

## **Résumé :**

L'objectif de cette étude est d'estimer la capacité du système pistes de l'aérodrome de Constantine Mohamed Boudiaf en utilisant une approche analytique, dans le but de comprendre les futurs échanges entre la demande et l'offre des services du transport aérien, le résultat de ces recherches fournit une grande vue sur la capacité aéroportuaire dans le future du système de transport aérien, et pourra apporter aux planificateurs un cadre de modélisation sur la congestion dans le système. De plus, la capacité aéroportuaire est un facteur très important qui limite l'augmentation de l'offre des services du transport aérien.

Les études de l'estimation de la capacité aéroportuaire doivent être incluses dans les prévisions de la demande du transport aérien.

## **Abstract:**

The objective of this study is to estimate the runway capacity of Constantine's aerodrome Mohamed Boudiaf using an analytic approach, in order to understand future tradeoffs between air transportation demand and supply, The result of the study provides a broad view about the airport capacity in the future air transportation system, and could bring help to decision makers with a modeling framework to identify the congestion in the system. Moreover, airport capacity is an important limiting factor in the growth of air transportation supply.

The studies of estimating airport capacity should be include in forecasts of air transportation demand.

## **ملخص :**

الهدف من هذه الدراسة هو تقدير قدرة نظام المدرج في مطار قسنطينة محمد بوضياف باستخدام نهج تحليلي من أجل فهم التبادلات المستقبلية بين الطلب والعرض لخدمات النقل الجوي، إن نتيجة هذا البحث توفر رؤية كبيرة لقدرة المطار في مستقبل نظام النقل الجوي، قد توفر للمخططين إطارا لنمذجة الازدحام في النظام. وبالإضافة إلى ذلك، تعتبر قدرة المطارات عاملا هاما جدا يحد من الزيادة في إمدادات خدمات النقل الجوي.

ينبغي إدراج الدراسات المتعلقة بتقدير قدرة المطارات في توقعات الطلب على النقل الجوي

## ***Dédicace:***

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce modeste travail de fin d'étude à mes très chers, respectueux et magnifiques parents, qui ont sacrifiés leur vie pour ma réussite et m'ont éclairés le chemin par leurs conseils judicieux,*

*J'espère qu'un jour, je pourrais leurs rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi, que dieu leur prête bonheur et longue vie.*

*Je dédie aussi ce travail à:*

*Mes sœurs et tous les membres de ma grande famille pour m'avoir aimé, aidé, soutenu, et qui ont été toujours derrière moi.*

*Mes chers amis qui sous leur encouragement ce travail n'aura jamais vu le jour.*

*Et À tous ceux qui m'ont nourri de leur savoir, à ceux qui ont toujours voulu que je réussisse et à tous les professeurs qui m'ont enseignés.*

***Benkhald Amar***

## Remerciements:

Je remercie Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donné, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de mon chemin, durant toutes mes années d'études.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon encadreur Monsieur **Guelmewi Merzak** d'avoir proposé le sujet, d'avoir assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire. Je le remercie aussi pour ses encouragements, ses suggestions et sa gentillesse.

Je remercie également ma promotrice Madame **Drareni Fatima**, qui m'a soutenu et qui m'a accompagné tout au long de mon travail.

Je tiens d'autre part à remercier les respectables membres du jury pour bien vouloir m'accorder de leur temps précieux pour commenter, discuter et juger mon travail.

Sans oublier à remercier tous les enseignants et le staff administratif de l'Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales qui m'ont aidé pendant mon cursus universitaire.

Finalement, un gros merci à ma famille et mes amis pour leurs soutiens et pour leurs sacrifices et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

**Benkhaled Amar**

## **Liste des abréviations:**

**AIP** : Aeronautical information publication

**APCH** : Approche

**ARR** : Arriver

**ASAC** : Aviation System Analysis Capability

**ASDA** : Accelerate-stop distance available

**ATC** : Air traffic control

**ATS** : Air Traffic Services

**CT** : Capacité théorique

**CO** : Capacité opérationnelle

**CAT** : Catégorie

**CZL** : Code IATA aéroport de Constantine

**DABC** : Code OACI aéroport de Constantine

**Dag** : Distance perpendiculaire entre l'axe de piste et le point de dégagement (mètre).

**ENNA** : Etablissement national de la navigation aérienne

**EGSA** : Etablissement de gestion des services aéroportuaire

**FAA** : Federal aviation administration

**GMS** : Ground Movement Simulator

**ILS** : Instrument landing system

**IATA** : *International Air Transport Association*

**I.T.A.C** : Instructions techniques sur les aérodromes civils

**Kts** : Nœud (knots) = 1 mile nautique par heure

**Mvts** : Mouvement

**Max** : Maximum

**Min** : Minimum

**NM** : Nautical miles

**NASA** : National aeronautics and Space Administrations

**OACI** : Organisation Internationale de l'Aviation Civile

**PCN** : Pavement classification number

**QFU** : Orientation magnétique d'une piste

**TDZ** : Touchdown zone

**ULM** : Ultra léger motorisé

## Nomenclatures:

**Catégorie A :** Avions dont la masse est inférieure à 7 tonnes (léger),

**Catégorie B :** Avions dont la masse est comprise entre 7 et 40 tonnes (moyen),

**Catégorie C :** Avions dont la masse est comprise entre 40 et 136 tonnes (moyen),

**Catégorie D :** Avions dont la masse est supérieure à 136 tonnes, (lourd).

**TOP:** Temps d'occupation de piste en (s).

**T<sub>1</sub>:** Le temps mis par un aéronef pour passer de la vitesse  $V_1$  à la vitesse  $V_2$  avec une accélération constante sur une distance  $D$ .

**T<sub>2</sub>:** Le temps mis par un aéronef pour parcourir une distance  $D$  à une vitesse  $V$ .

**Dd :** Distance de décollage en (mètre).

**Vd :** Vitesse de décollage en (Kts).

**L :** Longueur de piste en (mètre).

**Tdv:** Temps de dégagement en vol de l'axe de piste en (s).

**Ds :** distance de vol du seuil jusqu'au point de toucher des roues (mètre).

**Dst :** distance nécessaire à la stabilisation de l'aéronef (mètre).

**Db :** distance du seuil à la bretelle de sortie à laquelle l'avion est affecté (mètre).

**Dag :** distance perpendiculaire entre l'axe de piste et le point de dégagement (mètre).

**Sin (axe, bretelle) :** sinus de l'angle entre l'axe de piste et le point de dégagement.

**Vs :** vitesse de passage au seuil d'exploitation (Kts).

**Vt :** vitesse de toucher des roues (Kts).

**VS :** vitesse de sortie (Kts).

**Vr :** vitesse de roulage sur la piste (Kts).

**B2, AB2, B1:** Les trois sorties droites de piste 16/34.

**A1, A2:** Les deux sorties droites de piste 14/32.

**A = [a<sub>ij</sub>]** en (s): Espacement minimal de deux arrivées de type i et j au seuil de la piste.

**V<sub>ai/j</sub> (Kts):** Vitesse moyenne sur une trajectoire d'approche finale de l'avion de type i/j.

**M<sub>ij</sub> :** L'espacement minimal qui peut être appliqué au seuil de piste.

**m<sub>ij</sub> :** max (E, TS<sub>ij</sub>), en Nm.

**E :** Espacement longitudinal minimal lié à la qualité de surveillance, en (Nm).

**TS<sub>ij</sub> :** Espacement longitudinal minimal des avions types i et j dû à la turbulence de sillage, en (Nm).

**TOP<sub>i</sub> :** Temps d'occupation de piste à l'arrivée par l'avion de type i, en secondes.

**LAA :** Distance entre la limite d'autorisation d'atterrir et le seuil.

**La :** Longueur de la trajectoire d'approche finale, en Nm.

**B = [b<sub>aj</sub>]** en (s): Espacement minimal entre une arrivée i et un départ de type j au seuil de la piste.

**C = [c<sub>ij</sub>]** en (s): Espacement minimal entre un avion au départ de type i et un avion à l'arrivée de type j au seuil de la piste.

**X<sub>aj</sub> :** Distance entre le verrou et le seuil de la piste, en (Nm).

**V<sub>aj</sub> :** Vitesse moyenne sur la trajectoire d'approche finale de l'avion de queue, en (Kts).

**D = [d<sub>ij</sub>]** en (s): Espacement minimal entre deux départ de type i et au seuil de la piste.

**e<sub>ij</sub> :** Autres contraintes d'espacement des avions de type i et j liées à la qualité de surveillance au mode d'espacement vertical longitudinal au routage (divergente ou non).

**Ā:** Cadence moyenne arrivée-arrivée en (s).

**Ā̄:** Cadence moyenne arrivée-départ en (s).

**Ā̄:** Cadence moyenne départ-arrivée en (s).

$\bar{D}$ : Cadence moyenne départ-départ en (s).

$P = [P_i]$ : Matrice  $1*4$  ou  $P_i$  ( $i=1$  à  $4$ ) = proportion des avions de type  $i$  par rapport au volume total du trafic pour la piste 16/34 et  $P_i$  ( $i=1$  à  $2$ ) pour la piste 14/32, cette dernière supporte que les avions des catégories A et B.

${}^tP$ : La matrice transposée de la matrice  $P$ .

$Ch_a$ : Capacité horaire arrivées en (mvt/h).

$Ch_d$ : Capacité horaire départs en (mvt/h).

$Chm_a$ : Capacité horaire mixte avec priorité aux arrivées en (mvt/s).

$T_i, T_j$ : Les instants de passage au seuil de piste des avions tête, de type  $i$ , et queue, de type  $j$ .

$g_{ij}$ (en s) =  $t_i - t_j$ : Représente l'intervalle de temps pendant lequel il est possible d'insérer un ou plusieurs départs en deux arrivées.

$b'_i$ : Cadence élémentaire (arrivée de type  $i$ - départ moyen) en (s).

$c'_j$ : Cadence élémentaire (départ moyen- arrivée de type  $j$ ) en (s).

$P_k$ : Proportion des avions de type  $k$ .

$b_{ik}$ : Cadence élémentaire (arrivée de type  $i$ - départ de type  $k$ ) en (s).

$c_{kj}$ : Cadence élémentaire (départ de type  $k$ - arrivée de type  $j$ ) en (s).

$nd_{ij}$ : Représente le nombre de départ qu'il est possible d'insérer entre deux arrivées de types  $i$  et  $j$ , dans l'hypothèse où le débit est suffisant pour ne pas limiter leur insertion dans les trous du flux des arrivées.

$\bar{n}_d$ : Le nombre moyen de départ qu'il est possible d'insérer entre deux arrivées, dans l'hypothèse où le débit des départs est suffisant pour ne pas limiter leur insertion dans les trous du flux des arrivées.

$N_d$ : Le nombre de départ qu'il est possible d'insérer dans le flux d'arrivées par heure, dans l'hypothèse où le débit des départs peut limiter leur insertion dans dans les trous du flux des arrivées.



**ABS:** valeur absolue; **E:** partie entière.

**Chm<sub>d</sub>** : Capacité horaire mixte avec priorité aux départs en (mvt/s).

**I<sub>ij</sub> (en s)= t<sub>i</sub>-t<sub>j</sub>:** Représente l'intervalle de temps pendant lequel il est possible d'insérer un ou plusieurs départs en deux arrivées.

**b'<sub>j</sub>:** Cadence élémentaire (arrivée moyen- départ de type j) en (s).

**c'<sub>i</sub>:** Cadence élémentaire (départ de type i- arrivée moyen) en (s).

**b<sub>kj</sub>:** Cadence élémentaire (arrivée de type k- départ de type j) en (s).

**TOP<sub>k</sub>:** Temps d'occupation de piste à l'arrivée de l'avion de type k en (s).

**c<sub>ik</sub>:** Cadence élémentaire (départ de type i- arrivée de type j) en (s).

**na<sub>ij</sub>:** Représente le nombre d'arrivées de qu'il est possible d'insérer entre deux départs de type i et j, dans l'hypothèse où le débit est suffisant pour ne pas limiter leur insertion dans les trous du flux des départs.

**n<sub>a</sub>:** Le nombre moyen d'arrivées de qu'il est possible d'insérer entre deux départs, dans l'hypothèse où le débit des arrivées est suffisant pour ne pas limiter leur insertion dans les trous du flux des départs.

**N<sub>a</sub>:** Le nombre d'arrivées qu'il est possible d'insérer dans le flux de départs par heure, dans l'hypothèse où le débit des arrivées peut limiter leur insertion dans les trous du flux des départs.

