd'hui de plus en plus important d'effectuer des analyses multicritères qui incluent les problématiques environnementales. En effet, il n'est pas rare que l'amélioration de la capacité dans un scénario se fasse au détriment d'autres indicateurs comme la consommation de carburant globale des aéronefs.

Ces quelques indicateurs ne sont bien évidemment que des exemples parmi d'autres, des besoins spécifiques émergeant généralement en fonction du type précis de l'étude, du commanditaire et de la configuration de l'infrastructure. Si la performance brute est souvent le sujet principal d'une étude, il est néanmoins possible de ne s'intéresser qu'à la problématique de la qualité de service, et plus généralement aux conditions d'écoulement des flux. Il est ainsi possible dans certains cas de chercher uniquement à améliorer la qualité de service et de n'utiliser que des indicateurs relatifs à cette problématique sans même chercher à quantifier le débit.

4.5. Scénarios

Il est souvent primordial de considérer plusieurs scénarios lorsque l'on réalise une étude de capacité, en particulier pour les études dites structurelles ou les études de planification qui se font à des horizons plus ou moins lointains où l'incertitude peut-être importante, autant sur les caractéristiques de l'infrastructure que sur le trafic. À des horizons de plusieurs années voire de plusieurs dizaines d'années, couvrir l'ensemble des éventualités est un exercice qui implique la prise en considération d'hypothèses multiples, aboutissant à de nombreux scénarios différents suivant les caractéristiques de l'infrastructure projetée et du trafic anticipé.

Concernant le trafic, les scénarios peuvent correspondre à plusieurs hypothèses du point de vue de la croissance de la demande (par exemple des scénarios « optimistes » envisageant une forte croissance de la demande, et des scénarios « pessimistes » envisageant une croissance faible de cette même demande), et du point de vue de la typologie (par exemple des scénarios prévoyant un fort développement de l'activité long-courrier, ou de l'activité des compagnies à bas coûts).

Concernant les infrastructures, il s'agit généralement d'enjeux à long terme compte tenu des lourds investissements qu'elles représentent et des délais nécessaires à leur construction. Il n'est pas rare que lorsque plusieurs nouvelles infrastructures sont prévues, les capitaux disponibles ou les contraintes liées au phasage du chantier ne permettent pas de les réaliser toutes en même temps. Aussi, il est souvent requis de modéliser différentes combinaisons de nouvelles infrastructures et différents phasages de leur réalisation, afin d'évaluer la performance du système dans différentes configurations possibles. En complément des nouvelles infrastructures, des problématiques identiques peuvent émerger dans le cas de travaux à plus court terme, avec plusieurs scénarios d'indisponibilité de certaines infrastructures et de nouveaux schémas d'exploitation des infrastructures maintenues en service.

4.6. Outils analytiques et simulation

Il existe deux grandes familles d'outils d'analyse de la capacité aéroportuaire. Les outils analytiques d'une part, et les outils de simulation d'autre part (en temps réel ou en temps accéléré). Ces deux familles d'outils possèdent chacune leurs avantages et leurs inconvénients en matière de champ d'application, de temps de mise en œuvre ou de précision des résultats. Nous allons revenir dans ce paragraphe en détail sur ces deux catégories d'outils.

4.6.1. Les outils analytiques

Les outils analytiques mettent en œuvre une succession de formules mathématiques pour obtenir la capacité d'une infrastructure à partir d'un nombre limité de paramètres. Ils sont généralement simples et rapides à mettre en œuvre, dès lors que l'ensemble des données sont acquises. Les résultats fournis par ce type d'outils offrent une bonne vision au niveau macroscopique de la performance d'une infrastructure, et sont ainsi particulièrement intéressants lorsque l'on souhaite obtenir rapidement une estimation de la capacité d'un système. Cependant, étant des résultats de formules mathématiques, ils ne peuvent être présentés que par des indicateurs quantitatifs prédéfinis lors de la construction de l'outil.

Ces outils sont généralement créés pour répondre à une problématique restreinte à un sous-système particulier. Cela permet en effet de simplifier suffisamment les problèmes de telle sorte qu'ils puissent être résolus par une ou plusieurs relations mathématiques. Il existe donc des outils permettant de traiter la question de la capacité aérogare, d'autres le système de pistes, ou encore les aires de stationnement des avions. Des modèles mathématiques spécifiques à chacune de ces zones permettent d'évaluer leur performance.

Cependant, ces outils ont un champ d'application souvent limité, puisque par construction ils ne peuvent répondre qu'aux questions pour lesquelles ils ont été conçus. Cela signifie que lorsque l'on sort du champ d'étude « classique » ou que l'on s'intéresse à des infrastructures au profil particulier (du point de vue de l'infrastructure elle-même ou de ses modalités d'exploitation), il n'est pas toujours possible d'utiliser ce type d'outil.

Pour le cas des aérogares, les outils analytiques consistent en une application successive de ratios et de formules simples afin de déterminer la capacité de chacun des modules (c'est-à-dire les zones d'attentes, les zones de circulation et les zones de traitement) puis la capacité globale de l'aérogare déduite de la capacité des modules. Pour mettre en œuvre cette méthode, il est nécessaire de connaître les surfaces disponibles dans l'aérogare pour chacune des zones de circulation et d'attente, ainsi que des données agrégées sur la typologie des passagers et les temps de traitement aux différents points de passage. Enfin, des temps d'attente maximum à chaque filtre ainsi que des ratios adaptés au niveau de qualité de service visé doivent être choisis, afin de déterminer l'espace nécessaire par passager dans les différentes zones (pour atteindre un niveau de qualité de service plus élevé, il convient d'offrir plus d'espace par passager pour augmenter son confort ressenti). Par exemple, pour l'enregistrement, le calcul se fait de la façon suivante :

- Pour les banques :

$$C_{banques} = N_{dom} \frac{3600}{T_{dom}} + N_{int} \frac{3600}{T_{int}}$$

Où :

- N_{dom} et N_{int} correspondent respectivement au nombre de banques domestiques et au nombre de banques internationales ;
- T_{dom} et T_{int} correspondent respectivement au temps moyen (en secondes) de traitement pour les passagers domestiques et internationaux ;
- $C_{banques}$ correspond à la capacité des banques d'enregistrement en passagers par heure.
- Pour les zones d'attente :

$$C_{att. enr.} = \frac{S}{R} \times \frac{60}{T_{att. enr.}}$$

Où :

- S correspond à la surface totale d'attente ;
- R correspond au ratio d'allocation d'espace par passager à définir selon le niveau de qualité de service visé ;
- $T_{att. enr.}$ correspond au temps d'attente maximum (en minutes) à l'enregistrement à définir également ;
- $C_{att. enr.}$ correspond à la capacité de la zone d'attente à l'enregistrement en passager par heure.

Pour le cas du système de piste, le calcul se fait généralement en deux étapes. La première consiste à déterminer les séparations minimales entre chaque paire d'avions (en fonction du nombre de catégories d'avions définies par l'utilisateur) et pour chaque type de séquence (arrivée-arrivée, départ-départ, départ-arrivée, arrivée-départ) en fonction des caractéristiques géométriques de l'infrastructure et des conditions locales d'exploitation qui sont représentées pour un nombre limité de paramètres. La seconde étape consiste à déterminer la probabilité de rencontrer chaque paire d'avion (avion leader/avion suiveur) et de type de mouvements selon la typologie du trafic choisie. En corrélant les cadences élémentaires et la probabilité de rencontrer la paire d'avions, l'outil peut alors déterminer la capacité du système. La formule pour déterminer la capacité horaire est la suivante :

$$C_{PISTE} = \frac{3600}{\sum_{i,j} p_{ij} s_{ij}}$$

Où :

- p_{ij} représente la probabilité de rencontrer la paire (i, j) ;
- s_{ij} représente la séparation temporelle (en secondes) requise entre les mouvements i et j ;
- C_{PISTE} la capacité en mouvements par heure de la piste.

Cette méthode fournit une approximation de la capacité maximale d'une infrastructure.

Pour la capacité des aires de trafic, les méthodes analytiques classiques sont celles développés par Horonjeff³. La méthode la plus basique consiste à déterminer la capacité des aires de stationnement d'un aéroport de manière agrégée, sans prendre en compte de restrictions d'utilisation liées à la taille des avions ou au schéma d'allocation. La capacité s'exprime de la façon suivante :

$$C_{AIRE} \leq \frac{u \times N}{\sum_i p_i T_i}$$

Où :

- N représente le nombre total de postes de stationnement disponibles ;
- u est un coefficient d'utilisation des postes de stationnement compris entre 0 et 1, une valeur de 0,8 indiquant par exemple que le poste est occupé 80 % du temps ;
- $\sum_i p_i T_i$ représente la moyenne pondérée du temps d'occupation des postes (p_i correspond à la proportion d'avions de la catégorie i , et T_i correspond au temps d'occupation moyen des postes pour les avions de la catégorie i).

Cette méthode ne donne qu'une estimation de la capacité d'une aire de trafic. Une variante de la même méthode permet d'affiner le calcul, afin de prendre en compte les restrictions d'utilisation des postes à certains types d'avions.

Si des outils types existent pour répondre à certaines problématiques, il n'est pas rare d'avoir à développer des outils spécifiques pour répondre à des problématiques particulières. La relative simplicité du point de vue mathématique comme du point de vue de l'implémentation informatique de certaines solutions permet en effet d'envisager des développements pour des besoins ponctuels.