**N<sub>i</sub>:** Nombre de postes de stationnement par type d'aéronefs.

**T<sub>i</sub>:** Temps de traitement par type d'aéronefs en (min).

**C<sub>t</sub>:** Capacité théorique maximale (avion/h).

**C<sub>0</sub>:** Capacité opérationnelle (avion/h).

## **Table des matières:**

**Résumé/ Abstract/ملخص**

**Dédicaces**

**Remerciement**

**Liste des abréviations**

**Nomenclatures**

**Table des matières**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Introduction générale**.....1

**Chapitre 1: Généralités sur les aérodromes.**

1.1. Définition introductive d'un aérodrome.....	
1.2. Constitution d'un aérodrome.....	4
1.2.1. L'aire de mouvement.....	4
1.2.1.1 L'aire de manœuvre. ....	5
1.2.1.2 Les aires de trafic .....	6
1.2.2. Les zones des installations .....	8
1.2.2.1 Zones d'exploitation .....	8
1.2.2.2 Zones d'activités industrielles.....	8
1.2.3 Environnement aérien.....	9
1.2.3.1 Dégagements proches.....	9
1.2.3.2 Dégagements lointains et insertion dans la circulation aérienne.....	9
1.2.3.3 Servitudes radioélectriques.....	10
1.2.3.4 Circulation aérienne.....	11
1.2.4 Environnement au sol.....	11
1.2.4.1 Contraintes engendrées par l'aérodrome.....	11
1.3 Activités d'un aérodrome .....	12
1.4 Classification des aérodromes .....	13

1.4.1 Classification du code de l'aviation civile .....	13
1.4.2 Ancienne classification de l'I.T.A.C .....	14
1.5 Le rôle économique des aérodromes .....	16
1.5.1 Le rôle du transport.....	16
1.6 Conclusion .....	16

## **Chapitre 2: La capacité aéroportuaire, les paramètres majeurs et facteurs influant sur la capacité.**

2.1. Introduction.....	17
2.2 Définition de la capacité.....	17
2.2.1 Croissance du trafic aérien.....	18
2.2.2 Limites de la capacité du système de trafic aérien.....	19
2.2.3. Le système aéroportuaire et sa capacité.....	20
2.2.3.1. La capacité des sous-systèmes.....	21
2.2.3.2. La capacité théorique et la capacité opérationnelle.....	23
2.3. Les facteurs influant sur la capacité.....	23
2.3.1. Facteurs de contrôle du trafic aérien.....	24
2.3.2. Caractéristiques de la demande.....	25
2.3.3. Facteurs environnementaux.....	26
2.3.4. Facteurs de conception.....	26
2.4. Définition du retard.....	27
2.5. Approches à l'estimation de la capacité.....	29
2.5.1. Evaluation statistique de la capacité aéroportuaire.....	29
2.5.1.1. Une approche statistique globale.....	29
2.5.1.2. Un modèle théorique de la capacité associée aux pistes.....	31
2.5.2. Evaluation de la capacité par la simulation.....	32
2.5.2.1. Approches macroscopiques.....	32
2.5.2.2. Approches microscopiques.....	34
2.5.2.3. Approches mésoscopiques.....	35
2.6. Conclusion.....	36

### **Chapitre 3: L'aéroport de Constantine Mohamed Boudiaf**

3.1. Introduction.....	37
3.2. Présentation de l'aéroport.....	37
3.3. Caractéristiques Techniques de l'aéroport de Constantine.....	38
3.4. Caractéristiques Techniques de l'aérodrome de Constantine.....	39
3.4.1. Les principales parties du système piste de l'aérodrome.....	41
3.4.1.1. Les pistes.....	41
3.4.1.2. Les voies de circulation.....	42
3.4.1.3. Le parking avions.....	42
3.4.2. Les aides de radionavigation et d'atterrissage.....	43
3.4.2.1. Principe de fonctionnement des instruments.....	44
3.4.3. Espace aérien ATS.....	46
3.4.4. Installations de télécommunications des services de la circulation aérienne.....	46
3.4.5. Renseignements météorologiques.....	47
3.4.6. Les obstacles de l'aérodrome de Constantine.....	47
3.4.6.1. Les obstacles de l'aérodrome - piste 14 -.....	48
3.4.6.2. Les obstacles de l'aérodrome - piste 32 -.....	48
3.4.6.3. Les obstacles de l'aérodrome - piste 34 -.....	49
3.4.6.4. Les obstacles de l'aérodrome - piste 16 -.....	49
3.5. Projets en cours à l'aérodrome de Constantine.....	50

### **Chapitre 4: Etude et calcul de la capacité de l'aérodrome de Constantine**

4.1. Introduction.....	51
4.2. Méthodologie mise en œuvre pour la capacité piste.....	51
4.3. Analyse de l'existant.....	52
4.3.1. Scénario étudiés.....	53

4.3.2. Valeur caractéristique des vitesses d’approche.....	54
4.3.3. Les minima d’espacement entre deux arrivées dus aux turbulences de sillage.....	54
4.3.4. Minima d’espacement entre deux départs dus aux turbulences de sillage par unité de temps.....	55
4.4. Temps d’occupation de piste.....	55
4.4.1. TOP départ.....	55
4.4.2. Application numérique sur les deux pistes de l’aérodrome de Constantine.....	56
4.4.3. TOP arrivée.....	57
4.4.4. Application sur les pistes de l’aérodrome de Constantine.....	58
4.5. Calcul des cadences élémentaires à partir des procédures.....	61
4.5.1. Arrivée-arrivée.....	61
4.5.2. Arrivée- Départ.....	62
4.5.3. Départ-arrivée.....	63
4.5.4. Départ-Départ.....	64
4.6. Cadence moyenne.....	64
4.7. Application numérique.....	65
4.7.1. Calcul des cadences élémentaires.....	65
4.7.2. Calcul des cadences moyennes.....	67
4.7.2.1. Calcul de cadence moyenne piste 16/34.....	69
4.7.2.2. Calcul de cadence moyenne piste 14/32.....	70
4.8. Calcul de capacité horaire.....	71
4.8.1. Capacité horaire arrivées ( $Ch_a$ ).....	71
4.8.2. Capacité horaire départs ( $Ch_d$ ).....	71
4.8.3. Capacité horaire mixte avec priorité aux arrivées ( $Chm_a$ ).....	71
4.8.3. Capacité horaire mixte avec priorité aux arrivées ( $Chm_a$ ).....	71
4.8.4. Capacité horaire mixte avec priorité aux départs ( $Chm_d$ ).....	74

4.9. Application numérique.....	77
4.9.1. Piste 16/34.....	77
4.9.2. Piste 14/32.....	82
4.10. Capacité Parking.....	87
4.10. 1. Calcul de la capacité théorique maximale.....	88
4.10. 2. La capacité opérationnelle.....	88
4.11. Conclusion.....	90

## Liste des figures :

### Chapitre 1 : Généralités sur les aérodromes

**Figure 1-1:** Vue générale de l'aéroport

d'Alger.....3

**Figure 1-2:** Exemples réels de configurations de systèmes de pistes d'aéroports exploitant une, deux ou plusieurs pistes sécantes.....5

a) Pistes de l'aérodrome de Constantine.....5

b) Pistes de l'aérodrome d'Alger.....5

c) Pistes de l'aérodrome d'Oran.....5

d) Pistes de l'aérodrome de Bejaia.....5

**Figure 1-3:** La piste, ses bandes et ses 3 prolongements.....6

**Figure 1-4:** Éléments constitutifs de l'aire de mouvement.....7

**Figure 1-5:** Vue générale des surfaces de dégagements.....10

### Chapitre 2 : La capacité aéroportuaire, les paramètres majeurs et facteurs influant sur la capacité

**Figure 2-1:** Le développement historique mondial du nombre de passagers du transport aérien et la croissance projetée.....19

**Figure 2-2:** Le retard en fonction de la capacité et de la demande.....28

**Figure 2-3:** L'estimation de la capacité pratique selon Gilbo.....30

**Figure 2-4:** Composition du modèle de simulation MACAD.....33

**Figure 2-5:** La carte de capacité d'un système de pistes.....35

### Chapitre 3 :L'aéroport de Constantine Mohamed Boudiaf

**Figure 3-1:** La nouvelle aérogare de l'aéroport de Constantine.....37

<b>Figure 3-2:</b> L'ancienne aérogare de Constantine.....	38
<b>Figure 3-3:</b> L'aéroport de Constantine Mohamed BOUDIAF.....	39
<b>Figure 3-4:</b> Plan de l'aérodrome de Constantine.....	40
<b>Figure 3-5:</b> Vue de l'aérodrome de Constantine.....	42
<b>Figure 3-6:</b> Emplacement des instruments de radionavigation de l'aérodrome de Constantine.....	43
<b>Figure 3-7:</b> Hauteur des obstacles -piste 14-.....	48
<b>Figure 3-8:</b> Hauteur des obstacles -piste 32-.....	48
<b>Figure 3-9:</b> Hauteur des obstacles -piste 34-.....	49
<b>Figure 3-10:</b> Hauteur des obstacles -piste 16-.....	49
<b>Figure 3-11:</b> Maquette de la nouvelle tour de contrôle de l'aéroport de Constantine.....	50

#### **Chapitre 4 : Etude et calcul de la capacité de l'aérodrome de Constantine**

<b>Figure 4-1:</b> Les pistes de l'aérodrome de Constantine.....	54
<b>Figure 4-2:</b> Représentation de db pour la piste principale.....	59
<b>Figure 4-3:</b> Représentation de db pour la piste secondaire.....	60



## Liste des tableaux :

### Chapitre 3 : L'aérodrome de Constantine Mohamed Boudiaf.

<b>Tableau 3-1:</b> Les instruments de radionavigation de l'aérodrome de Constantine.....	44
<b>Tableau 3-2:</b> L'espace aérien ATS de l'aérodrome de Constantine.....	46
<b>Tableau 3-3:</b> Les installations de télécommunication de l'aérodrome de Constantine.....	46
<b>Tableau 3-4:</b> Les renseignements météorologiques fournis à l'aérodrome de Constantine...	47

### Chapitre 4 : Etude et calcul de la capacité de l'aérodrome de Constantine.

<b>Tableau 4-1:</b> type d'aéronef et leur vitesse moyenne en finale.....	54
<b>Tableau 4-2:</b> Minima d'espacement entre deux arrivées dus aux turbulences de sillage.....	55
<b>Tableau 4-3:</b> Minima d'espacement entre deux arrivées dus aux turbulences de sillage.....	55
<b>Tableau 4-4:</b> TOP pour décollage dans l'axe piste (16/34).....	57
<b>Tableau 4-5:</b> TOP pour décollage dans l'axe piste (14/32).....	57
<b>Tableau 4-6:</b> TOP avec virage de dégagement avant extrémité de piste.....	57
<b>Tableau 4-7:</b> Valeurs caractéristiques.....	59
<b>Tableau 4-8:</b> TOP arrivée pour la piste 16/34.....	60
<b>Tableau 4-9:</b> Valeurs caractéristiques.....	61
<b>Tableau 4-10:</b> TOP à l'arrivée piste 14/32.....	61
<b>Tableau 4-11:</b> Vitesses moyennes en final (Kts) et TOP QFU 16.....	65
<b>Tableau 4-12:</b> Vitesses moyennes en final (Kts) et TOP QFU 14.....	65
<b>Tableau 4-13:</b> Cadences élémentaires des pistes d'aérodrome de Constantine.....	67
<b>Tableau 4-14:</b> Nombre de mouvements enregistré de la journée type.....	68
<b>Tableau 4-15:</b> les catégories d'avions de la journée type.....	68
<b>Tableau 4-16:</b> Valeurs des cadences élémentaires (arrivée de type i- départ de type k).....	78

<b>Tableau 4-17:</b> Valeurs de cadences (arrivée de type i- départ moyen).....	78
<b>Tableau 4-18:</b> Valeurs des cadences élémentaires (départ de type k- arrivée de type j).....	79
<b>Tableau 4-19:</b> Valeurs de cadences (départ moyen- arrivée de type j).....	79
<b>Tableau 4-20:</b> Valeurs d'intervalle de temps ou on peut insérer des départs.....	79
<b>Tableau 4-21:</b> Valeurs des cadences élémentaires (départ de type i- arrivée de type k).....	80
<b>Tableau 4-21:</b> Valeurs des cadences élémentaires (départ de type i- arrivée de type k).....	81
<b>Tableau 4-22:</b> Valeurs de cadences (départ type i- arrivée moyen).....	81
<b>Tableau 4-23:</b> Valeurs de cadences (arrivée type k- départ type j).....	81
<b>Tableau 4-24:</b> Valeurs de cadences (arrivée moyen- départ type j).....	81
<b>Tableau 4-25:</b> Valeurs d'intervalle de temps ou on peut insérer des arrivées.....	82
<b>Tableau 4-26:</b> Valeurs des cadences élémentaires (arrivée de type i- départ de type k).....	83
<b>Tableau 4-27:</b> Valeurs de cadences (arrivée de type i- départ moyen).....	83
<b>Tableau 4-28:</b> Valeurs des cadences élémentaires (départ de type k-arrivée de type j).....	84
<b>Tableau 4-29:</b> Valeurs de cadences (départ moyen- arrivée de type j).....	84
<b>Tableau 4-30:</b> Valeurs d'intervalle de temps ou on peut insérer des départs.....	84
<b>Tableau 4-31:</b> Valeurs de cadences élémentaires (départ de type i- arrivée de type k).....	85
<b>Tableau 4-32:</b> Valeurs de cadences (départ type i- arrivée moyen).....	85
<b>Tableau 4-33:</b> Valeurs de cadences élémentaires (arrivée de type k- départ de type j).....	86
<b>Tableau 4-34:</b> Valeurs de cadences (arrivée moyen- départ type j).....	86
<b>Tableau 4-35:</b> Valeurs d'intervalle de temps ou on peut insérer des arrivées.....	86
<b>Tableau 4-36:</b> Nombre de postes et temps de traitement par type d'aéronef.....	87
<b>Tableau 4-37:</b> Répartitions résultants.....	89

## **Introduction générale :**

Le transport aérien est un mode de transport important pour les déplacements à moyen et long courrier, ainsi qu'il joue un rôle majeur dans le développement économique à travers le monde. Depuis plusieurs décennies, le nombre du trafic aérien ne cesse d'augmenter et pourra doubler dans les prochaines années suivant la tendance actuelle.

La congestion, qui affecte l'efficacité du réseau de transport aérien, est toujours l'une des questions les plus critiques dans le développement de tout système de transport aérien. Arriver à temps ne perturbe pas seulement l'expérience de voyage des passagers, mais aussi perturbe l'efficacité opérationnelle des compagnies aériennes et affecte ainsi l'économie nationale. Pour développer un système de transport aérien et le rendre meilleur et plus efficace, il est important de comprendre les contraintes de la capacité du système.

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

Les limites de la capacité, aussi bien pour le flux du trafic aérien que pour les activités aéroportuaire, sont déjà presque atteintes dans plusieurs pays du monde, de nombreux aéroports sans au bord de la saturation affectant par conséquent la sécurité, l'efficacité et l'économie du système.

Cette étude de la capacité du système piste concerne L'aéroport de Constantine Mohamed Boudiaf, qui pourra atteindre la limite de sa capacité dans un futur proche. Avec cette étude et les modèles de prévisions de la demande, les planificateurs de l'aviation pourraient identifier les lacunes de la capacité dans le système actuel et évaluer les approches possibles pour améliorer le système de transport aérien à l'avenir.

Le présent mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre apportera des généralités sur les aérodromes ainsi qu'une description physique des infrastructures aéroportuaires.