³ *Planning and Design of Airport, Fifth Edition*

4.6.2. Simulation en temps accéléré

4.6.2.1. Champ d'action et intérêt

Contrairement aux outils analytiques, il ne s'agit pas ici de modéliser mathématiquement le fonctionnement d'un système, mais d'en reproduire le fonctionnement en modélisant le comportement des entités individuellement. L'objectif est de créer dans le simulateur une reproduction du système réel afin de conduire les analyses requises. Le terme reproduction ne signifie pas qu'il s'agit d'une réplique parfaite du système réel. Il est en effet requis de prendre un certain nombre d'hypothèses durant le travail de modélisation afin de retranscrire par des règles simplifiées le comportement des entités. La définition suivante résume l'ensemble de ces points : un modèle de simulation est une réplique simplifiée (le niveau de simplification dépendant des hypothèses prises) et virtuelle d'un système réel dont il doit refléter l'ensemble des propriétés jugées pertinentes au regard du ou des objectifs de l'étude avec une précision suffisante.

Là où les outils analytiques ont un champ d'action limité, la mise en œuvre des outils de simulation en temps accéléré (c'est-à-dire que le temps s'écoule plus rapidement que dans la réalité, par opposition aux outils de simulation en temps réel) est généralement appropriée pour analyser des systèmes complexes, que ce soit du point de vue de l'infrastructure ou de ses règles de fonctionnement, lorsque les indicateurs qui doivent être produits ne peuvent l'être à l'aide des outils analytiques ou lorsque le niveau de précision et de détail requis est important.

La mise en œuvre d'un modèle dans un outil de simulation en temps accéléré consiste d'abord en une étape de dessin des infrastructures (c'est-à-dire la reproduction sur le plan physique), puis une seconde étape de paramétrage des règles opérationnelles qui permet de reproduire les conditions d'utilisation de ces infrastructures.

Ces outils présentent l'avantage de permettre la visualisation des simulations produites. C'est un élément important à plusieurs étapes bien distinctes :

- D'abord dans la phase de mise au point des modèles, la visualisation permet d'une part au modélisateur de constater rapidement la présence d'éventuels problèmes du point de vue opérationnel (mauvais cheminement des passagers ou des avions, points de conflits anormaux, temps d'attente ou de traitement trop important,...) sans avoir à analyser et interpréter des indicateurs. Il est ainsi possible de constater des erreurs dans les données d'entrée ou dans le paramétrage des modèles lorsque celles-ci ont un impact sur le déroulement des opérations.
- Ensuite durant la phase de calibration et de validation, où la visualisation des simulations permet un échange concret et plus direct avec les personnes en charge des opérations sur place. Cette validation qualitative est importante puisqu'en plus de permettre d'améliorer le modèle, elle permet d'asseoir sa crédibilité auprès des différents intervenants, et donc la confiance de ces derniers dans les résultats produits.
- Enfin lors de la production et de la présentation des résultats, la visualisation permet d'offrir dans certains cas une communication plus concrète de certains aspects (goulot d'étranglement, files d'attente,...) plus simples à appréhender visuellement qu'à travers des indicateurs.

Les outils de simulation en temps accéléré sont aujourd’hui utilisables pour l’ensemble des maillons de la chaîne aéroportuaire, depuis les accès à l’aéroport jusqu’à l’espace aérien terminal. Certains outils permettent également l’interconnexion des modules pour réaliser des simulations complètes couvrant à la fois le côté avion et le côté aérogare. Ils disposent pour la plupart des mêmes fonctionnalités de base qui permettent une mise en œuvre rapide et efficace :

- L’import de fichier AutoCAD pour faciliter l’étape de dessin des infrastructures. Ces fichiers nécessitent généralement une mise en forme spécifique (chaque type d’objet devant être mis dans un calque spécifique à sa catégorie pour être reconnu comme tel);
- Des fonctions de paramétrages des règles opérationnelles adaptées au fonctionnement d’une plate-forme aéroportuaire;
- Des outils de production et d’analyse des résultats. Ils peuvent être intégrés à l’outil principal pour une analyse a posteriori ou permettre une visualisation de certains indicateurs pendant l’exécution de la simulation.

4.6.2.2. Limites

Si la simulation en temps accéléré présente de nombreux avantages, il est également important de noter que sa mise en œuvre peut présenter des inconvénients qu’il est important de prendre en compte lors de la définition de la méthodologie d’une étude et plus particulièrement du choix des outils et des techniques qui seront utilisés pour répondre à la question posée.

D’abord, la mise en œuvre d’un modèle dans un outil de simulation en temps accéléré demande un temps sensiblement plus long par rapport à un outil analytique. D’une part le niveau de détail des simulations en temps accéléré étant généralement plus important, la quantité de données nécessaires est plus grande, ce qui implique une campagne d’acquisition de celles-ci plus longue. D’autre part la réalisation des modèles eux-mêmes dans l’outil requiert un temps important, là où l’utilisation d’un outil analytique est quasi-instantanée une fois l’ensemble des données recueillies.

Ensuite l’acquisition et le maintien de la compétence du modélisateur demande un investissement plus important. Si la formation en elle-même ne demande généralement que quelques jours, il est nécessaire de consacrer beaucoup de temps à l’outil pour en maîtriser tous les aspects et être efficace lors de la conception des modèles ainsi que la production des résultats. Une fois acquise, cette compétence se doit d’être maintenue en réalisant des études à intervalles réguliers, sous peine de perdre l’efficacité acquise. Compte tenu du coût d’acquisition de ce type d’outils, il est donc important d’évaluer le besoin non seulement au moment de l’achat mais également dans la durée pour s’assurer que des études régulières permettront de maximiser son utilisation.



Figure 7: Modélisation d'une aérogare et de ses différentes fonctions à l'aide d'un logiciel de simulation

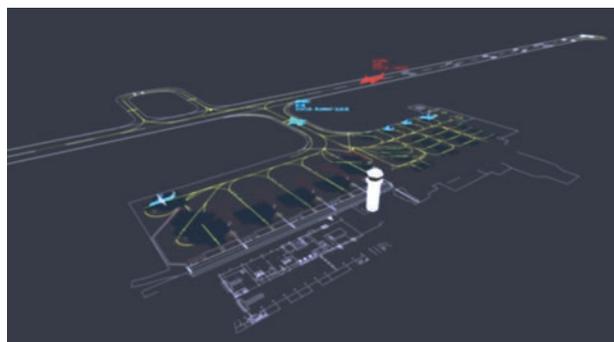


Figure 8: Modélisation du côté avion d'un aéroport et de ses différentes fonctions à l'aide d'un logiciel de simulation

4.6.3. La simulation en temps réel

La simulation temps réel est un outil similaire à la simulation en temps accéléré mais diffère conceptuellement de cette dernière sur un aspect principal qui est que le temps s'y écoule au même rythme que dans la réalité. La reproduction du système réel y est plus fidèle et beaucoup moins simplifiée que dans un simulateur en temps accéléré, à tel point qu'un simulateur temps réel peut même intégrer dans son architecture des éléments réellement présents dans le système réel.



Figure 9: Simulateur temps réel de contrôle aérien de l'ENAC

Dans le domaine de la gestion des flux de trafic aérien, le type de simulateur en temps réel le plus fréquemment évoqué est le simulateur de contrôle aérien. Certains de ces simulateurs mettent en œuvre de véritables contrôleurs aériens humains ainsi que les mêmes postes de travail (mêmes interfaces des écrans radars, mêmes interfaces et logiciels des systèmes de gestion des plans de vol, mêmes micros, combinés et protocoles des systèmes de communication...) que ceux susceptibles d'être déployés dans les centres de contrôles aériens réels. La simplification de la représentation se limite alors à la modélisation des avions, de leurs comportements et de leurs échanges avec le dispositif de contrôle aérien (retours radar simulés, échanges radio avec de « faux » pilotes jouant le rôle d'équipages réels...) ainsi que dans le cas où elle est requise, une visualisation 3D de l'infrastructure et des véhicules à l'extérieur de la tour de contrôle simulée.

L'intérêt de ce type de simulation est de fournir un niveau de crédibilité très significatif. En effet, compte tenu de la très forte ressemblance entre le système réel et sa représentation, le biais introduit par ces outils est par essence généralement négligeable au regard des objectifs des simulations. Une simulation temps réel garantit donc en général la fiabilité des conclusions qui en sont tirées concernant les bénéfices ou inconvénients des scénarios d'étude. Hormis l'expérimentation réelle sur site, il n'existe pas de moyen d'évaluer de façon plus réaliste les effets d'un scénario envisagé.

En contrepartie, la mise en œuvre de simulation temps réel est une tâche lourde du fait des moyens humains et techniques à mobiliser et du temps nécessaire pour les réaliser puis les exploiter.

Leur utilisation dans le cadre de projets visant à améliorer la capacité intervient donc plutôt au stade de la validation finale ou pour aider à la gestion du changement, lorsque les modalités et les détails des projets ont été affinés. Pour les phases exploratoires visant à dégrossir la définition des scénarios envisageables, les simulations temps réel seront en revanche moins adaptées que les méthodes analytiques ou les simulations en temps accéléré.

4.7. Résultats

Une fois que les simulations ont été effectuées, la dernière étape consiste à produire les résultats, sur la base des indicateurs choisis. Comme indiqué précédemment dans la méthodologie générale, c'est une étape cruciale, puisque les résultats refléteront l'ensemble du travail effectué. Il est donc important de ne rien négliger, en particulier dans l'interprétation des résultats produits.

L'analyse des résultats doit en particulier inclure une partie cherchant à expliquer les comportements anormaux, par exemple des temps d'attente anormalement long ou des évolutions brutales d'indicateurs. En effet ces comportements peuvent traduire soit une erreur dans la modélisation soit, s'ils sont justifiés, l'existence d'un point spécifique à surveiller dans l'exploitation du système. Dans ce dernier cas, l'explicitation des causes de ce comportement peut s'avérer utile aux acteurs de l'exploitation tout en renforçant la crédibilité de la modélisation.