Le deuxième chapitre définira la notion de la capacité aéroportuaire et la capacité des sous-systèmes aéroportuaire ainsi que les facteurs qui influent sur la capacité, ensuite, il présentera les différentes méthodes utilisées pour l'estimation de la capacité aéroportuaire.

Le troisième chapitre présentera l'aéroport de Constantine Mohamed Boudiaf et ses infrastructures.

Le quatrième chapitre présentera la méthode d'approche analytique utilisée pour les calculs de l'estimation de la capacité du système pistes, enfin, les résultats des calculs seront présentés.

# **Chapitre 1**

## **Généralités sur les aérodromes**

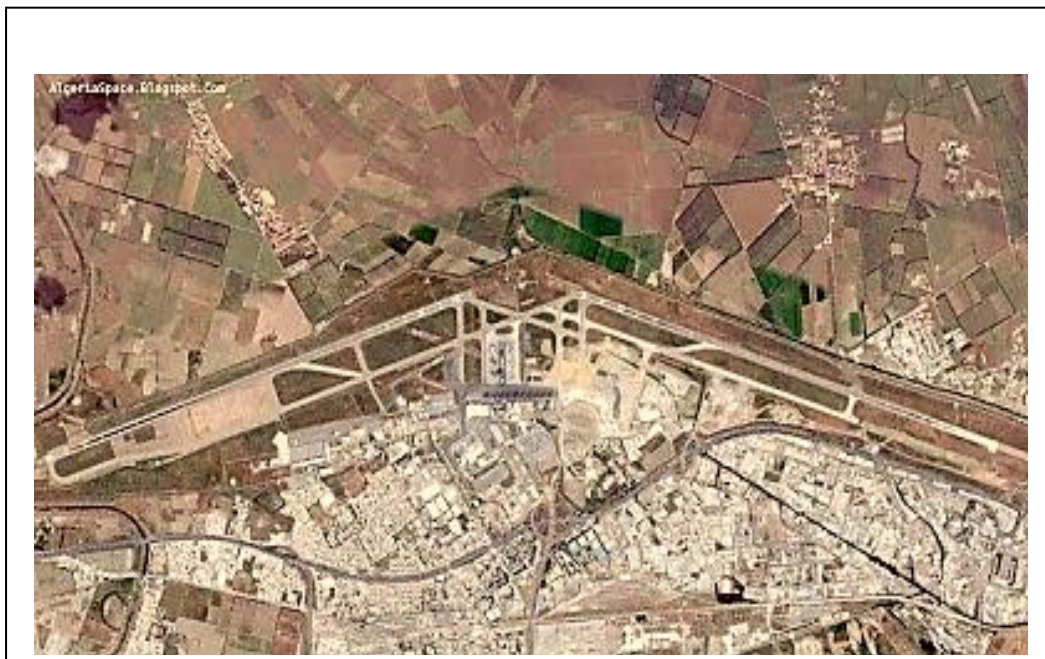
## 1.1. Définition introductive d'un aérodrome

L'aérodrome constitue une zone d'activités qui joue un rôle économique, social et qui engendre des contraintes techniques et environnementales. D'une part, il constitue bien souvent un enjeu pour le développement économique d'une région car il est au cœur du transport de passagers et de marchandises (fret), crée de nombreux emplois directs et indirects dans des domaines techniques, commerciaux entre autres et favorise le développement d'infrastructures (exemple : réseaux autoroutier et ferroviaire). D'autre part, son activité génère des contraintes (servitudes aéronautiques et radioélectriques, zones de dégagement) et des nuisances (sonores notamment). La conception d'un aérodrome doit donc tenir compte de ce contexte tout en respectant les contraintes techniques liées à son activité.

L'aérodrome est défini par le Code de l'Aviation civile dans son article R. 211-1 comme étant « tout terrain ou plan d'eau spécialement aménagé pour l'atterrissage, le décollage et les manœuvres des aéronefs y compris les installations annexes qu'il peut comporter pour les besoins du trafic et le service des aéronefs ».

## 1.2. Constitution d'un aérodrome

L'aérodrome (figure 1) comprend deux parties principales : l'aire de mouvement et les zones des installations. De plus, il est indissociable de son environnement aérien et terrestre.



**Figure 1-1:** Vue générale de l'aéroport d'Alger.

### **1.2.1. L'aire de mouvement**

L'aire de mouvement comprend l'ensemble des parties aménagées de l'aérodrome destinées aux opérations d'atterrissage, de décollage et d'évolution des aéronefs lors de leurs mouvements au sol. Elle comprend :

#### **1.2.1.1. L'aire de manœuvre**

Elle est constitué de :

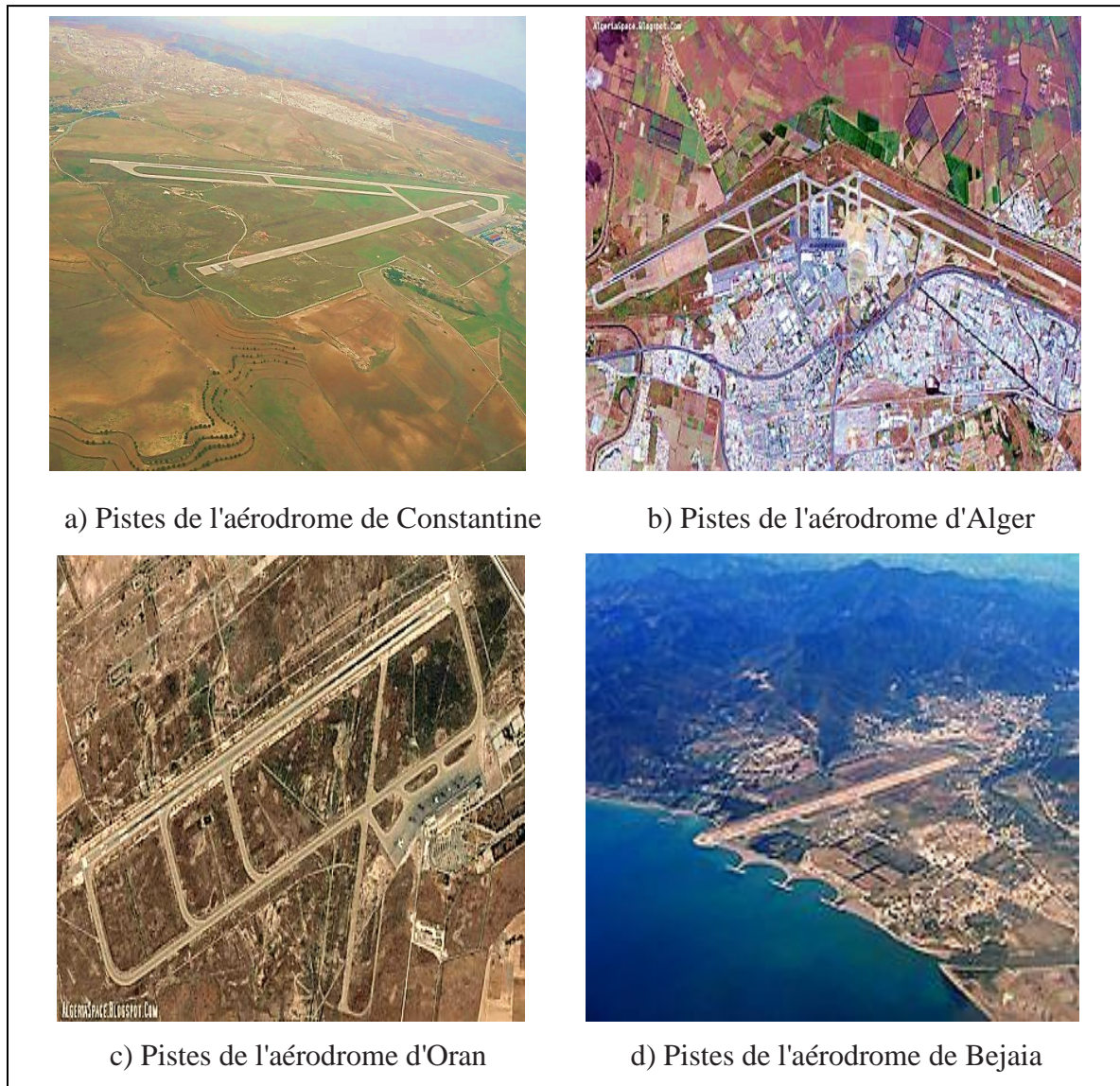
##### a) La piste

Une piste est une zone rectangulaire sur la surface de l'aérodrome, préparée pour le décollage et l'atterrissage des aéronefs. Un aérodrome peut avoir une, ou plusieurs pistes qui sont situées, orientées et configurées de manière à assurer l'utilisation sûre et efficace de l'aéroport dans diverses conditions. Parmi les facteurs qui influent sur l'emplacement, l'orientation et le nombre de pistes d'un aérodrome figurent les conditions météorologiques locales, notamment la distribution et la visibilité du vent, la topographie de l'aérodrome et des environs, le type et la quantité de trafic aérien à desservir, les exigences de performance des aéronefs et le bruit des aéronefs.

Un aérodrome peut avoir plus d'une piste, et par conséquent il peut y avoir de différentes dispositions des pistes; selon la nécessité et les circonstances, appelées le système piste.

Les différents systèmes de pistes sont :

- Système de piste unique.
- Système de pistes parallèles : pistes parallèles rapprochées et pistes parallèles éloignées.
- Système de pistes convergentes.
- Système de pistes sécantes.



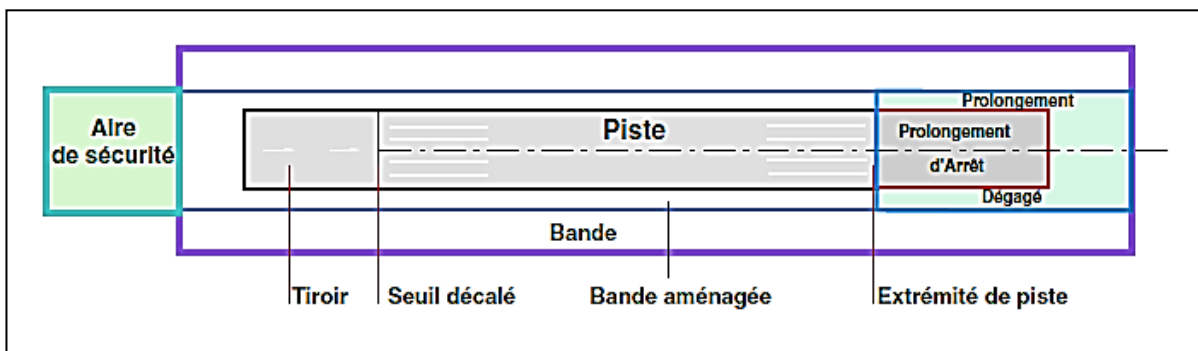
**Figure 1-2:** Exemples réels de configurations de systèmes de pistes d'aéroports exploitant une, deux ou plusieurs pistes sécantes.

Les caractéristiques géométriques suivantes doivent être attribuées à la piste :

- **Le prolongement d'arrêt** : c'est une partie de terrain coaxiale à la piste, adjacente à l'une de ses extrémités, de même largeur que celle de la piste et aménagée de façon à permettre à un aéronef roulant au sol et venant à dépasser occasionnellement l'extrémité de la piste en fin d'une manœuvre de décollage interrompu, dite d'accélération- arrêt, de pouvoir le faire sans subir de dommages.
- **Le prolongement dégagé** : c'est une partie de terrain, coaxiale à la piste, adjacente à l'une de ses extrémités, incorporant le prolongement d'arrêt s'il existe, et ne présentant aucun obstacle pouvant constituer un danger pour un aéronef volant à faible hauteur en fin de manœuvre de décollage.



- **La bande dégagée** : ou plus simplement la bande, est une aire rectangulaire, incorporant la bande aménagée, de même que, lorsqu'il existe, le prolongement dégagé, et ne comportant aucun obstacle pouvant présenter un danger pour un aéronef volant à faible hauteur.
- **L'aire de sécurité d'extrémité de piste** : c'est une aire, adjacente à l'extrémité de la bande et extérieure à celle-ci, symétrique par rapport au prolongement de l'axe de la piste et principalement destinée à réduire les risques de dommages matériels au cas où un aéronef atterrirait trop court ou dépasserait l'extrémité de piste.



**Figure 1-3:** La piste, ses bandes et ses 3 prolongements.

#### b) Les voies de circulations

Les voies de circulation sont un ensemble de voies reliant entre elles les différentes parties de l'aire de mouvement et permettant aux aéronefs de circuler de l'une à l'autre de ces parties.

On distingue généralement sur ces voies de circulation :

- L'entrée-sortie de piste : permettant aux aéronefs d'accéder à la piste ou de la quitter.
- Les voies de relation : permettant le déplacement des aéronefs entre les entrées-sorties de piste et les aires de stationnement.

Les voies de relation deviennent des voies de desserte lorsqu'elles bordent ou traversent les aires de stationnement. Elles font alors partie de l'aire de trafic.

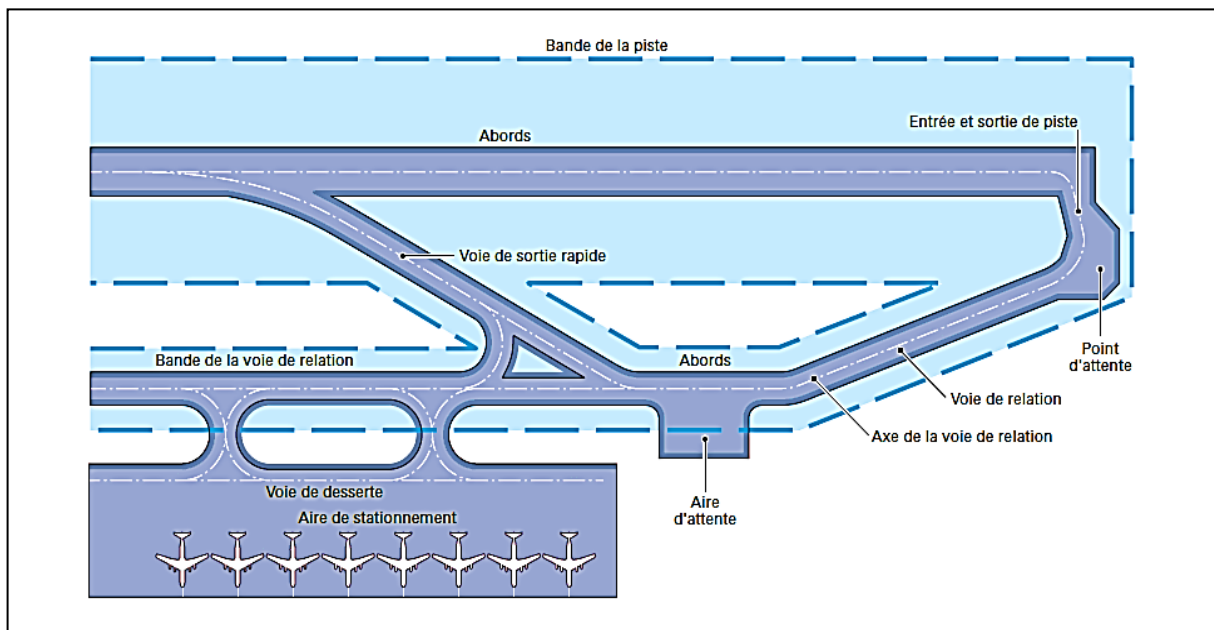
#### 1.2.1.2 Les aires de trafic

Les aires de trafic sont destinées à recevoir les aéronefs pendant les opérations d'escale et qui comprennent:

- Les voies de desserte bordant ou traversant les aires de stationnement,
- Les aires de stationnement.

Les aires de trafic peuvent se différencier suivant leurs fonctions en :

- **Aire de trafic d'aérogare passagers** : qui est une aire désignée pour la manœuvre et le stationnement des avions, sur laquelle les passagers effectuent leur embarquement et leur débarquement. Cette aire peut également être utilisée pour l'avitaillement ou l'entretien des avions y stationnant ainsi que pour y charger et décharger le fret, la poste et les bagages.
- **Aire de trafic d'aérogare fret** : distincte, adjacente à l'aérogare de fret, est parfois prévue pour des avions ne transportant que du fret.
- **Aire de garage** : qui est une aire destinée au stationnement des avions pendant les périodes où ils ne sont pas utilisés commercialement. L'aire de garage peut toutefois être mise à contribution en période de trafic de pointe et doit, par suite, être conçue en conséquence. Son équipement à cette fin peut par contre être simplifié.
- **Aire d'entretien** : aménagée sur les grands aérodromes commerciaux en tête de ligne, sur laquelle les transporteurs aériens choisissent d'installer leurs services d'entretien. La conception de cette aire est naturellement à examiner en liaison avec ces services.



**Figure 1-4:** Éléments constitutifs de l'aire de mouvement.

Cette distinction est souvent théorique, car la spécialisation des aires dépend de l'importance de l'aérodrome. Sur les aérodromes petits et moyens, les mêmes aires peuvent remplir plusieurs fonctions.

### **1.2.2. Les zones des installations**

Elles sont situées à proximité des aires de trafic et sont, en général, regroupées par zones d'activités semblables ;

#### **1.2.2.1 Zones d'exploitation**

Ces zones comprennent les ouvrages destinés à l'exploitation de l'aérodrome :

- Exploitation commerciale : aérogare passagers, aérogare de fret, commissariat hôtelier, abri de matériel de piste, parcs à véhicules, dépôts de carburant, etc.
- Exploitation technique : bloc technique et vigie, moyens généraux de l'aérodrome, service incendie, centrale électrique et parcs à véhicules correspondants.

#### **1.2.2.2 Zones d'activités industrielles :**

Les zones d'activités industrielles regroupent les ouvrages nécessaires à l'entretien et aux réparations d'aéronefs, éventuellement même à la construction aéronautique. Elles peuvent aussi abriter des industries qui fabriquent des matériels destinés à l'exportation et qui ont besoin d'un entrepôt sous douane.

a) Zones spécialisées :

Pour un des affectataires de l'aérodrome (organismes chargés de l'administration générale de l'aérodrome) ou pour une activité spécifique, par exemple :

- Zone militaire : (armée de l'air, de terre ou aéronavale) ;
- Zone pour la sécurité civile
- Zone d'aviation générale : (monomoteur, planeurs, etc.).

b) D'autres installations :

Sont dispersées en divers endroits de l'aérodrome, en fonction de leur utilisation, notamment :

- Les installations de balisage.
- Les postes de transformation.
- Les émetteurs de radionavigation, tels que ILS (Instrument Landing System), radio bornes, VOR (VHF Omnidirectional Radiorange), etc.
- Les installations de mesures météorologiques.
- Les réseaux divers (voirie, eaux usées, eau potable, câbles électriques, etc.).

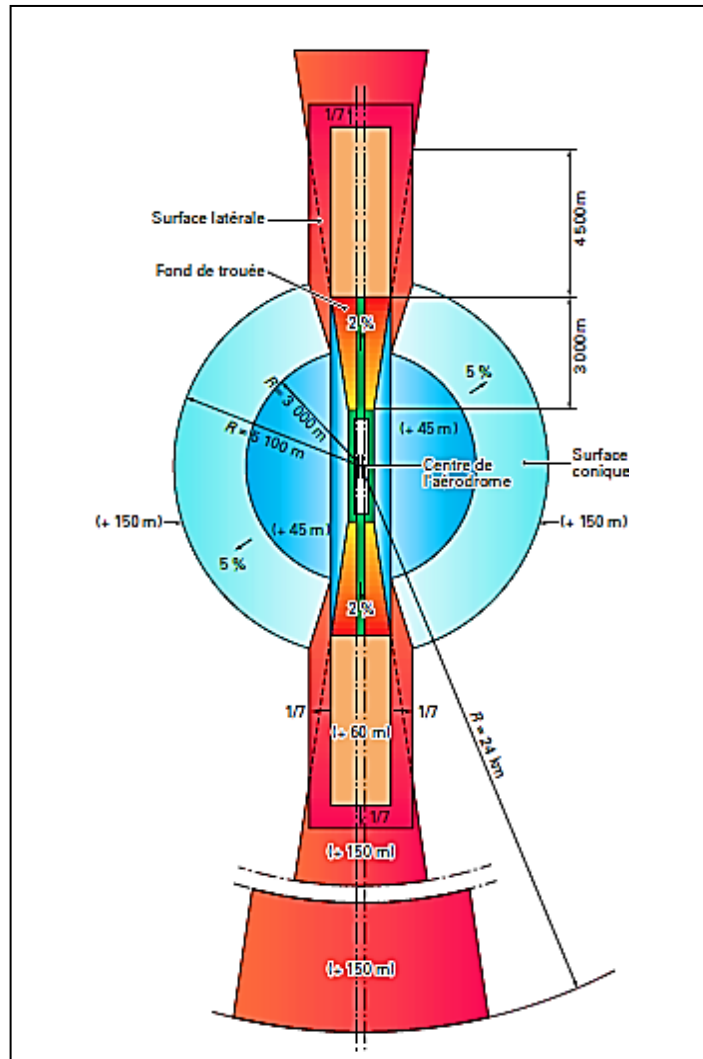
### **1.2.3 Environnement aérien**

#### **1.2.3.1 Dégagements proches**

La sécurité des aéronefs qui effectuent des atterrissages, des décollages et des tours de piste nécessite des volumes d'espace aérien libres d'obstacles, appelés dégagements proches. Ces volumes sont limités par des surfaces de dégagements et protégés par des servitudes aéronautiques.

#### **1.2.3.2 Dégagements lointains et insertion dans la circulation aérienne**

La définition des trajectoires depuis la phase de vol en route jusqu'aux environs immédiats de l'aérodrome se fait en tenant compte des voies aériennes ou autre espace aérien réglementé, du relief et des performances des avions. Les procédures d'approche et d'atterrissage couvrent des distances de plusieurs dizaines de kilomètres, supérieures à celles protégées par les plans de servitudes aéronautiques. La figure 4 représente une vue générale des surfaces de dégagements.



**Figure 1-5:** Vue générale des surfaces de dégagements.

### 1.2.3.3 Servitudes radioélectriques

Pour obtenir un bon fonctionnement des télécommunications radioélectriques, y compris les aides radioélectriques à la navigation aérienne, il est nécessaire de prendre certaines précautions pour les garantir des obstacles, des perturbations électromagnétiques ou des interférences, ceci en tenant compte des particularités de propagation des ondes des diverses fréquences utilisées.

Des servitudes radioélectriques sont donc établies dans l'intérêt des transmissions comme dans celui des réceptions. Ces servitudes sont de deux sortes :

- Celles contre les obstacles.
- Celles contre les perturbations électromagnétiques.

#### **1.2.3.4 Circulation aérienne**

L'existence des procédures d'approche, d'atterrissage ou de décollage conduit à protéger l'espace aérien autour et au-dessus de l'aérodrome par des volumes où la circulation aérienne est très strictement réglementée.

#### **1.2.4 Environnement au sol**

Les interactions entre l'aérodrome et son environnement terrestre sont de nature tantôt négative, tantôt positive.

##### **1.2.4.1 Contraintes engendrées par l'aérodrome**

Les contraintes engendrées par l'aérodrome sont liées aux dégagements aéronautiques, aux servitudes radioélectriques et aux nuisances, essentiellement celles dues au bruit.

Les deux premières sont représentées par les plans de servitudes aéronautiques et radioélectriques.

Les nuisances dues au bruit sont évaluées par un indice psophique. Les différentes valeurs de cet indice permettent de déterminer plusieurs zones correspondant à divers degrés de gêne. Les courbes isopsophiques conduisent à l'établissement du Plan d'exposition au bruit et du Plan de gêne sonore.

Un autre aspect négatif de l'aérodrome est son impact sur le milieu naturel (pollution de l'air ou de l'eau, modification des régimes hydrologiques, modification de la flore et de la faune, etc.).

#### 1.2.4.2 Zone d'influence de l'aérodrome

La zone d'influence, par définition, fournit à l'aérodrome son trafic et, réciproquement, l'aérodrome y constitue un pôle d'activité économique. Il y attire des industries, des services, l'implantation de logements pour le personnel y travaillant.

Les nécessités d'accès à l'aérodrome impliqueront la construction de voiries parfois importantes, de nature à structurer le réseau des transports de la région.

### 1.3 Activités d'un aérodrome

Un aérodrome peut être le siège de nombreuses activités : transport aérien, aviation de voyage, école de pilotage, entraînement aérien, vol à voile, activités militaires diverses, etc. Certains aérodromes peuvent avoir simultanément des activités civiles et militaires.

- **Transport aérien :** Le transport aérien constitue l'activité principale des aéroports importants : il peut s'y effectuer aussi bien pour des personnes que pour des marchandises (s'il s'agit de fret aérien).  
Différents types de vols peuvent utiliser l'aéroport : des vols réguliers ou des vols à la demande.
- **Aviation de voyage ou d'affaires :** Il s'agit de permettre à des avions privés d'effectuer des vols à destination ou au départ de l'aéroport. En général, ce sont des avions bimoteurs légers ou biréacteurs de faible capacité.
- **Aviation de tourisme, école de pilotage :** Il s'agit de vols effectués en général sur des avions légers à hélice, la plupart du temps monomoteurs. Cette activité comprend l'entraînement de pilotes privés (tours de pistes) et les voyages d'entraînement ou d'agrément.
- **Entraînement des pilotes, travail aérien et certification d'aéronefs :** Ces activités ne sont pas, à proprement parler, des activités d'aéroports, mais plutôt des activités d'aérodromes.
- **Vol à voile :** Activité de loisir qui utilise un aérodyne appelé un planeur.

## **1.4 Classification des aérodromes**

La première guerre mondiale avait ouvert la voie au transport aérien par les progrès qu'elle avait fait faire à l'aviation et par la mise sur le marché d'un parc important d'aéronefs qui ne demandaient qu'à être désarmés.

La seconde guerre mondiale a également métamorphosé le paysage aéronautique en produisant des avions banalisant les longues distances mais exigeant des infrastructures adaptées, accessibles en toutes circonstances.

Tenue à faire le tri entre les aérodromes qui lui étaient laissés et d'adapter ceux qu'elle conserverait aux prévisions du trafic, la France s'est engagée, dès 1946, dans une démarche de planification aéroportuaire.

C'est dans ce contexte que la loi du 2 octobre 1946 stipule que les aérodromes publics et privés destinés à la circulation aérienne publique font l'objet d'une classification établie en tenant compte des caractères et de l'importance du trafic qu'ils doivent assurer.

### **1.4.1 Classification du code de l'aviation civile**

Les conditions techniques et administratives de la classification et les catégories dans lesquelles sont classés les aérodromes font l'objet d'un règlement d'administration publique. Ce texte d'application sera le décret qui :

- classera en 4 catégories les aérodromes terrestres créés par l'état ou par d'autres collectivités publiques territoriales et ouverts à la circulation aérienne publique,
- adoptera pour critères de classement, la longueur d'étape et l'accessibilité ou non en tous temps et en toutes circonstances.