L'analyse de la variation des indicateurs entre la situation de référence et les scénarios d'étude modélisés doit tenir compte du biais introduit par la modélisation elle-même et mesuré lors de la phase de calibration-validation.

Les résultats peuvent prendre différentes formes selon l'objectif et le public visés. Ils peuvent être par exemple :

- Des graphiques représentant un indicateur et son évolution ;
- Des tableaux formatés spécifiquement pour mettre en évidence certains aspects ;
- Des vidéos ou captures d'écran (pour les outils de simulations qui disposent d'une fonction d'affichage) mettant en évidence une certaine situation.

Il est évidemment possible d'imaginer d'autres façons de présenter les résultats selon leur nature. Différents exemples de résultats sont montrés dans les figures ci-après.

Sur la Figure 10, un graphique présente l'évolution d'un indicateur (le temps d'attente au point d'arrêt pour les décollages) entre le scénario de référence, et deux scénarios prospectifs aux horizons 2019 et 2024, pour lesquels des hypothèses de trafic et d'infrastructures ont été établies. L'augmentation du trafic dans les scénarios futurs engendre donc une augmentation globale de la congestion au point d'arrêt.

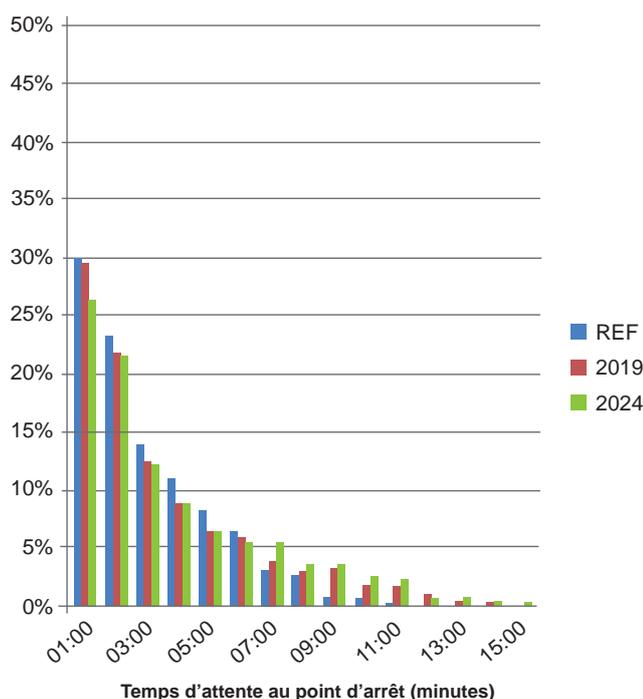


Figure 10: Exemple d'indicateurs présentant l'évolution du temps d'attente en entrée de piste pour trois scénarios

Sur la Figure 11, le tableau représente avec un code couleur la qualité du service rendu aux aéronefs en matière de stationnement. Si un avion est stationné sur un poste préférentiel (c'est-à-dire correspondant à son souhait), le service rendu est considéré comme bon, sinon comme mauvais. La couleur indique le taux d'avions satisfaits. Le tableau présente en ligne les combinaisons de scénarios d'infrastructure et de trafic, et en colonne les journées de référence sélectionnées pour l'étude.

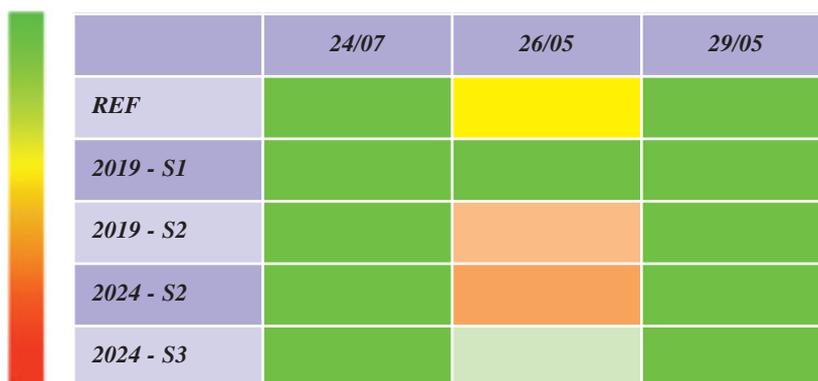


Figure 11 : Exemple de résultats présentant le niveau de qualité de service sur l'aire de trafic (stationnement des aéronefs) pour plusieurs scénarios permettant une comparaison rapide

Sur la Figure 12 nous retrouvons un exemple d'une capture d'écran issue d'une simulation en temps accéléré. Elle permet de se faire une idée visuelle de l'attente au point d'arrêt et de la longueur de la file d'attente. Dans certains cas, et en particulier lors de discussions avec des opérationnels de la plate-forme, un visuel peut être plus parlant que le graphique correspondant.



Figure 12 : Exemple de résultat visuel produit à partir d'une simulation en temps accéléré

5. Méthodes d'amélioration de la capacité

Il existe de nombreuses manières d'améliorer la capacité d'une infrastructure aéroportuaire. Elles peuvent être plus ou moins longues à mettre en œuvre, avec un impact plus ou moins grand sur les opérations et représenter un gain plus ou moins important sur le niveau de performance de l'aéroport. Pour faciliter la lecture, ces améliorations sont regroupées en trois grandes catégories. Celles-ci sont :

- Les améliorations **procédurales** ;
- Les améliorations **systèmes** ;
- Les améliorations **d'infrastructures**.

Ces catégories ne sont pas strictement exclusives, une amélioration appartenant principalement à une catégorie pouvant s'accompagner d'améliorations mineures relevant plutôt des autres catégories.

Dans la suite de ce chapitre, nous reviendrons en détail sur chacune de ces catégories en les explicitant et en fournissant quelques exemples pour chacune. La liste retenue n'est évidemment pas exhaustive.

5.1. Les améliorations procédurales

Ce type d'améliorations correspond à une modification des méthodes de travail des opérationnels au sens large sans nécessiter la mise en œuvre de moyens techniques dont ils ne disposent pas déjà.

5.1.1. RECAT-EU

Introduit récemment sur plusieurs des principaux aéroports européens, RECAT-EU est un projet de renouvellement des catégories de turbulences de sillages des aéronefs. Il vise à remplacer les quatre catégories utilisées actuellement (*Light, Medium, Heavy, Super Heavy*) par six nouvelles catégories (*Light, Lower Medium, Upper Medium, Lower Heavy, Upper Heavy, Super Heavy*) et à associer de nouvelles séparations minimales à respecter entre chacune de ces différentes catégories.

#1	#2	<i>Light</i> <i>MTOW < 7 t</i>	<i>Medium</i> <i>7 < MTOW < 136 t</i>	<i>Heavy</i> <i>136 t < MTOW</i>	<i>Super Heavy</i> <i>A380</i>
<i>Light</i>		*	*	*	*
<i>Medium</i>		4 NM	*	*	*
<i>Heavy</i>		6 NM	5 NM	4 NM	*
<i>Super Heavy</i>		8 NM	7 NM	6 NM	*

Figure 13: Table de séparation radar OACI

<i>HEAVY RECAT-EU scheme</i>		« SUPER HEAVY »	« UPPER HEAVY »	« LOWER HEAVY »	« UPPER MEDIUM »	« LOWER MEDIUM »	« LIGHT »
<i>Leader/Follower</i>		« A »	« B »	« C »	« D »	« E »	« F »
« SUPER HEAVY »	« A »	3 NM	4 NM	5 NM	5 NM	6 NM	8 NM
« UPPER HEAVY »	« B »		3 NM	4 NM	4 NM	5 NM	7 NM
« LOWER HEAVY »	« C »		(*)	3 NM	3 NM	4 NM	6 NM
« UPPER MEDIUM »	« D »						5 NM
« LOWER MEDIUM »	« E »						4 NM
« LIGHT »	« F »						3 NM

Figure 14: Table de séparation radar RECAT-EU

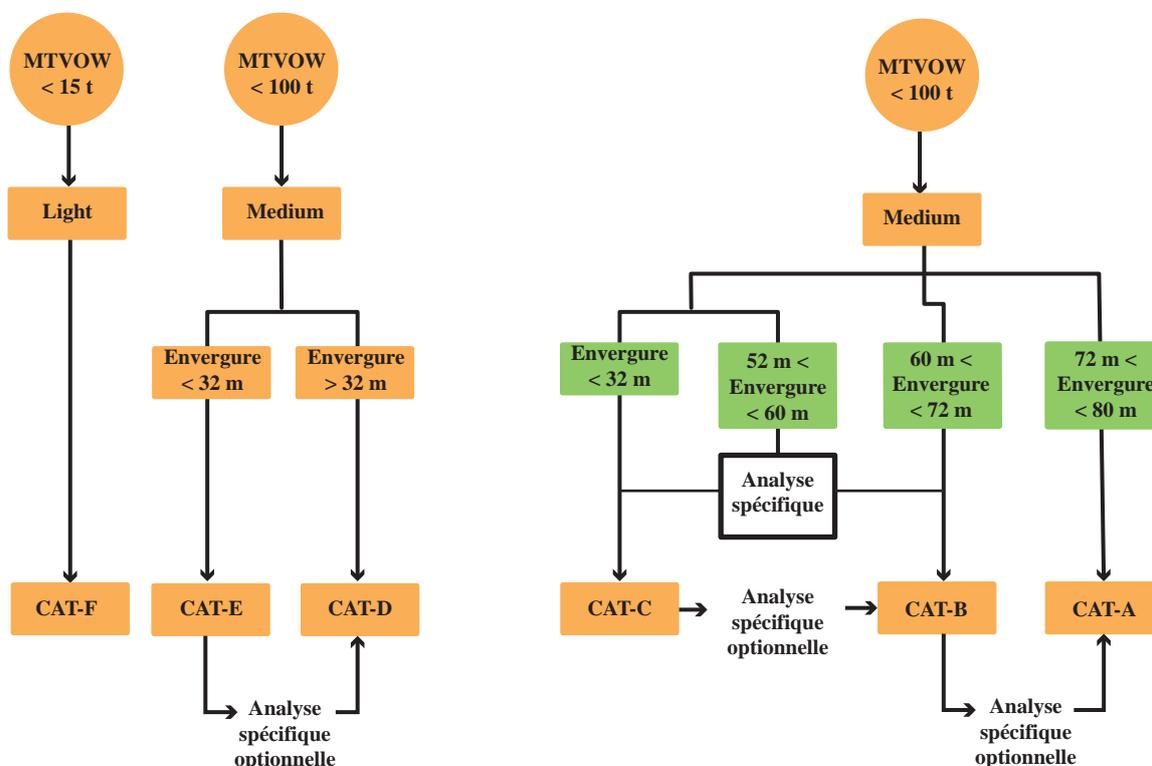


Figure 15: Schéma de la conversion depuis les catégories OACI vers les catégories RECAT-EU

L'utilisation de ce type de procédure permet d'améliorer fortement la fiabilité de l'heure d'arrivée prévue d'un avion en comparaison de l'utilisation d'un circuit d'attente classique en hippodrome. Il doit également permettre de réduire la charge de travail des contrôleurs, qui dispose d'un moyen plus efficace nécessitant peu d'échanges radio pour réguler le trafic.

Si la mise en place d'un tel dispositif n'est pas de nature à augmenter la capacité maximale du système (les séparations entre les avions ne sont pas réduites), il permet, en fiabilisant l'alimentation en avions des secteurs terminaux (du point de vue des horaires et de l'ordre des avions), et en simplifiant une partie des tâches des contrôleurs aériens une utilisation plus efficace de la capacité disponible, et peut ainsi contribuer à augmenter la capacité opérationnelle et surtout soutenable du système.

5.1.3. HIRO

Le projet HIRO pour High Intensity Runway Operations correspond à un ensemble de procédures opérationnelles à destination des équipages et des contrôleurs aériens qui vise à minimiser le temps d'occupation de la piste par les avions au décollage comme à l'arrivée pour permettre une amélioration de l'efficacité opérationnelle. Ces procédures, qui ne nécessitent aucune modification des infrastructures au sol consistent entre autre à :

- Planifier son atterrissage en identifiant la sortie de piste appropriée pour permettre un freinage efficace minimisant le roulage sur la piste ;
- Réagir rapidement aux instructions du contrôle aérien (alignement, décollage, traversée de piste).

Si ces procédures n'ont pas vocation à permettre seule une augmentation de la capacité de programmation sur la plate-forme, les secondes qui peuvent être gagnées à chaque mouvement contribuent à fluidifier le trafic au départ comme à l'arrivée et ainsi à réduire les retards et augmenter les capacités opérationnelles et soutenables sur l'infrastructure. Ces mesures peuvent s'avérer indispensables en parallèle à la mise en place de mesures visant à réduire les séparations à l'arrivée pour permettre une utilisation à plein potentiel de ces nouvelles séparations tout en évitant une augmentation du taux de remise de gaz liées à une occupation trop longue de la piste.

5.1.4. Facilitation à l'inspection filtrage

Faciliter la préparation des passagers à travers une meilleure compréhension des consignes et une meilleure assistance envers ceux qui le requièrent est un moyen de fluidifier ce passage obligatoire qui représente régulièrement un point dur dans les aéroports. Une meilleure préparation permet des avantages à plusieurs niveaux :

- Moins de perte de temps à l'entrée du contrôle ; il s'agit ici de profiter du temps d'attente à l'entrée du poste d'inspection filtrage pour mieux informer le passager sur le déroulement du contrôle, ce qui lui permet de se délester plus rapidement de ses objets personnels dès qu'il a accès aux tapis de dépose.



Figure 17: Le poste d'inspection filtrage de l'aéroport de Toulouse Blagnac permet une préparation en parallèle de plusieurs passagers

- Limiter le taux de fausses alarmes ; une préparation est réussie lorsque le passager s'est délesté de l'ensemble des objets susceptibles de déclencher des fausses alarmes lors du passage du portique, et lorsque l'ensemble des objets devant être sortis de son bagage le sont. Il est ainsi possible de limiter le taux d'alarmes qui impliquent un second passage à travers les appareils de détection ou une fouille complémentaire qui sont tous les deux consommateurs de temps et de ressources.

Le passager devient un acteur à part entière de la sûreté. Cette nouvelle façon d'appréhender l'inspection filtrage fait partie intégrante des axes stratégiques développés dans le cadre du programme Vision Sûreté, lancée par la DGAC qui ambitionne d'améliorer et de rénover les procédures actuellement en place via une approche globale assurant la cohérence et l'efficacité du système.

5.2. Les améliorations systèmes

Ces améliorations correspondent à la mise en place de nouveaux outils utilisés par les opérationnels, ou à la mise à jour d'outils existants. Elles peuvent influencer la partie matérielle comme la partie logicielle.

L'impact sur la capacité est généralement faible, mais peut toutefois représenter un intérêt majeur sur des terrains saturés où le moindre mouvement gagné représente un intérêt économique important et où il peut être complexe de modifier l'infrastructure.

Plusieurs exemples sont donnés dans la suite de ce paragraphe, pour le côté piste et pour le côté aérogare.

5.2.1. Time-Based Separation et Pair-Wise Separation

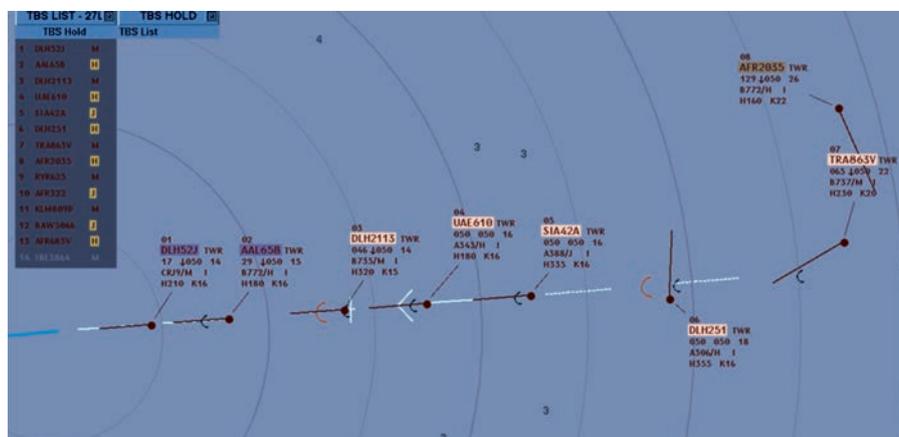


Figure 18: Extrait d'un écran radar avec le système TBS montrant le chevron cible

Développés récemment dans le cadre du programme SESAR (*Single European Sky ATM Research*), ces nouveaux concepts doivent permettre d'optimiser les séparations entre les avions à l'arrivée dans l'objectif de les réduire afin d'augmenter la capacité à l'arrivée.

Le concept de Time-Based Separation (TBS) consiste à utiliser des séparations temporelles à la place des séparations en distance appliquées actuellement par les contrôleurs à l'aide du radar. L'intérêt de ce concept est de permettre de maintenir le niveau de performance quel que soit l'intensité du vent de face, le cadencement des avions devenant alors indépendant de la vitesse de ceux-ci par rapport au sol.

Pour mettre en place ce concept, il est nécessaire d'ajouter un système (*Separation Delivery Tool*) qui permet l'affichage sur l'écran radar des contrôleurs d'approche de la distance qui doit être appliquée entre deux mouvements successifs sur la base de la séparation temporelle. Autrement dit, ce nouveau système transforme la séparation temporelle en une séparation spatiale afin qu'elle puisse être mise en œuvre par les contrôleurs. Une illustration d'un tel système est montrée en Figure 18. Sur cette figure, le chevron noir représente la séparation cible que le contrôleur d'approche doit viser compte tenu des risques de compression lors du ralentissement des avions en approche finale, et le chevron rouge la séparation minimale.

Le concept de *Pair-Wise Separation* (PWS) est de son côté une extension du projet de re-catégorisation des avions RECAT-EU mis en place récemment sur les principales plateformes européennes. Alors que RECAT-EU a permis le passage de quatre catégories (*Light, Medium, Heavy, Super Heavy*) d'avions à six (A à F), le PWS permet d'adapter la séparation à la paire d'avions en présence. Il y a donc théoriquement autant de catégories que de types d'avions. Compte tenu de la taille imposante de la matrice de séparation engendrée par la mise en place de ce concept, il est nécessaire d'implémenter un système similaire à celui déployé dans le cadre du TBS. À noter que l'étape suivante du *Dynamic - Pair Wise Separation* est également en développement dans le cadre du projet SESAR. Il s'agit ici d'enrichir la matrice de séparation du PWS grâce à des relevés météorologiques instantanés, des mesures de la turbulence de sillage générée par l'avion de tête et des données en provenance des avions.