Un second décret, élargira cette classification aux aérodromes toujours ouverts à la circulation aérienne publique mais non créés par l'état ou les collectivités publiques territoriales. Ce second décret retient les mêmes critères que le précédent auxquels il ajoute celui de la nature du trafic assuré par l'aérodrome. Il introduit enfin une catégorie E regroupant les aérodromes destinés aux giravions et aux aéronefs à décollage vertical ou



oblique. Cette dernière classification est reprise par l'article R. 222-5 du code de l'aviation civile, lequel distingue par suite :

- **Catégorie A:** Aérodomes destinés aux services à grande distance assurés normalement en toutes circonstances.
- **Catégorie B:** Aérodomes destinés aux services à moyenne distance assurés normalement en toutes circonstances et à certains services à grande distance assurés dans les mêmes conditions mais qui ne comportent pas d'étape longue au départ de ces aérodomes.
- **Catégorie C:** Aérodomes destinés :
  - 1- Aux services à courte distance et à certains services à moyenne et même à longue distance qui ne comportent que des étapes courtes au départ de ces aérodomes,
  - 2- Au grand tourisme.
- **Catégorie D:** Aérodomes destinés à la formation aéronautique, aux sports aériens et au tourisme et à certains services à courte distance.
- **Catégorie E:** Aérodomes destinés aux giravions et aux aéronefs à décollage vertical ou oblique. S'agissant des longueurs d'étape, il apparaît que, alors qu'elles auraient dû l'être en vertu de l'article premier du même décret de 1959, les limites séparant les catégories **A**, **B** et **C** n'ont jamais été officiellement fixées. Il est toutefois d'usage courant de considérer que les étapes longues sont supérieures à 3 000 km, que les étapes moyennes sont comprises entre 1000 km et 3000 km et que les étapes courtes sont inférieures 1 000 km.

#### **1.4.2 Ancienne classification de l'I.T.A.C**

Les aérodomes ouverts à la circulation aérienne publique seraient aménagés et équipés de manière à satisfaire aux activités correspondant à leur catégorie selon des modalités qui devaient être précisées par un arrêté du ministre chargé de l'Aviation Civile après avis du Conseil Supérieur de l'Infrastructure et de la Navigation Aériennes (C.S.I.N.A.).

Cette procédure ne connut jamais aucun aboutissement, le constat s'avérant de plus en plus évident que les caractéristiques techniques à donner à un aérodomme dépendaient d'autres critères d'activité que ceux délimitant les catégories codifiées.

Il en est notamment ainsi :

- du volume de trafic à écouler sur chaque relation,

- de la technologie des aéronefs les plus exigeants appelés à utiliser l'aérodrome,
- des particularités de son exploitation.

Les deux derniers paramètres ci-dessus conduisent notamment à faire la distinction entre les aérodromes à caractéristiques normales et ceux dits à caractéristiques spéciales, et qui ne se limitent pas aux hélistations incorporées à la catégorie E mais comprennent également les altiports, les hydrobases et les plates-formes destinées aux ballons, aux dirigeables et aux ULM.

Publiés à partir de 1983, les fascicules constituant la première édition de l'I.T.A.C. ne se démarquèrent pas pour autant de la classification codifiée de 1959, qu'elle dut toutefois prolonger par une distinction plus fine concernant :

- d'une part, la catégorie D, dont on mesure immédiatement qu'elle recouvre des natures de trafic très différentes,
- d'autre part, la catégorie C, dont on perçoit que la frontière avec la catégorie D présente un certain flou.

C'est ainsi que l'I.T.A.C., dans son édition précédente, distinguait :

- **Au sein de la catégorie C :**

- Une **classe C1** d'aérodromes destinés à l'aviation de voyage et aux lignes à faible trafic (aucune d'entre elles ne supportant un trafic supérieur à 15 000 passagers annuels),
- Une **classe C2** destinés aux lignes à grand et moyen trafic (l'une d'entre elles, au moins, supportant un trafic supérieur à 15 000 passagers par an),

- **Au sein de la catégorie D :**

- Une **classe D1** d'aérodromes destinés à l'aviation légère,
- Une **classe D2** d'aérodromes et destinés, principalement outre-mer, à certains services à courtes distances n'ayant pas d'exigences particulières de régularité,
- Une **classe D3** d'aérodromes destinés à l'aviation légère mais équipés de manière à pouvoir être normalement utilisés en toutes circonstances.

## **1.5 Le rôle économique des aérodromes**

Il est bien entendu qu'un système de transport viable et efficace est un élément fondamental et nécessaire de l'économie de toute région. Le transport, par définition, permet aux gens et aux biens de se déplacer entre les communautés. Ce mouvement conduit au commerce et au commerce entre les marchés, ce qui, à son tour, conduit à des emplois, des gains et un avantage économique global pour les résidents d'une communauté.

### **1.5.1 Le rôle du transport**

Les aérodromes sont les portes d'entrée du système aéronautique national, offrant un accès au transport aérien pour la communauté environnante. Les transporteurs aériens commerciaux offrent un accès au transport aérien entre plusieurs grandes régions métropolitaines du pays. Des milliers de petites villes, villes et villages ont accès à l'aviation par des aéroports desservant l'aviation générale.

## **1.6 Conclusion**

Afin d'assurer des services de transport aérien où même d'autres activités aérienne avec efficacité, rapidité et en toute sécurité, un aérodrome doit passer par plusieurs études et doit comprendre plusieurs parties nécessaire aux mouvements des aéronefs au sol et à leur maintenance, et à l'accueil des passagers dans des meilleurs conditions de voyage.

L'aérodrome a un rôle essentiel dans le développement économique et social d'une région, grâce aux divers services qu'il apporte mais il a un impact direct sur l'environnement, un aérodrome représente une source de pollution importante à cause des gaz brûlés éjectés par les aéronefs, ainsi qu'un plan de gêne sonore influant les habitants de ses environs.

## **Chapitre 2 :**

**La capacité aéroportuaire,  
les paramètres majeurs et  
facteurs influant sur la  
capacité**

## **2.1. Introduction**

La croissance sans précédent de la demande de services de transport aérien au cours des 30 dernières années a, dans de nombreuses situations, dépassé la capacité fournie par les installations. Les éléments du système de transport aérien sont de plus en plus sollicités, ce qui entraîne une détérioration significative des services dans les principaux aéroports. Si la demande du trafic aérien dépasse la capacité de l'aéroport ou de l'espace aérien, des retards se produiront, causant des dépenses aux transporteurs aériens, des inconvénients pour les passagers et une charge de travail accrue pour le système de contrôle aérien ainsi que le personnel tout confondu des aéroports.

Les planificateurs peuvent comparer la capacité d'un système aéroportuaire ou de l'un de ses éléments avec la demande existante et prévue et déterminer si des améliorations pour accroître la capacité seront nécessaires. La comparaison de la capacité de différentes configurations dans les aérodromes permet de déterminer quels sont les plus efficaces. Le retard est un facteur important dans l'analyse coûts-avantages et si une valeur économique peut être affectée au retard, les économies découlant de la réduction du délai résultant d'une amélioration deviennent des avantages qui peuvent être utilisés pour justifier le coût de cette amélioration.

## **2.2 Définition de la capacité**

Le terme capacité est utilisé pour désigner la capacité de traitement d'une installation de service sur une certaine période de temps, généralement définie comme le nombre maximum d'opérations que cette installation peut accueillir sur une période de temps définie. Pour qu'une installation de service puisse réaliser sa capacité maximale ou ultime, il doit y avoir une demande continue de service. Une opération sur l'aérodrome est souvent définie comme un décollage ou un atterrissage, tandis que dans le terminal une opération peut être le traitement d'un passager à travers le terminal. Dans l'espace aérien, une opération peut être considérée comme un aéronef parcourant un certain secteur de l'espace aérien.

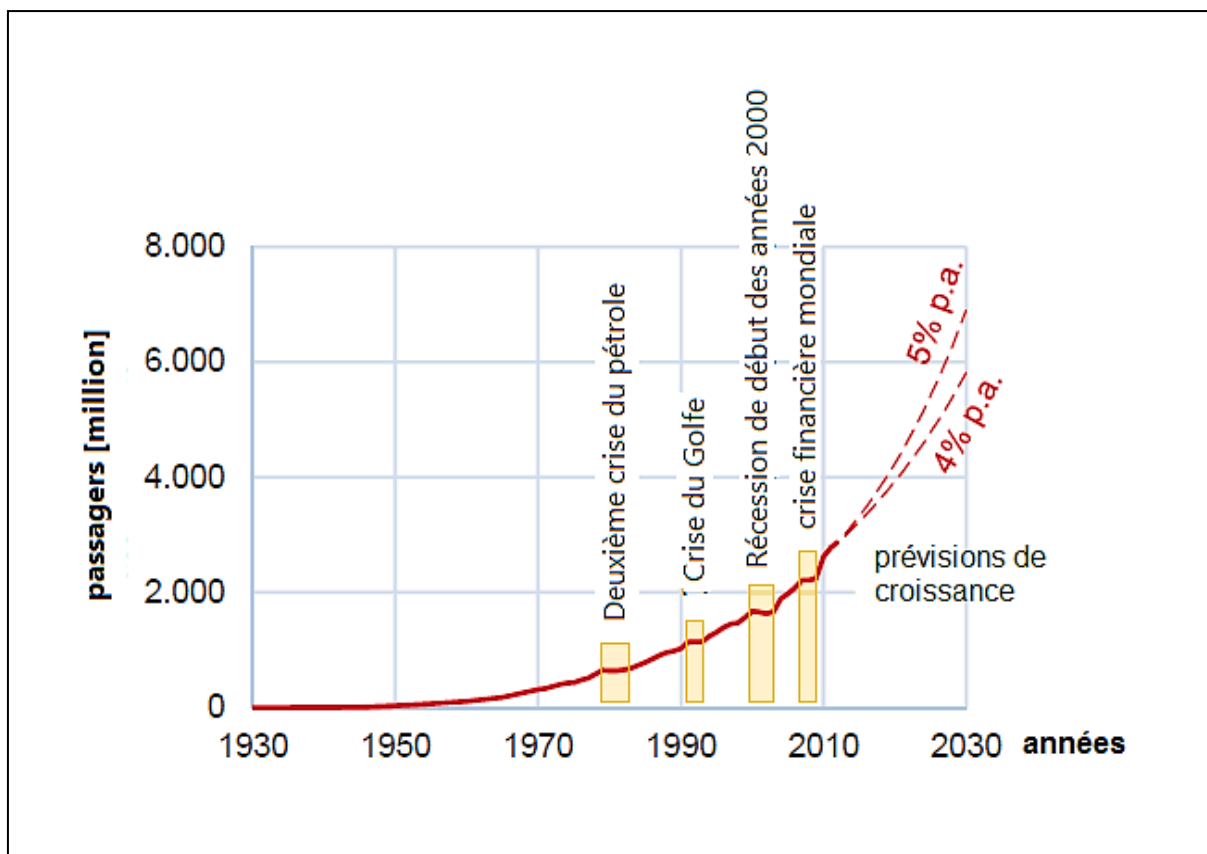
La capacité aéroportuaire est le nombre de demandes qui peut être traité pendant une période donnée par un ensemble d'installation aéroportuaire étant données une qualité de

service retenue et la nature et le volume d'offres proposées par l'ensemble des acteurs impliqués.

### **2.2.1 Croissance du trafic aérien**

Au cours des dernières décennies, le système de trafic aérien a connu une croissance significative (voir la Figure 2-1). Le développement n'a été interrompu que par des périodes de stagnation qui sont attribuables aux effets négatifs de crises imprévisibles. Le besoin de transport continue d'être étroitement lié à la richesse d'une population. À mesure que les continents se développaient différemment au cours des dernières décennies, la croissance du système de trafic aérien était également très différente, ou asymétrique.

En ce qui concerne l'avenir, le système de transport aérien est considéré comme le moyen de transport le plus approprié pour couvrir des distances moyennes et longues dans une période de temps minimale. [Les mégatendances comme la globalisation stimuleront supplémentaires la demande](#). Les principales parties prenantes de l'industrie de l'aviation projettent une croissance globale mondiale du nombre de passagers entre 4 et 5% par an pour les 20 à 30 prochaines années.



**Figure 2-1:** Le développement historique mondial du nombre de passagers du transport aérien et la croissance projetée.

### 2.2.2 Limites de la capacité du système de trafic aérien

À mesure que la demande de trafic aérien augmente, le nombre de vols augmente également. La tendance à l'exploitation de grands avions avec un plus grand nombre de sièges disponibles tend à ralentir la croissance des mouvements d'aéronefs. Des exemples de cela sont le plus grand avion commercial jamais construit, l'Airbus A380 ou le Canadair Régional Jet, qui a été construit pour remplacer les petits avions à courte distance et offre des avantages sur le prix par siège. Cependant, ce développement n'a pas été en mesure de compenser seul la hausse de la demande.

Comme dans tous les systèmes techniques, le système de transport aérien est également limité à sa capacité, [aussi. Dorénavant.](#) La possibilité d'accueillir des vols supplémentaires est exploitée à un certain moment. Le sous-système qui détermine la capacité du système de transport aérien global est celui avec la plus petite capacité unique; pour le

système de transport aérien, il s'agit généralement du système aéroportuaire. En considérant les aéroports, le système de piste peut être considéré comme le goulet d'étranglement du système.

Les retards de vol sont causés par diverses raisons. Une des raisons importantes est la pénurie de capacité aéroportuaire. De plus les aéroports dans le monde opèrent à proximité de leur capacité maximale et de plus ils affichent des moyennes de retards croissantes. Des prévisions indiquent que le développement du système aéroportuaire mondial ne sera pas capable de répondre à la demande croissante des passagers. Cela aurait un impact très négatif sur l'ensemble du secteur du transport aérien, car les pénuries de capacité influenceront directement la croissance. Le système commercial mondial, dont le système de transport aérien est un élément important, sera également affecté négativement.

La solution la plus évidente pour l'inadéquation de la capacité de l'aéroport et de la demande de passagers est l'expansion de l'infrastructure de l'aéroport et, plus précisément, de l'infrastructure des pistes. Ceci n'est pas possible pour la majorité des aéroports. Les principales raisons à cela sont le manque de zones disponibles, l'opposition publique et les besoins élevés en matière d'investissement. En raison de ces défis, le système aéroportuaire dans certaines régions du monde ne changera pas sensiblement dans un proche avenir.

### **2.2.3. Le système aéroportuaire et sa capacité**

Une première définition de la capacité adoptée par les services de l'aviation civile concerne la capacité théorique qui est définie comme le nombre maximum d'aéronefs que le système de pistes pourrait physiquement écouler dans l'unité de temps (l'heure) sans tenir compte de la qualité de service. La prise en compte théorique d'aléas fréquents notamment des incertitudes sur l'heure de présentation en début de finale, sur la vitesse des aéronefs, sur la vitesse du vent, a conduit à définir la capacité pratique comme étant : le débit maximal de trafic écoulé avec une qualité de service égale ou supérieure à un seuil indiqué au préalable, le seuil étant défini souvent par une attente moyenne de 4 minutes.