5.2.2. Norme radar

En France métropolitaine, les principaux secteurs d'approches sont équipés d'un radar, qui permet aux contrôleurs aériens d'effectuer l'assistance, la surveillance et le guidage des aéronefs.

À chaque équipement radar est associée une norme, qui correspond à la distance horizontale minimale d'espacement entre deux avions au même niveau de vol. Cette distance est généralement comprise dans les secteurs d'approches français entre 3 et 8 NM selon l'importance du trafic local. Cette norme est même abaissée à 2,5 NM sur les principaux terrains une fois les avions alignés sur l'axe de l'ILS. À titre d'information, une nouvelle réduction à 2 NM est à l'étude dans le cadre du projet SESAR.

L'abaissement de la norme radar via l'amélioration des systèmes (à la fois les systèmes d'acquisition et de traitement du signal) est un moyen d'améliorer la capacité d'un secteur ainsi que de faciliter la gestion du trafic pour le contrôle aérien. En abaissant la norme radar, il devient possible de rapprocher les avions les uns par rapport aux autres, ce qui peut permettre d'augmenter les cadences au départ et à l'arrivée, si les conditions au sol sont réunies pour permettre l'abaissement de la séparation.

5.2.3. Arrival Manager et Departure Manager

Les outils de gestion des séquences d'avions à l'arrivée (AMAN, Arrival MANager) et au départ (DMAN, Departure MANager) sont aujourd'hui déployés de plus en plus systématiquement sur les principaux terrains à travers le monde. Ce sont des systèmes qui viennent assister les prestataires de services de la navigation aérienne dans la construction de séquences optimisées en prenant en compte un certain nombre de contraintes et de préférences dans la gestion de l'ensemble du flux.

Pour les deux systèmes, le concept est semblable. L'outil récupère la liste de l'ensemble des vols prévus dans un horizon de temps défini comprenant les informations importantes (par exemple le type d'avion, l'origine ou la destination, l'heure prévue du mouvement) et attribue à chacun de ces vols des heures cibles à des points spécifiques, ainsi que des indications permettant de respecter ces heures cibles calculées.

Pour le cas du DMAN, celui-ci attribuera en particulier une heure cible de décollage ainsi qu'une heure cible de départ bloc tenant compte du temps de roulage prévu pour rejoindre la piste ainsi que de l'éventuel temps d'attente prévu en entrée de la piste pour permettre à l'avion d'effectuer son décollage à l'heure prévue. En effectuant ce calcul pour l'ensemble des vols prévus dans l'horizon de temps défini, on obtient une séquence d'avions pour chacune des pistes de décollage de l'aéroport.

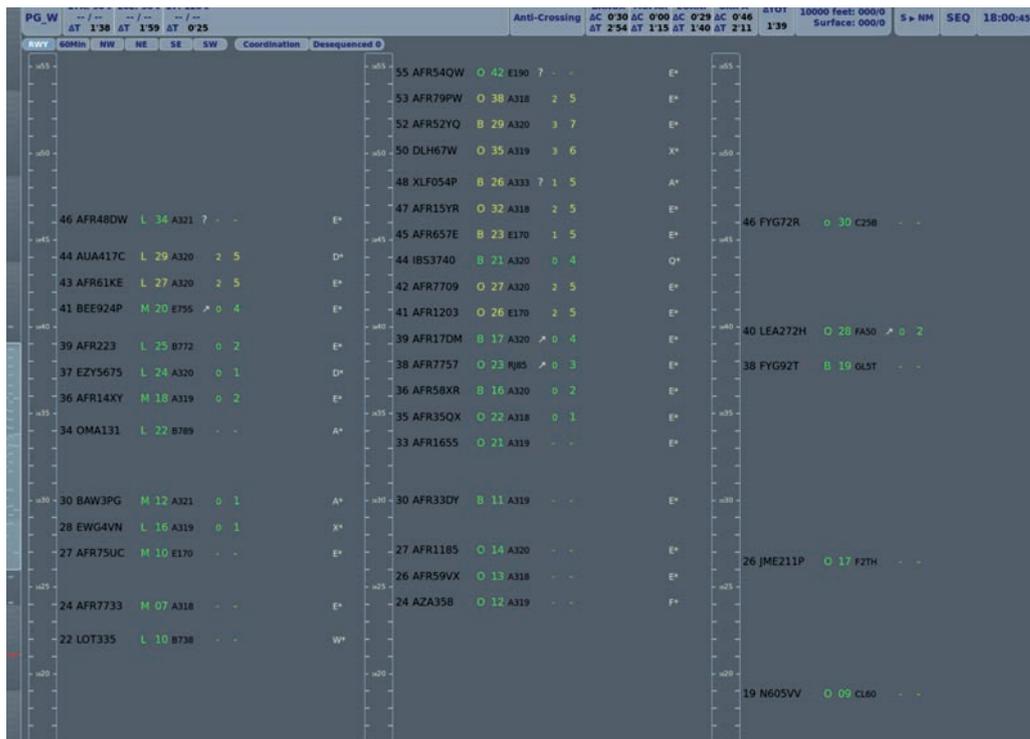


Figure 19: Interface de l'AMAN en salle d'approche à Paris-Charles-de-Gaulle. Les deux séquences à gauche correspondent aux deux pistes d'arrivées de l'aéroport de Paris CDG, la séquence de droite correspond à la piste d'arrivée de l'aéroport de Paris Le Bourget

Pour le cas de l'AMAN, celui-ci va calculer une heure cible d'atterrissage pour chacun des avions, et fournit en échange aux contrôleurs des indications sur les moyens à mettre en œuvre pour atteindre cette heure cible. Cette information peut par exemple correspondre à un temps qu'il faut faire gagner ou perdre à un avion en altérant sa vitesse ou sa route.

Ces outils permettent d'utiliser de manière plus optimale la capacité disponible. S'ils n'ont pas vocation à augmenter la capacité maximale de l'infrastructure, ils peuvent permettre d'augmenter la capacité opérationnelle de celle-ci grâce à une gestion optimisée du flux d'avions. Ils sont particulièrement utiles sur les périodes de pointe, ou lorsqu'un abattement de la capacité est imposé par les conditions extérieures (météo, travaux...).

5.2.4. Contrôles des passagers

Le contrôle des passagers (inspection filtrage et frontalier) est un élément fréquemment générateur de congestion dans les aéroports. Il s'agit en effet de points de passage obligatoires pour tous les passagers dans leur parcours au sein du terminal.

Avec l'augmentation continue du nombre de passagers transitant dans les aéroports, la problématique du maintien d'un niveau de sûreté extrêmement élevé tout en offrant un débit permettant de conserver des standards de qualité de service offert aux passagers devient un véritable challenge.

Pour assurer cette mission essentielle, de nouveaux équipements, associés à des nouvelles procédures sont mises en place sur les aéroports, pour permettre à la fois un contrôle toujours plus efficace, tout en étant plus rapide, ce qui permet d'augmenter le débit au niveau de ces points de contrôle, et ainsi d'améliorer l'expérience passager.

Côté équipement, de nouveaux équipements permettent par exemple une analyse plus efficace des bagages cabines des passagers, permettant de limiter le nombre d'objets devant être retirés du bagage (ordinateur portable, liquides...). C'est à la fois un gain de temps au niveau de la préparation, au niveau du nombre d'images à analyser par les agents de sûreté et au niveau du nombre d'alarmes générés par une mauvaise préparation des passagers. Du côté du contrôle aux frontières, ces dernières années ont vu en France le déploiement des sas PARAFE (Passage Automatisé Rapide Aux Frontières Extérieures) permettant de fluidifier ce type de point de contrôle pour les détenteurs d'un passeport biométrique.



Figure 20: Postes de contrôles aux frontières automatisés à l'aéroport de Paris CDG

5.3. Les améliorations d'infrastructures

Les modifications ou créations d'infrastructures ont un impact sur la capacité généralement simple à appréhender et à l'effet le plus visible. Il s'agit généralement d'ajouter de nouveaux éléments aux différents sous-systèmes constitutifs de l'aéroport :