La capacité aéroportuaire peut être définie par l'estimation de la capacité de chaque partie du sous-système aéroportuaire :



### **2.2.3.1. La capacité des sous-systèmes**

#### a) La capacité des postes de stationnement

Peut être représentée par le nombre maximum d'avions pouvant utiliser les postes de stationnement pendant un intervalle de temps avec un niveau constant de demande. Parmi les facteurs qui influencent la capacité des postes de stationnement on peut citer principalement : le nombre et le type de postes disponibles, la composition de la flotte (envergure des avions, moyens autonomes de manœuvre au poste), la qualité et le niveau des services du personnel sol, les restrictions imposées aux divers types d'avions et le type de vols opérés (vols domestiques, internationaux, intercontinentaux).

#### b) La capacité des aires de trafic

Peut être représentée par le nombre maximum d'avions pouvant transiter par les aires de trafic pendant un intervalle de temps avec un niveau constant de demande.

#### c) La capacité des voies de circulation

Peut être représentée par le nombre maximum d'avions pouvant évoluer dans ce sous-système pendant un intervalle de temps donné de manière fluide avec un niveau constant de demande. Ce sous système est le plus dynamique au niveau du trafic sol et sa capacité dépend principalement du niveau et de la composition de la demande, de la disponibilité de l'infrastructure aéroportuaire, de la configuration de l'aéroport, de la politique de contrôle du trafic sol. Les voies de circulation sont l'interface entre les postes et les pistes, les deux flux du trafic (les arrivées et les départs) s'y croisent et leur interaction peut y être génératrice de problèmes (retards, conflits, sécurité). En conséquence une bonne gestion et coordination des mouvements y est essentielle pour assurer en toute sécurité une meilleure utilisation de cette ressource.

#### d) La capacité des pistes

Peut être représentée par le nombre maximum d'opérations (atterrissages et décollages) pouvant être effectués dans un intervalle de temps de manière fluide avec un

niveau constant de demande. Etant donné le nombre limité de pistes pour un aéroport, ce sous système est souvent considéré comme le plus limitatif du point de vue de la capacité pratique. Les facteurs qui influent sur la capacité du sous-système des pistes sont principalement : le niveau et la composition de la demande du trafic, la configuration de l'aéroport, les conditions météorologiques, la disponibilité des services du contrôle sol.

#### e) La capacité des aéroports

La capacité des aéroports est définie comme la capacité des installations et des services terrestres de l'aéroport à accueillir collectivement les passagers, les visiteurs, le fret aérien, les véhicules d'accès au sol et les aéronefs dans des conditions de service prédéfinies. Le passager joue un rôle central dans la définition de la capacité des aéroports, car d'autres éléments du terrain (par exemple, les visiteurs, l'accès au sol et les parkings) sont tous dictés par les besoins et les exigences des activités de passagers à l'intérieur et à l'extérieur de l'aéroport et le modèle de cette demande.

Il existe un plafond au-delà duquel les aéroports ne peuvent pas croître, le concept de capacité et du niveau de services est le principal critère. En outre, ce n'est pas l'espace public accessible au passager qui limitera l'expansion, mais c'est l'espace opérationnel non public qui prend en charge l'ensemble du passager et du bagage, ce qui pourrait représenter 80% de l'espace brut de l'aéroport. La capacité est donc l'élément crucial de cette équation, dont la décision d'élargir l'aéroport dépendrait en grande partie. En règle générale, cette décision repose sur les résultats de l'analyse de la demande-capacité pour l'installation particulière, étant donné que la demande est satisfaite avec le niveau de services désiré.

Bien que des relations et des modèles existent qui s'appliquent à l'analyse et à l'évaluation de la capacité du système de piste, les procédures d'évaluation de la capacité de l'aéroport ne sont pas aussi clairement définies que celles du côté aérien. Il existe peu de procédures et pratiques généralement acceptées, principalement développées de manière empirique pour évaluer les besoins en espace qui approchent de la capacité. Le côté terrestre de l'aéroport est composé de nombreuses installations et espaces différents qui exercent des fonctions dynamiques et statiques, c'est-à-dire le traitement, la maintenance ou le transit. Ces fonctions sont conçues pour effectuer un traitement de facilitation des passagers requis à l'arrivée et au départ. La capacité terrestre globale est déterminée à partir des capacités

individuelles de ces installations lorsqu'elles s'approchent de la capacité maximale atteignable, ce qui entraîne une opération à faible niveau de service.

### **2.2.3.2. La capacité théorique et la capacité opérationnelle**

La capacité théorique (CT) est la capacité idéale de l'aéroport, elle est obtenue dans la mesure où les avions sont positionnés à l'arrivée comme au départ de façon idéale, sans qu'il y ait aucun retard, aucune perte de temps.

La capacité opérationnelle (CO) est la capacité maximale, réaliste, en tenant compte des moyens dont on dispose au sein de l'aéroport et de la qualité de service qu'on souhaite offrir aux passagers.

## **2.3. Les facteurs influant sur la capacité**

La capacité d'un aéroport n'est pas constante. Elle varie considérablement en fonction d'un certain nombre de considérations. Lorsqu'un numéro spécifique est donné pour la capacité aéroportuaire, il s'agit habituellement d'un nombre moyen basé soit sur certaines conditions, soit sur un ensemble spécifique de conditions.

Cependant, une compréhension de la variabilité de la capacité, plutôt que de sa valeur moyenne, est cruciale pour la gestion efficace d'un aéroport. Une grande partie de la stratégie pour la gestion réussie d'un aéroport consiste à concevoir des moyens de compenser un certain nombre de facteurs qui, individuellement ou en combinaison, contribuent à réduire la capacité ou à provoquer des retards.

Les facteurs qui influent sur la capacité d'un système de piste sont nombreux. Ces facteurs peuvent être regroupés en quatre classes qui sont liées aux; contrôle du trafic aérien, les caractéristiques de la demande, les conditions environnementales dans le voisinage de l'aéroport et la mise en page et la conception du système de piste:

### 2.3.1. Facteurs de contrôle du trafic aérien

L'OACI spécifie des séparations verticales, horizontales et latérales minimales pour les aéronefs dans l'intérêt de la sécurité aérienne. À proximité d'un aéroport, la séparation horizontale minimale admissible est généralement de 2 à 5 nautiques miles, en fonction de la taille de l'avion, de la disponibilité du radar, du séquençage des opérations de l'aéronef et des procédures de l'espace aérien en général. Étant donné que deux avions ne sont pas autorisés sur la piste en même temps, le temps d'occupation de la piste influencera la capacité.

Considérons l'exemple hypothétique suivant. Une piste sert des aéronefs qui débarquent à des vitesses de 165 mph tout en maintenant la séparation minimale de 3 nautiques miles comme spécifié par la FAA. Le temps moyen d'occupation des pistes pour atterrir l'avion est de 25 secondes. Examiner l'effet de ces facteurs sur la capacité des pistes; L'espacement minimum est de  $3 \times 6076 \text{ ft} = 18228 \text{ pieds}$ . En termes de temps, l'espacement minimum d'arrivée est de :  $18228 \text{ ft} \div (165 \times 5280/3600) \text{ ft} / \text{sec} = 75 \text{ sec}$ . Le taux maximal d'arrivées qui peut être servi par la piste ne dépasse pas  $3600 \text{ sec} / \text{h} \div 75 \text{ sec} / \text{arrivée} = 48 \text{ arrivées} / \text{heure}$ .

Dans les calculs de capacité, il est généralement nécessaire de calculer le pourcentage de toutes les opérations d'aéronefs qui sont arrivées ou le rapport d'arrivée / départ et de tenir compte de cet effet. Les arrivées en approche finale ont généralement une priorité absolue par rapport aux départs. Les départs sont libérés lorsque des lacunes appropriées se produisent dans le flux d'arrivée.

La capacité d'une piste peut être considérablement augmentée en insérant un départ entre les paires d'arrivées, une caractéristique limitant de ce schéma de séquençage est la réglementation FAA nécessitant une séparation minimale de 2 nautiques miles entre l'insertion d'un départ et l'arrivée suivante.

La séparation est le facteur de contrôle du trafic aérien dominant qui affecte la capacité. D'autres facteurs incluent :

1. La stratégie employée par les contrôleurs dans le séquençage des avions voyageant à des vitesses différentes (par exemple, le premier arrivé, le premier servi, le séquençage de la classe de vitesse).

2. La probabilité admissible de violation de la règle de séparation, reconnaissant qu'il n'est pas possible de maintenir la séparation admissible avec une précision parfaite en tout temps.
3. La sophistication du système de contrôle de la circulation aérienne, qui affecte la précision avec laquelle les aéronefs peuvent être livrés à la porte ILS et la capacité de surveiller les vitesses des aéronefs et de détecter les positions et les mouvements de l'avion.

### **2.3.2. Caractéristiques de la demande**

La capacité d'une piste dépend de la taille, de la vitesse, de la maniabilité, de l'emplacement des sorties de voie de circulation et de la capacité de freinage ainsi que de la technique pilote. Mais les éléments les plus importants sont la grandeur et le sommet de la demande elle-même. L'effet de la taille de l'avion se reflète à la fois dans le phénomène de vortex de pointe d'aile et dans les différences d'approche et de vitesse d'atterrissage, les avions à réaction lourds génèrent des tourtes d'aile qui créent des problèmes de maniabilité et de contrôle pour les petits avions qui fonctionnent dans leur sillage. Dans l'intérêt de la sécurité, la FAA a mis en place des règles de contrôle de la circulation aérienne qui augmentent la séparation entre les petits avions suite à un jet lourd à 5 nautiques milles. Ce règlement diminue la capacité des pistes qui servent un nombre important de jets lourds et de petits avions.

Les vitesses auxquelles différents aéronefs s'approchent d'une piste ne sont ni égales ni constantes le long de la voie d'approche. Souvent, des séparations plus longues que le minimum autorisé par les règles de circulation aérienne doivent être tolérées pour tenir compte d'un mélange d'avions lents et rapides. En raison des variations de vitesse d'approche, une marge de sécurité doit permettre de garantir que la séparation minimale n'est pas violée en aucun point le long de la voie d'approche. La vitesse de contact, la capacité de freinage et la maniabilité au sol affectent le temps d'occupation de la piste pour l'atterrissage, ce qui, à son tour, détermine le moment où un avion de départ peut être relâché.

Une caractéristique de la demande qui peut affecter de manière significative la capacité d'une piste est le pourcentage de toutes les opérations d'aéronefs arrivant, c'est-à-dire qu'une piste utilisée exclusivement pour les arrivées aura une capacité différente de celle utilisée pour les départs ou les opérations mixtes.

Une caractéristique de la demande qui peut affecter de manière significative la capacité d'une piste est le pourcentage de toutes les opérations d'aéronefs arrivant, c'est-à-dire qu'une piste utilisée exclusivement pour les arrivées aura une capacité différente de celle utilisée pour les départs ou les opérations mixtes.

### **2.3.3. Facteurs environnementaux :**

Les facteurs environnementaux les plus importants qui influent sur la capacité des pistes sont la visibilité, les conditions de la surface de piste, les vents et les exigences de réduction du bruit.

Dans des conditions de mauvaise visibilité, les pilotes et les contrôleurs aériens deviennent plus prudents. Des séparations d'avion plus longues et des temps d'occupation accrus des pistes se produisent, et les pistes avec des vents latéraux marginaux sont moins susceptibles d'être utilisées. Lorsque la visibilité ou le plafond des nuages est inférieur à certaines valeurs prescrites, les règles de vol aux instruments sont utilisées et la responsabilité d'une séparation sûre entre les aéronefs passe des pilotes au personnel de contrôle de la circulation aérienne. Un système de piste peut être fermé au trafic lorsque la visibilité est extrêmement limitée. De même, les conditions de surface de la piste mouillée ou glissante peuvent causer des distances de décélération plus longues et des temps d'occupation accrus des pistes. De fortes accumulations de neige et de glace justifient la fermeture d'une piste.

Pour des raisons de sécurité, le composant de vitesse du vent perpendiculaire au chemin de l'avion ne doit pas dépasser un minimum spécifié, et le composant dans le sens du mouvement de l'avion est encore plus préoccupant. Les vents contraires excessifs et les vents de queue imposent occasionnellement des restrictions sur l'utilisation d'une ou plusieurs pistes.

### **2.3.4. Facteurs de conception**

Pour le planificateur de l'aéroport, les caractéristiques de conception comprennent la catégorie de facteurs les plus importantes qui affectent la capacité des pistes. Lorsque des augmentations quantiques de la capacité aéroportuaire sont nécessaires pour répondre à la demande future, le planificateur de l'aéroport envisage des améliorations dans la disposition et la conception du système de piste et de voie de circulation.