- **Piste** : pour permettre d'augmenter la capacité, celle-ci doit pouvoir être utilisée en même temps que les pistes existantes. À noter que la capacité maximale n'est pas systématiquement le paramètre qui motive la création d'une nouvelle piste. Dans certains cas, il peut s'agir de questions d'accessibilité de l'aéroport qui motive la création d'une nouvelle piste (vents dominants dans plusieurs directions, ajout d'une piste de secours dans le cas de l'indisponibilité de la première).
- **Voie de circulation** : la construction de nouvelles voies de circulation permet d'améliorer la fluidité du trafic au sol en raccourcissant les trajets, en permettant d'opérer plus simplement des croisements au sol, ou en permettant de libérer plus rapidement des zones particulières. Parmi les constructions classiques que l'on retrouve, il est possible de citer par exemple la construction d'une voie de circulation parallèle complète le long d'une piste (qui évite aux avions d'avoir à effectuer du roulage sur la piste), la construction de voies de dégagement à grande vitesse (qui permet de réduire les temps d'occupation de piste à l'arrivée), ou le doublement de voies de circulation pour permettre les croisements entre des mouvements en sens opposé.
- **Aire de trafic** : l'augmentation de la taille des aires de trafic permet d'augmenter le nombre d'avions qui peuvent être accueillis de manière simultanée. Ce type d'augmentation peut être réalisé soit pour accompagner la croissance courante du trafic, ou pour permettre la mise en place de stratégie particulière de certaines compagnies aériennes comme la création d'un hub (beaucoup d'avions qui arrivent et repartent dans un intervalle de temps réduit pour permettre des correspondances efficaces) ou le développement d'une base (avions qui stationnent de nuit sur l'aéroport). Ce type de construction s'accompagne généralement du développement des infrastructures dédiées au traitement des passagers, puisqu'un plus grand nombre d'avions opérant simultanément implique un plus grand nombre de passagers présents, ce qui nécessite des infrastructures dimensionnées en conséquence. Une augmentation de la taille de l'aire de trafic peut également être requise pour permettre l'accueil d'avions particuliers dont les dimensions nécessitent des aménagements spécifiques.
- **Aérogare** : la construction ou l'extension d'une aérogare permet l'augmentation de la capacité de traitement des passagers. Lors de sa création, plusieurs éléments sont à prendre en compte. On peut citer par exemple :
 - Le type d'avions à traiter : la présence de gros porteurs par exemple, nécessite des infrastructures qui doivent permettre d'accueillir un nombre important de passagers dans un temps court. Cela implique de créer des sous-systèmes plus importants (espaces d'attente, points de traitement, tapis de récupération des bagages...).
 - Le type de compagnies : les compagnies à bas coûts et les compagnies à haut-niveau de service ont des attentes différentes concernant le traitement des passagers dans l'aérogare. Cela va notamment avoir des conséquences sur la qualité de service requise dans l'aérogare et donc sur les espaces offerts aux passagers. On observe récemment de plus en plus de ségrégation entre les différents types de compagnies aériennes avec le développement d'un côté d'aérogares à haut-niveau de service et de l'autre d'aérogares dédiées aux compagnies à bas coûts permettant de réduire le coût opérationnel de l'escale.
 - Les stratégies des compagnies : la présence d'un hub sur l'aéroport par exemple va entraîner des contraintes sur les infrastructures passagers pour permettre d'assurer les connexions entre les différents avions au niveau du temps de parcours, ou au niveau du traitement des bagages de soute.
 - L'origine et la destination des vols : la présence de vols internationaux entraîne la nécessité pour l'aérogare de posséder des infrastructures permettant de ségréguer les flux entre eux, et implique la présence des services de l'État concernés par le contrôle aux frontières.

5.4. Un exemple d'application: l'aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle

L'aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle, premier aéroport français en termes de trafic constitue un exemple intéressant pour illustrer les problématiques de la planification à long terme et de l'évolution d'une infrastructure au fil des années.

À sa création, une emprise foncière importante fut réservée en prévision du développement de l'aéroport. En effet, les perspectives de croissance de trafic et le développement urbain de la région parisienne nécessitaient de préserver dès lors l'espace qui serait requis à terme pour accueillir le trafic estimé à l'horizon ultime, même s'il n'était pas prévu de construire immédiatement l'ensemble des infrastructures mais de les réaliser graduellement en accompagnant l'évolution de la demande de trafic.

Inauguré en 1974, l'aéroport ne comptait à son ouverture qu'une seule piste (l'actuelle piste 09R/27L), une seule aérogare pour le traitement des passagers (l'actuel terminal 1) ainsi qu'une aire pour la maintenance et une zone de traitement du fret aérien. L'infrastructure initiale conçue pour accueillir environ 10 millions de passagers a ensuite été agrandie progressivement au fur et à mesure de l'augmentation du trafic. Ainsi, depuis les années 1980, ce ne sont pas moins de 10 terminaux et 3 pistes qui ont été ajoutés à l'infrastructure initiale :

- 1979 : inauguration de la seconde piste (l'actuelle 08L/26R)
- 1982 : ajout des terminaux 2A et 2B
- 1989 : Ajout du terminal 2C
- 1991 : Création du terminal 3
- 1993 : Ajout du terminal 2D
- 1998 : Inauguration de la troisième piste (l'actuelle 08R/26L)
- 1999 : Ajout du terminal 2F
- 2000 : inauguration de la quatrième piste (l'actuelle 09L/27R)
- 2003 : Ajout du terminal 2E
- 2007 : Ajout de la jetée d'embarquement S3
- 2008 : Ouverture du terminal 2G
- 2012 : Ajout de la jetée d'embarquement S4 et du bâtiment de connexion entre les terminaux 2A et 2C

D'autres infrastructures sont actuellement en cours de construction ou en projet pour continuer d'accompagner la croissance du trafic sur l'aéroport. On peut citer par exemple :

- **L'extension du terminal 1 (horizon 2020)** : il s'agit de fusionner les satellites 1 à 3, pour réaliser de nouveaux bâtiments et rationaliser l'exploitation au niveau de l'aire de trafic.
- **La jonction des terminaux 2B et 2D** : à l'image de ce qui a été réalisé au niveau des terminaux 2A et 2C, un nouveau bâtiment de jonction permettra de connecter ces deux terminaux. Ce projet s'associe à une reconfiguration des espaces dans les terminaux.
- **Terminal 4 (en projet)** : l'augmentation du trafic à plus long terme entrainera des besoins supplémentaires qui devraient nécessiter la construction d'un nouveau terminal. Celui-ci devrait être réalisé au nord du terminal 2 et à l'est du terminal 1 dans une zone qui ne possède pas encore d'infrastructures passagers.

La capacité annuelle totale des infrastructures d'accueil des passagers doit ainsi passer à 80 millions de passagers à l'horizon 2025, puis à 120 millions de passagers avec la construction du terminal 4. Ces valeurs sont à comparer à la capacité initiale de 10 millions de passagers à l'ouverture. Avec près de 70 millions de passagers en 2017, l'aéroport de Paris – Charles-de-Gaulle possède encore des marges lui permettant de poursuivre sa croissance.

Parallèlement au développement des infrastructures au sol, les procédures et les systèmes se sont également améliorés pour permettre l'accueil de ce trafic supplémentaire. Les systèmes de détection radar ont évolué pour réduire les espacements entre les avions, les procédures aériennes ont été adaptées au fil du temps pour s'adapter d'une part aux nouvelles infrastructures (les nouvelles pistes notamment) et aux nouveaux concepts développés avec le temps. Parmi ces évolutions, on peut citer par exemple :

- Déploiement de l'outil de surveillance des avions au sol AVISO (A-SMGCS) ;
- Introduction d'outil de séquençage des avions à l'arrivée (AMAN) et au départ (DMAN/GLD) ;
- Réduction progressive de la norme de séparation radar pour atteindre 2,5NM aujourd'hui ;
- Mise en place des nouvelles séparations RECAT-EU et du projet HIRO ;
- ...

La capacité n'est évidemment pas la seule motivation à ces évolutions. Les questions de sécurité et de sûreté de l'exploitation jouent également un rôle prépondérant dans l'évolution d'une infrastructure.



Figure 21: Représentation schématique de l'évolution des infrastructures au sol de l'aéroport de Paris-CDG

Quelles que soient les raisons orientant le développement d'un aéroport, il est important de souligner l'importance d'adopter une vision à très long terme de son évolution et l'exemple de Paris-Charles-de-Gaulle montre que l'anticipation dans les années 1970 de besoins qui n'apparaîtraient que quelques décennies plus tard a conduit aujourd'hui à bénéficier d'une emprise foncière confortable.

Concernant le développement des infrastructures elles-mêmes, celui-ci doit cependant s'échelonner dans le temps pour éviter d'avoir à gérer un système surdimensionné pendant une durée non négligeable. L'une des fonctions de la planification à long terme est donc aussi d'assurer cohérence et continuité dans le développement des aménagements pour notamment éviter autant que possible d'aboutir à la nécessité de déconstruire un aménagement passé pour permettre un développement ultérieur.

Il s'agit là de l'une des difficultés principales de la planification à long terme puisque l'évolution des technologies, de la réglementation ou de l'environnement de l'aéroport peuvent invalider des pans entiers des schémas de développement pensés initialement. Il est donc nécessaire d'adapter en permanence la planification à long terme au gré des évolutions du contexte dans lequel l'aéroport s'inscrit, tout en s'efforçant de préserver une orientation cohérente dans l'aménagement progressif de son infrastructure.



RÉCAPITULATIF

La capacité, un problème global aux multiples enjeux

Si la capacité d'un système aéroportuaire peut en apparence s'exprimer de manière simple, le nombre d'éléments qui se cachent derrière cette valeur est en réalité extrêmement important. De nombreux facteurs ont un impact plus ou moins direct sur celle-ci et il est régulièrement nécessaire de considérer un système dans son intégralité pour l'évaluer précisément à court, moyen et long terme.

La gestion de la capacité d'un système à travers notamment la réalisation de documents du type Master Plan est une nécessité pour faire face à l'augmentation prévue de la demande, à la planification des évolutions et à l'exploitation opérationnelle. Le développement de la capacité doit être pensé le plus en amont possible afin d'identifier, d'évaluer et de s'adapter aux implications (positives ou négatives) que l'augmentation du trafic peut engendrer sur le milieu dans lequel l'aéroport s'insère en matière d'urbanisation, d'environnement ou d'emploi. La connaissance fine des gains de capacité et des impacts de leur mise en œuvre permet de planifier les évolutions au plus juste pour le bénéfice des usagers en perturbant au minimum le service rendu.

Enfin les outils d'évaluation de la capacité peuvent fournir une aide à la décision précieuse pour optimiser la capacité opérationnelle notamment en situation dégradée dans le cadre des mécanismes de décision collaborative (A-CDM) déployés sur l'aéroport et pour la gestion du réseau de transport aérien (ATFM).

Connaître la capacité de l'ensemble de ses infrastructures, c'est permettre un développement ciblé et efficace du point de vue économique. L'anticipation des besoins futurs est une clé essentielle pour assurer la viabilité d'un système. En confrontant l'évolution prévue de son trafic avec sa capacité actuelle ou prévue, il est possible de réagir pro-activement et de mettre en œuvre les solutions les plus adaptées, lesquelles ne passent pas nécessairement par la construction de nouvelles infrastructures.