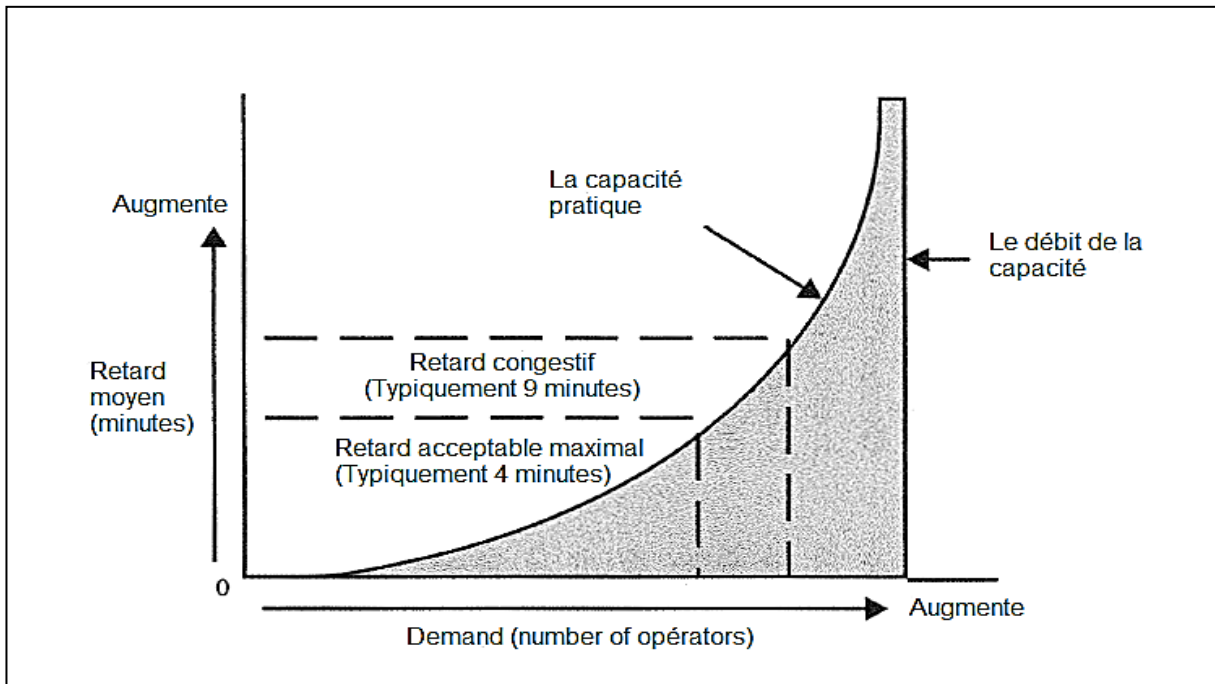
Les principaux facteurs de cette classe sont les suivants:

1. Nombre, espacement, longueur et orientation des pistes.
2. Nombre, emplacements et conception des voies de circulation de sortie
3. Conception d'entrées de rampe.

## **2.4. Définition du retard**

Le retard est défini comme la durée entre le temps souhaité qu'une opération se produise et le moment réel de l'opération. Lorsque les aéronefs partent et arrivent à temps, selon leurs horaires respectifs. Si, cependant, un avion défaite réellement une heure après son heure de départ prévue, on dit que cet aéronef avait 1 heure de retard. Ce délai peut avoir été le résultat d'un certain nombre de facteurs ; les bagages peuvent avoir été lents à être chargés, les conditions météorologiques peuvent avoir exigé que l'avion attende jusqu'à ce que les conditions s'améliorent, ou peut-être que l'avion était l'un dans un grand nombre d'avions qui devaient partir pendant une forte demande L'heure du jour où la capacité de l'aérodrome était insuffisante pour répondre à une telle demande.

La figure 2-2 illustre la relation entre la demande, la capacité et le retard. Comme il est illustré, un certain retard est fréquemment rencontré par les avions, même lorsque les niveaux de demande sont nettement inférieurs à la capacité. Ces retards sont habituellement nominaux, créés à la suite d'exemples clairs de deux avions souhaitant opérer dans des intervalles de temps très rapprochés, ou des anomalies opérationnelles mineures. À mesure que la demande se rapproche de la capacité, les retards ont tendance à augmenter de manière exceptionnelle, car le potentiel de ces anomalies et de ces conflits augmente.



**Figure 2-2:** Le retard en fonction de la capacité et de la demande.

La FAA définit le niveau de retard maximal acceptable en fonction du niveau de la demande, en relation avec le débit de la capacité, ce qui entraînera des retards d'aéronefs d'au plus 4 minutes par opération. Une contraction congestive se produit lorsque la demande est suffisamment proche de la capacité de production pour avoir une moyenne de 9 minutes ou plus de retard d'aéronef par opération. Comme la demande atteint de manière asymptotique la capacité de production, les retards peuvent atteindre plusieurs heures par opération. Pendant les périodes extrêmes, lorsque la demande est très élevée et que la capacité est considérablement réduite en raison de la météo ou de toute autre condition défavorable, les opérations régulières de l'avion peuvent être retardées pendant plusieurs jours, sinon annulées.

Le retard peut être acceptable selon un jugement impliquant trois concepts. Tout d'abord, certains retards sont inévitables en raison de facteurs indépendants de la volonté humaine, tels que l'évolution des conditions météorologiques. Deuxièmement, certains retards, bien qu'ils soient évitables, pourraient être trop coûteux à éliminer. Par exemple, le coût de la construction d'une nouvelle piste uniquement pour réduire les retards peut-être de quelques secondes par opération peut être excessif. Troisièmement, même avec l'effort le plus vigoureux, les opérations d'aéronefs sont exigées sur un intervalle quelque peu aléatoire, il existe toujours la probabilité que certains avions rencontrent un retard supérieur à un montant



acceptable. Ainsi, un délai acceptable est essentiellement une décision politique concernant la tolérabilité du retard dépassant un certain montant, en tenant compte de la faisabilité technique et de la fonctionnalité économique des remèdes disponibles.

## **2.5. Approches à l'estimation de la capacité**

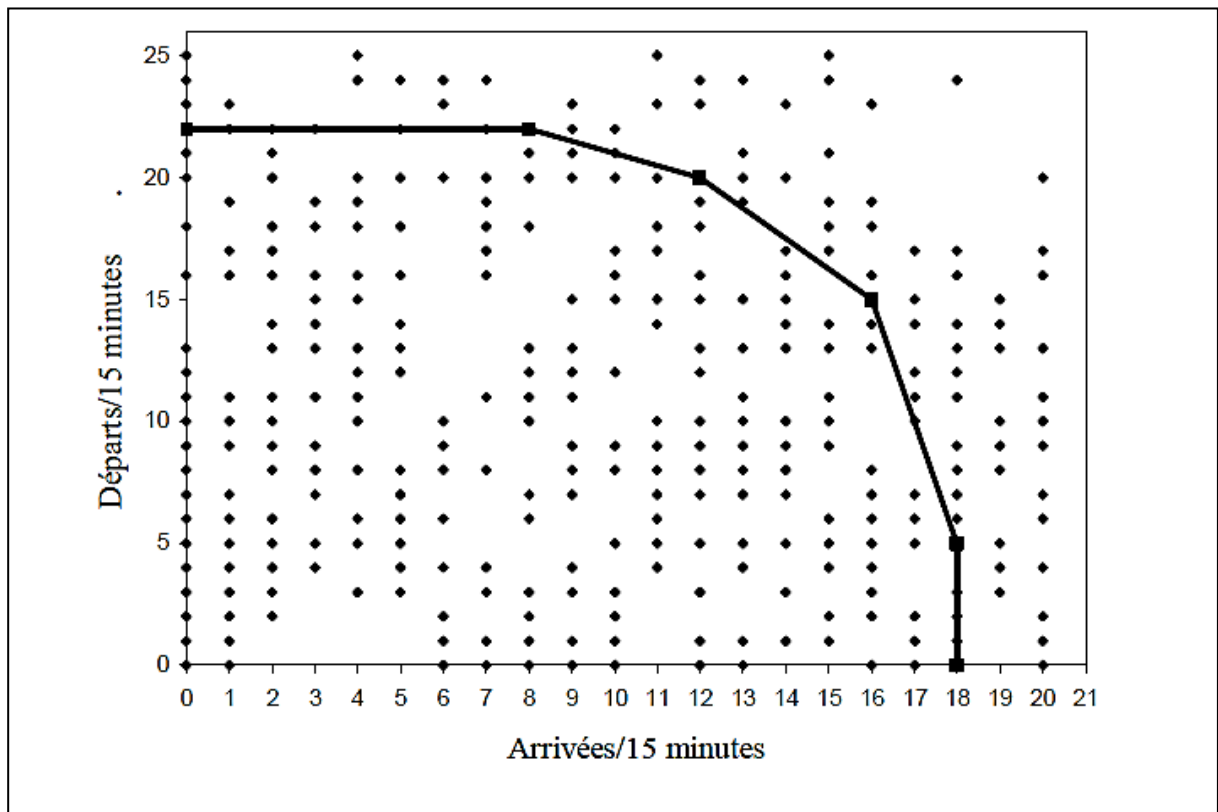
Il y a une très grande diversité dans les principales approches qui ont été développées pour estimer la capacité d'un terminal aéroportuaire. Il y a une très grande diversité dans celles-ci et on peut distinguer :

### **2.5.1. Evaluation statistique de la capacité aéroportuaire**

#### **2.5.1.1. Une approche statistique globale**

En général, les études développées dans ce sens ont un caractère global compte tenu de la forte interaction entre les flux d'arrivée et de départ sur une ou plusieurs pistes et il serait difficile d'en séparer les causes et les conséquences sur la capacité de chacun.

La méthode empirique utilisée consiste à estimer la courbe de capacité de l'aéroport en considérant conjointement le nombre d'arrivées et de départs par période de 15 minutes. La méthode est fondée sur l'hypothèse selon laquelle pendant la période considérée, les arrivées et les départs observés pendant les heures de pointe reflètent la performance de l'aéroport à son niveau maximum de capacité. Par conséquent, la courbe enveloppant les données observées est considérée comme une évaluation de la capacité de l'aéroport.



**Figure 2-3:** L'estimation de la capacité pratique selon Gilbo.

Les données observées sont organisées selon les conditions de fonctionnement de l'aéroport afin de fournir des courbes de capacité pour différentes conditions spécifiques associées à des configurations des pistes et des conditions météorologiques différentes. On suppose que l'aéroport utilise un ensemble limité de configurations de pistes avec une fréquence suffisante pour retirer des données statistiques en nombre suffisant afin d'estimer valablement les courbes de capacité. Les conditions atmosphériques sont groupées par catégories opérationnelles, reflétant ainsi les limitations conventionnelles de visibilité et de plafond. Des courbes de capacité peuvent alors être obtenues pour ces différentes conditions atmosphériques.

La méthode considère à la fois le planning des arrivées/départs et l'ensemble des arrivées et des départs observés pendant des intervalles de 15 minutes sur une longue période (par exemple un mois ou plus). Les coordonnées de chaque point montrent le nombre d'arrivées et de départs effectués pendant le même intervalle de 15 minutes. La courbe de capacité est estimée en traçant une enveloppe convexe et linéaire par morceaux, pour couvrir

l'ensemble de ces points. On en déduit une relation implicite reliant le nombre maximum de départs possibles au nombre d'arrivées.

Dans un autre travail, il a été établi que théoriquement les capacités d'arrivée et de départ sont délimitées par une fonction non linéaire convexe. On parlera de la frontière de Pareto.

La méthode proposée par Gilbo élimine certaines valeurs extrêmes observées qui reflètent des événements rares pendant lesquels un aéroport fonctionne au-delà de ses limites opérationnelles normales, c'est-à-dire pendant une période de temps très courte, dans des conditions pouvant éventuellement mettre en jeu la sécurité des opérations. Les critères de rejet sont : la proximité des observations extrêmes aux observations les plus fréquentes et la fréquence relative de ces observations extrêmes.

Il faut remarquer ici que le même niveau des performances peut ne pas être soutenu pendant plusieurs intervalles de 15 minutes consécutifs : la capacité à soutenir un nombre maximal «extrême » d'opérations pendant une longue période dépend de manière significative du facteur humain. D'ailleurs, les données statistiques montrent que le nombre maximum d'arrivées et de départs pendant des intervalles de 30 minutes est inférieur au double de celui observé sur des périodes de 15 minutes, et de même pour des périodes de 60 minutes par rapport à des périodes de 30 minutes. Cet effet peut également être expliqué par les caractéristiques de la demande du trafic sur de plus longs intervalles de temps.

#### **2.5.1.2. Un modèle théorique de la capacité associée aux pistes**

La NASA dans le cadre de l'étude ASAC (Aviation System Analysis Capability) a développé un modèle pour l'évaluation de la capacité associée aux pistes d'un aéroport. Ce modèle est destiné à estimer la capacité d'un aéroport en fonction des conditions météorologiques, des procédures de gestion du trafic, de la demande du trafic et du niveau d'équipement de l'aéroport. La capacité est représentée comme la frontière de Pareto des flux des départs et des arrivées par période de temps. La durée de cette période peut varier de 15 à 60 minutes. Cette frontière est la limite supérieure au-delà de laquelle les nombres de départs et d'arrivées ne peuvent plus être augmentés simultanément.

- **Principes du modèle ASAC**

Ce modèle est basé sur la théorie des files d'attente, les arrivées étant supposées être aléatoires. Les paramètres du modèle comprennent les séparations standards au niveau des opérations sur la piste, les temps d'occupation de piste, le temps de réponse du contrôleur de trafic sol et d'autres règles imposées par les opérations dans des mauvaises conditions de visibilité. Le modèle reprend les incertitudes de la position et de la vitesse d'avion en vol dans la phase d'approche finale. Ces incertitudes influent sur les marges adoptées dans les contraintes de séparation entre les avions. D'autres incertitudes prises en compte par le modèle sont celles dues aux délais de communication et à la distribution de la vitesse du vent. L'évaluation de la capacité des pistes est réalisée à l'aide d'un module d'estimation des délais, et plus particulièrement des délais d'arrivées.

Ainsi ce modèle de capacité ne peut avoir qu'un caractère indicatif, il sera difficile de l'utiliser pour évaluer l'influence de tel ou tel paramètres ou de telle ou telle modification d'une procédure opérationnelle sur la capacité du système de pistes.

On peut ainsi considérer qu'avec ce modèle, on atteint la limite de ce que la théorie peut apporter pour évaluer la capacité d'un système de pistes.