C'est une étape indispensable à la mise en place d'un système continu de gestion de la capacité pour le plus grand bénéfice des usagers et de toutes les parties prenantes d'un aéroport.

Glossaire

AÉROGARE/TERMINAL

Installation permettant le chargement et le déchargement d'avions et le traitement de leur charge commerciale (passagers/fret).

AIRE DE DÉGIVRAGE

Aires spécifiques de l'infrastructure où les avions doivent se rendre en vue d'être dégivrés (retrait de la glace présente sur l'aéronef et application d'un fluide protégeant temporairement l'avion de la formation de glace).

AIRE DE MOUVEMENT

L'ensemble constitué de l'aire de manœuvre et de l'aire de trafic.

AIRE DE TRAFIC

L'ensemble des stationnements avions et des voies de proximité les desservant.

ARRIVÉE BLOC

Heure à laquelle l'avion arrive à son poste de stationnement.

ASSISTANCE EN ESCALE

L'ensemble des services autres que le contrôle aérien rendus aux avions au sol lors de la phase de transition entre l'arrivée et le départ.

CAPACITÉ MAXIMALE

Quantité de trafic qu'une infrastructure peut écouler dans le respect de la législation en vigueur et sans prendre en compte la qualité de service dans des conditions de saturation de l'infrastructure.

CAPACITÉ OPÉRATIONNELLE

Quantité de trafic qu'une infrastructure peut écouler dans le respect de la législation en vigueur compte tenu d'un niveau de qualité de service défini

CAPACITÉ SOUTENABLE

Quantité de trafic qu'une infrastructure peut écouler de façon durable. Cela fait référence à l'aptitude des opérateurs à maintenir un niveau de performance pendant une période de temps longue et à reproduire ce niveau de performance en raison des problématiques de facteurs humains.

CLAIRANCES

Autorisations délivrées par le contrôle aérien aux avions.

CONTRÔLE AÉRIEN

Le service rendu aux avions pour permettre leur évolution en toute sécurité.

COORDINATION

Moyen contraignant de gestion de la demande de trafic sur un aéroport.

COURBE DE PRÉSENTATION

Courbe représentant l'évolution du pourcentage cumulé de passagers arrivés à l'aéroport en fonction du temps.

CRÉNEAU HORAIRE

Heure de départ ou d'arrivée d'un avion à son poste de stationnement convenu dans le cadre de la coordination ou la facilitation d'un aéroport.

DÉPART BLOC

Heure à laquelle l'avion quitte son poste de stationnement.

ENREGISTREMENT

Action de confirmer son intention de voyage auprès de la compagnie et le cas échéant de confier les bagages de soute.

ESPACE AÉRIEN TERMINAL

La partie de l'espace aérien située autour de l'aéroport permettant la transition entre l'aéroport et la croisière.

EXPLOITANT AÉROPORTUAIRE

L'entité qui est en charge de la direction et de la gestion d'un aéroport.

FACILITATION

Moyen non contraignant de gestion de la demande de trafic sur un aéroport.

INFORMATION AÉRONAUTIQUE PUBLIÉ

Ensemble des informations relatives à la géométrie des infrastructures, aux procédures et aux règles d'exploitation d'un aéroport publiées par les autorités nationales.

INSPECTION FILTRAGE

Le contrôle des passagers et de leurs bagages pour assurer la sûreté des opérations.

MOUVEMENT D'AVION

Départ ou arrivée.

MOYENS DE NAVIGATION CONVENTIONNELS

Moyens permettant la navigation des avions de ou vers des balises radioélectriques implantées au sol.

PRESTATAIRE DE SERVICE DE LA NAVIGATION AÉRIENNE

L'entité qui fournit le service de contrôle aérien.

PROCÉDURE (NAVIGATION AÉRIENNE)

Série de manœuvres prédéfinies permettant à un avion d'évoluer entre le point d'entrée ou de sortie de l'espace aérien terminal et l'aéroport.

PROCÉDURES D'EXPLOITATION

L'ensemble des règles qui régissent le déroulement des opérations dans un système aéroportuaire.

RÉGULATION DU TRAFIC

Action d'ordonner le trafic aérien en respectant les espacements minimums requis.

SAISON AÉRONAUTIQUE

Période de six mois démarrant le dernier dimanche de mars pour la saison été, et le dernier dimanche d'octobre pour la saison hiver.

SENS D'EXPLOITATION

Orientation dans laquelle une piste est exploitée (généralement liée à la direction du vent).

SERVITUDE DE PISTE

Zone autour de la piste visant à protéger les opérations de décollages et d'atterrissages des risques de collision ou d'interférence.

TYPOLOGIE DU TRAFIC

Les proportions des différentes catégories d'entités qui constituent le flux.

VOIE DE CIRCULATION

Infrastructure permettant le roulage des avions au sol sur un aéroport.

Annexe 1 : Bibliographie/Littérature conseillée

Pour approfondir les notions présentées dans ce document, le lecteur pourra se diriger vers les ouvrages de références suivants :

- ICAO Doc 9184 – Airport Master Planning Manual
- ICAO Doc 9157 – Aerodrome Design Manual
- ICAO Doc 9971 – Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management
- ICAO Annexe 14
- IATA – Airport Development Reference Manual
- ACRP Report 79 – Evaluating Airfield Capacity
- ACRP Report 25 – Airport Passenger Terminal Planning and Design (Volume I & II)
- ACRP Report 55 – Passenger Level of Service and Spatial Planning for Airport Terminals
- EUROCONTROL – Airport Capacity Assessment Methodology
- Planning and Design of Airports, Fifth Edition (R. Horonjeff & al.)

De nombreux articles scientifiques issus de différentes universités et établissements de recherche à travers le monde traitant de ces questions, dont la liste n'est pas détaillée ici, peuvent être également consultés.

Annexe 2 : Exemples de calcul analytiques

Exemple 1 : Capacité piste

La méthode probabiliste est une méthode simple pour évaluer la capacité d'un système de piste. Elle fournit des résultats macroscopiques, qui permettent de se faire une idée générale de la performance de l'infrastructure considérée. Pour la mettre en œuvre, il est nécessaire de connaître :

- La typologie du trafic à un niveau agrégé ;
- Les vitesses d'approche finale des avions ;
- Les séparations requises entre deux mouvements successifs ;
- Les temps d'occupation de piste.

Prenons l'exemple suivant : une piste unique utilisée uniquement par des avions à l'arrivée, associée à un trafic composé à 60 % de moyen-courrier de type A320, à 20 % de moyen-courrier de type ATR 72 (turbo-propulseur) et à 20 % de long-courrier de type A330.

La première étape consiste à déterminer les probabilités de rencontrer chaque paire d'avions. Ces probabilités s'expriment de la manière suivante :

$$p_{ij} = p_i * p_j$$

Où :

- p_{ij} correspond à la probabilité de rencontrer la paire i, j ;
- p_i et p_j correspondent respectivement à la probabilité de rencontrer les catégories i et j .

Par exemple, la probabilité de rencontrer deux long-courriers successivement est de 20 % x 20 % soit 4 %. La matrice des probabilités est donc la suivante :

	<i>ATR 72</i>	<i>A320</i>	<i>A330</i>
<i>ATR 72</i>	4 %	12 %	4 %
<i>A320</i>	12 %	36 %	12 %
<i>A330</i>	4 %	12 %	4 %

Un moyen simple de vérification consiste à s'assurer que la somme des p_{ij} dans la matrice ci-dessus fait bien 100 %.

De la même manière, il faut ensuite déterminer la matrice des séparations entre les différents types de mouvements. Cette séparation va dépendre de différents facteurs comme le temps d'occupation de piste qui dépend principalement de la géométrie de l'infrastructure (quantité et type de sorties) ou du minimum de séparation radar dans l'espace aérien terminal. Considérons la matrice de séparation à l'arrivée suivante (en ligne l'avion leader, en colonne l'avion suiveur), en prenant l'hypothèse simplificatrice que le temps d'occupation de piste n'est pas contraignant :

	<i>ATR 72</i>	<i>A320</i>	<i>A330</i>
<i>ATR 72</i>	3 NM	3 NM	3 NM
<i>A320</i>	3 NM	3 NM	3 NM
<i>A330</i>	5 NM	5 NM	3 NM

Cette séparation à l'arrivée exprimée en distance peut être traduite en une séparation temporelle en utilisant les vitesses d'approche suivantes (considérées comme constante sur les 5 NM de l'approche finale) :

- ATR 72 – 120 kts
- A320 – 135 kts
- A330 – 145 kts

On obtient donc la matrice de séparation temporelle suivante (correspondant au temps nécessaire pour parcourir la séparation à la vitesse d'approche de l'avion suiveur) :

	<i>ATR 72</i>	<i>A320</i>	<i>A330</i>
<i>ATR 72</i>	90 s	80 s	90 s
<i>A320</i>	90 s	80 s	90 s
<i>A330</i>	175 s	142 s	100 s

Dans cette matrice, les chiffres en rouge tiennent compte du différentiel de vitesse entre les avions. La séparation devant être maintenue tout au long de l'approche finale, la vitesse d'approche plus importante des A330 entraîne une séparation allongée au niveau du seuil.

La dernière étape consiste à calculer la séparation moyenne qui consiste à croiser les matrices de probabilité et de séparation :

$$C_m = \sum_{ij} p_{ij} S_{ij}$$

Dans notre exemple, on obtient une cadence moyenne de 93 s, ce qui correspond à une capacité de 38 arrivées/h.

Il est possible d'étendre cette méthode pour déterminer la capacité d'une piste utilisée à la fois pour les décollages et les atterrissages. Pour ce faire, il convient de traiter les trois cas suivants :

- Cas des départs successifs : la matrice de séparation est généralement directement définie en temps en fonction des contraintes de turbulences de sillage, des temps d'occupation de piste, et des contraintes d'espace aérien ;
- Cas d'un départ suivi d'une arrivée : la séparation est contrainte par le temps d'occupation de piste du départ, et ce quel que soit le type de l'arrivée. Il est donc possible d'établir assez simplement la matrice de séparations temporelles requises entre les couples départs/arrivées possibles ;
- Cas d'une arrivée suivi d'un départ : la séparation est contrainte par le temps d'occupation de piste de l'arrivée, et ce quel que soit le type du départ. Il est donc possible d'établir assez simplement la matrice de séparations temporelles requises entre les couples arrivées/départs possibles.

À partir de ces différentes matrices, il est possible de calculer la séparation moyenne en prenant en compte les probabilités qu'un avion soit d'un certain type et les probabilités qu'il soit une arrivée ou un départ.

Avertissements :

- Cette méthode donne des résultats de capacité théorique qu'il convient de nuancer par la prise en compte de marges opérationnelles. En effet, pour éviter de passer sous la séparation radar minimale ou pour limiter le taux d'approches interrompues, les contrôleurs aériens n'opèrent jamais une infrastructure exactement à sa limite.
- La méthode et l'exemple présentés ici sont volontairement simplistes. Il existe par exemple des infrastructures où les séparations radars à l'arrivée ne sont pas le facteur limitant, des infrastructures avec plusieurs voies d'alignement au départ impliquant des contraintes supplémentaires sur les séparations entre décollages, des infrastructures dotées d'un seuil d'atterrissage décalé imposant des contraintes de turbulences de sillage entre les arrivées et les départs, ou encore des aéroports où des contraintes entre les départs et les approches interrompues éventuelles doivent être prises en compte.

Exemple 2: Capacité d'une zone d'enregistrement

Le deuxième exemple consiste à calculer la capacité d'une zone d'enregistrement dans un terminal. Nous prendrons l'exemple suivant :

- 7 banques d'enregistrement ;
- Un espace d'attente de 100 m².

Nous prendrons l'hypothèse que tous les comptoirs fonctionnent de la même manière sans distinction particulière, et que l'ensemble des passagers nécessitent le même temps de traitement pour l'enregistrement des bagages.

Plusieurs données sont nécessaires pour réaliser ce calcul :

- Le temps de traitement d'un passager à l'enregistrement : 90 secondes
- Le ratio de surface pour l'attente (niveau de qualité de service) : 1,8 m²/pax (IATA Optimum)
- Le temps d'attente maximal (niveau de qualité de service) : 10 minutes (IATA Optimum)

Pour évaluer la capacité horaire des 7 banques d'enregistrement, on utilise la formule suivante :

$$C_b = N_b \frac{3600}{T_b}$$

Où :

- N_b est le nombre total de banques
- T_b le temps de traitement par passager (en secondes)

Avec 7 banques, et un temps de traitement de 90s, on obtient ainsi une capacité horaire de traitement de 280 pax/h.

Pour la zone d'enregistrement, il est possible d'utiliser en première approximation la formule suivante :

$$C_a = \frac{S}{R} \frac{60}{T_{att}}$$

Où :

- S est la surface de l'espace d'attente (en m²)
- R est le ratio de surface (niveau de qualité de service)
- T_{att} est le temps d'attente maximal (niveau de qualité de service, en minutes)

Dans notre exemple, on obtient une capacité horaire de 333 pax/h.

La capacité de l'ensemble de la zone d'enregistrement correspond enfin à la plus petite des deux valeurs. Dans notre exemple, la capacité de l'ensemble est donc déterminée par la capacité de traitement des banques elles-mêmes, et est donc de 280 pax/h.

Exemple 3 : Capacité d'une aire de stationnement

Le dernier exemple concerne l'évaluation de la capacité d'une aire de stationnement d'avions. Nous utiliserons ici la méthode d'Horonjeff, qui nécessite les données suivantes :

- Le nombre total de postes de stationnement ;
- La proportion d'avions de chaque catégorie ;
- Le temps de rotation moyen pour chaque catégorie.

Dans cet exemple, nous considérerons une aire de stationnement disposant de 20 postes de stationnement, d'un trafic réparti en trois catégories (60 % de type A320, 20 % de type A330 et 20 % de type ATR72).

Pour chaque catégorie, nous prenons les temps de rotation suivants :

- ATR72 : 30 minutes
- A320 : 45 minutes
- A330 : 2 h 30 min

Le calcul de la capacité s'effectue avec la formule suivante :

$$C_{AIRE} \leq \frac{u \times N}{\sum p_i T_i} \quad (A3-3-1)$$

Où :

- N correspond au nombre total de postes ;
- u est le coefficient d'utilisation des postes de stationnement fixé ici à 0,85. Il représente une marge opérationnelle permettant d'absorber un éventuel allongement du temps de rotation ;
- p_i à la proportion d'avions de la catégorie i ;
- T_i au temps de rotation moyen des avions de la catégorie i .

Dans notre exemple, nous obtenons donc une capacité de stationnement de 16 avions/h, soit environ 10 A320, 3 A330 et 3 ATR72. À noter que ces 16 avions/h correspondent à 32 mouvements/h, une rotation étant composée d'un mouvement arrivée, et d'un mouvement départ.

Cette méthode est une première estimation, qui considère notamment que tous les postes peuvent être utilisés simultanément et occupés par tous les avions.

Il est possible d'affiner cette méthode en considérant séparément les postes selon la catégorie d'avions qu'ils peuvent traiter. Considérons ici que seule une partie des postes peuvent être utilisés par les gros-porteurs du type A330, avec la répartition suivante :

- 8 postes gros-porteur (qui peuvent par extension également accueillir les avions plus petits) avec un coefficient d'utilisation de 0,85 ;
- 12 postes ne pouvant accueillir que les moyens porteurs (ATR72 et A320) avec un coefficient d'utilisation de 1.

On obtient dans ce cas deux sous-catégories de demande :

- La demande pour les postes pouvant accueillir les gros-porteurs. Dans notre exemple, cela correspond à 8 postes. Ces postes doivent répondre au minimum à la demande en gros-porteurs ;
- La demande pour les postes pouvant accueillir les moyens porteurs. Ici, les 20 postes sont disponibles, à savoir les 8 postes mixtes (gros-porteurs/moyens porteurs) et les 12 postes moyens porteurs. Ces 20 postes doivent répondre à l'ensemble de la demande, les moyens porteurs (ATR72, A320), mais aussi les

gros-porteurs qui seront susceptibles d'utiliser les 8 postes mixtes.

La relation précédente (A3-3-1) doit rester vraie pour ces deux cas de figure. L'ensemble de l'aire de stationnement doit donc vérifier les deux relations suivantes :

$$C_{APRON} \leq \frac{0,85 \times 8}{0,2 \times 2,5} = 13,6 \text{ avions/h}$$

$$C_{APRON} \leq \frac{0,85 \times 8 + 1 \times 12}{0,2 \times 2,5 + 0,6 \times 0,75 + 0,2 \times 0,5} = 17,9 \text{ avions/h}$$

Ici, la capacité est donc limitée par la première relation c'est-à-dire par le stationnement des avions gros-porteurs. Il n'est en effet pas possible de traiter plus de 13,6 avions/h avec seulement 8 postes gros-porteurs compte tenu de la répartition du trafic et des temps de rotation définis dans cet exemple. En effet, dans le cas extrême où aucun poste ne pourrait accueillir de gros-porteurs, la capacité de l'aire de stationnement serait nulle, puisque la répartition impose 20 % de gros-porteurs.

Dans le cas où l'ensemble des postes est mixte (gros-porteurs/moyens porteurs), on retrouve avec cette variation de la méthode les résultats et l'équation de l'exemple précédent.



RETROUVEZ TOUTES LES PUBLICATIONS DU STAC SUR
www.libelaero.fr

Présentation du site

LIBELAéro met à disposition des acteurs aéroportuaires toute la documentation technique pertinente, de manière structurée :

- la **réglementation** : l'ensemble des textes réglementaires relatifs au domaine aéroportuaire (réglementation française, européenne et internationale), d'application directe - il est à noter que les annexes OACI ne sont pas directement applicables en France, seule leur transcription en droit français ou européen a une valeur réglementaire ;

- les **guides** : guides, manuels et notes d'information explicitant ou accompagnant la mise en œuvre de la réglementation (instructions, circulaires, guides STAC, NIT DGAC/DSAC, manuels OACI, GM EASA, guides ELOS...), d'application recommandée ;
- les **études et autres documents** : les publications techniques se rapportant à des travaux de recherche, des études contribuant à l'évolution de la réglementation, des documents de prospective... à titre d'information et applicables à titre expérimental.

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

Couverture © Vincent COLIN DGAC /DSNA

Photos :

- © ENAC page 44
- © Antoine LAMIELLE CC BY-SA 4.0
Wikimedia Commons page 54
- © Richard METZGERT DGAC /STAC pages 17, 50
- © Laurent MIGNAUX-Terra page 59
- © Steve MORRIS page 25
- © Véronique PAUL DGAC /STAC page 29

Illustrations :

- © SNA-RP pages 51, 53
- © Département ACE DGAC /STAC pages 43, 46
- © Département ACE DGAC /STAC pages 43, 46
- © SIA page 49

Juillet 2018

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