## **2.5.2. Evaluation de la capacité par la simulation**

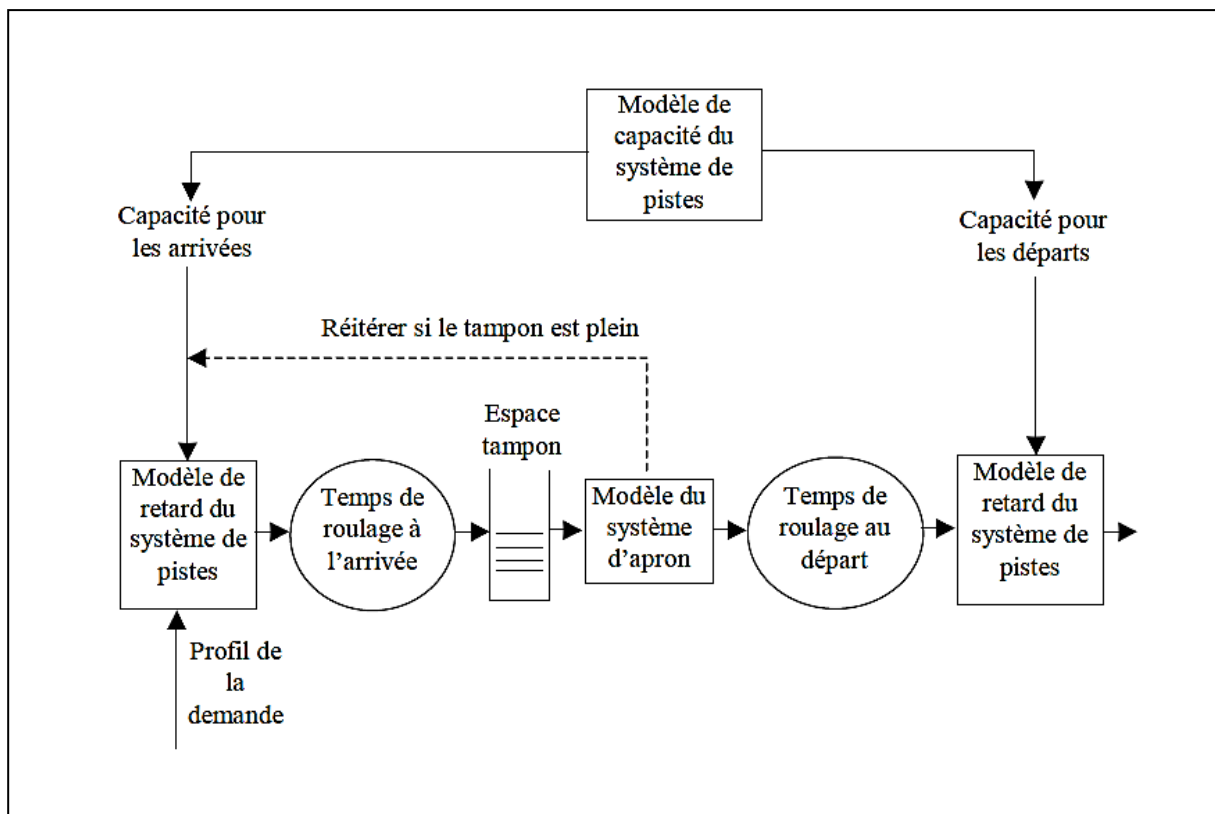
Une autre approche de l'évaluation de la capacité est possible en essayant de modéliser directement les processus physiques mis en jeu, notamment avec leurs aléas et leur caractère non stationnaire. Suivant le degré de détail avec lequel les flux d'aéronefs sont appréhendés par les modèles de simulation, on discernera des modèles de type macroscopique, mésoscopique ou microscopique.

### **2.5.2.1. Approches macroscopiques**

La modélisation macroscopique des plates-formes aéroportuaires conduit à un modèle global de l'aéroport tout en gardant une formulation mathématique assez compacte. Le principal objectif est d'évaluer grossièrement la capacité et l'impact sur le niveau de service des diverses configurations et aménagements possibles de l'infrastructure aéroportuaire. Ses

principaux utilisateurs sont les autorités aéroportuaires chargées de la planification du développement de la plate-forme aéroportuaire.

L'un des modèles macroscopique des plus connus est MACAD qui est destiné à assister les gestionnaires d'aéroports dans l'optimisation de la capacité aéroportuaire (côté piste) étant donné un niveau de demande et un niveau de service désiré. Le niveau de service des avions est représenté par le retard aux avions généré sur la plate-forme aéroportuaire. La plate-forme est modélisée comme un réseau de postes d'arrivée, voies de circulation à l'arrivée, zone de stationnement, voies de circulation au départ, pistes de décollage. Chacun de ces modules est représenté de façon analytique et probabiliste.



**Figure 2-4:** Composition du modèle de simulation MACAD

Ce modèle, par son degré de détail insuffisant et par son incapacité à prendre en compte de façon réaliste les interactions existantes entre les différents postes de service des avions, est donc peu adapté à l'étude de l'influence du système de gestion des flux d'avions sur la capacité de la plate-forme aéroportuaire. Il peut, néanmoins, être un outil de diagnostic

global préliminaire à une étude plus fine et plus lourde en termes de moyens de traitement numérique à mettre en œuvre.

### **2.5.2.2. Approches microscopiques**

L'approche la plus naturelle pour évaluer la capacité d'un système aéroportuaire est d'avoir une représentation topologique de l'infrastructure de la plate-forme et de simuler l'évolution du trafic représenté de façon microscopique sur cette infrastructure.

La possibilité de simuler de façon détaillée les mouvements des avions sur les voies de circulation et les pistes de l'aéroport fournit un environnement adéquat pour tester des nouvelles dispositions relatives à la gestion du trafic des avions sur la plate-forme aéroportuaire. Ceci peut permettre d'étudier différentes mesures envisagées pour la gestion du trafic au sol des aéronefs, telles que :

- L'effet de l'insertion des départs dans le flux de trafic arrivant.
- L'efficacité des stratégies de gestion des temps de départ des postes.
- L'efficacité des stratégies de gestion de la congestion du système composé des pistes et des voies de circulation.
- La génération de cheminements pour les départs et les arrivées.

L'un des modèles microscopiques de trafic au sol des aéronefs, GMS (Ground Movement Simulator), décrit de façon très détaillée les opérations de trafic aérien en temps réel pour toutes les étapes de vol, du décollage à l'atterrissage, aussi bien que toutes les phases du mouvement au sol de l'avion comprenant le roulage à l'atterrissage, le roulage au sol, les arrêts, l'entrée au poste, le recul du poste, et le décollage. Il fournit des représentations graphiques très détaillées de ces activités. Ce simulateur est à base d'événements discrets pour une granularité de 1 seconde, ce qui permet de reproduire de façon très fine les opérations. Néanmoins, comme d'autres simulateurs de trafic, celui-ci ignore le trafic des véhicules de service sur la plate-forme aéroportuaire.

Ainsi GMS apparaît plutôt comme un outil d'évaluation des politiques de gestion du trafic sol au niveau tactique, voire temps réel, plutôt que comme un outil de gestion du trafic à un niveau plus stratégique, niveau associé à la notion de capacité.

### 2.5.2.3. Approches mésoscopiques

Les modèles mésoscopiques proposent un niveau de détail intermédiaire entre les modèles macroscopiques et les modèles microscopiques. Ainsi, si d'un côté ils proposent un niveau de détail beaucoup plus grand que dans les modèles macroscopiques, leur mise en œuvre est bien moins lourde que dans le cas des modèles microscopiques.

La plupart de ces modèles mettent en œuvre des systèmes de files d'attente. Qui représente la dynamique de différentes files d'attente par des processus Markoviens conduisant à l'évaluation de l'attente moyenne dans les différentes files. Les paramètres de ces processus dépendant des conditions opérationnelles, il est possible d'associer à chacune d'entre elles un niveau de capacité pratique. Ceci conduit alors à établir des cartes de capacité telle celle représentée sur la figure 2-5 ci-dessous.

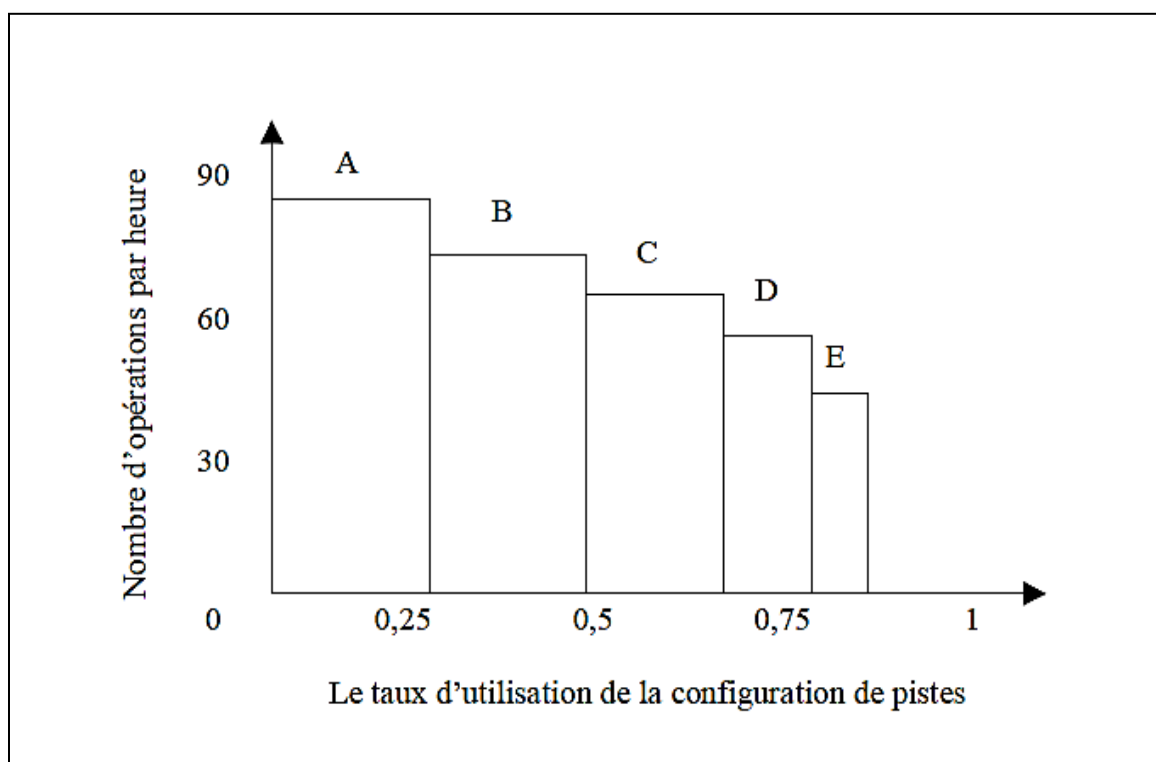


Figure 2-5: La carte de capacité d'un système de pistes.

Sur cette figure, **A** correspond à une opération de jour par beau temps, et de **B** à **E** les conditions opérationnelles sont dégradées progressivement (visibilité, vent).

Ainsi les modèles mésoscopiques, qui par certains aspects (utilisation de la théorie des processus stochastiques), se rapprochent des modèles analytiques, ne conduisent que de façon indirecte et plutôt opaque à l'évaluation de la capacité aéroportuaire.

## **2.6. Conclusion**

Le nombre d'avion augmente au fil du temps à cause de la demande sans cesse, cela entraîne une saturation dans les différents systèmes de contrôle de la circulation aérienne. Quand un système atteint ses limites de travail par saturation, des failles se présentent en affectant l'efficacité du contrôle aérien et par conséquent la sécurité des vies humaines.

L'étude de la capacité a une grande importance, elle permet de connaître les limites des systèmes du trafic aérien, ce qui permet de gérer ces systèmes d'une manière à éviter les risques.

Parmi les systèmes du trafic aérien qui ont une capacité limitée ; le système aéroportuaire, sans influence sur la croissance du trafic aérien est majeur car il relie entre le mouvement au sol et dans l'air.

La capacité aéroportuaire est influencée par plusieurs facteurs et afin de manipuler tous les sous-systèmes limitant la capacité il faudra investir en matière de planification, de réalisation et de développement.



**Chapitre 3 :**

**L'aéroport de Constantine**

**Mohamed Boudiaf**

### 3.1. Introduction :

La présentation de l'aéroport de Constantine comprendra toute les parties constituant l'aéroport : les infrastructures, le système piste, les différents services et les aides à la navigation installées, ainsi qu'un aperçu sur les projets en cours de réalisation afin de mieux se rapprocher de l'étude prévue.

### 3.2. Présentation de l'aéroport :

L'Aéroport de Constantine, dénommé « Mohamed BOUDIAF », est un aéroport civil international, situé sur le plateau d'Ain El Bey à 12 KM du centre-ville de Constantine. En plus du trafic civil, l'aéroport accueille les avions de transport militaire. Il a été construit en 1943, depuis il a subi certains renforcements, aménagement et extensions.

Parmi les plus importantes opérations réalisées à partir de 1999 :

- Construction d'une nouvelle piste de 3 000m x 45m.
- Taxiway de 1700m x 45m.
- Extension du parking avion et de l'aérogare passagers.

Une nouvelle aérogare réalisée en 2013, d'une superficie de 16 200 m<sup>2</sup> sur deux niveaux, destinée à traiter un flux de 1 200 000 passagers/an, et offrant plusieurs espaces à usage administratif et commercial.



**Figure 3-1:** La nouvelle aérogare de l'aéroport de Constantine.



**Figure 3-2:** L'ancienne aérogare de Constantine

L'Aéroport de Constantine est accessible par : Bus, Taxi et Tramway jusqu'à la cité Zouaghi.

### **3.3. Caractéristiques Techniques de l'aéroport de Constantine :**

- Aérodrome : MOHAMED BOUDIAF - CONSTANTINE.
- Code / OASI : DABC.
- IATA : CZL.
- Classification : Classe A International.
- Statut : International.
- Superficie de la zone aéroportuaire : 458 HA 20 ARE et 24 CA.
- Distance Aéroport – Ville : 12 KM.
- Altitude : 706 Mètres par rapport au niveau de la mer au seuil 34.
- Coordonnées géographiques : Latitude 36 14 12 N – Longitude : 000 37 18 E.
- Date d'ouverture à la CAP : 1960.
- Heure de vacation : H/24.
- Catégorie SSLI : 8.
- Accessibilité : Bus (Aéroport – Centre Ville), Taxi.



**Figure 3-3:** L'aéroport de Constantine Mohamed BOUDIAF.

### **3.4. Caractéristiques Techniques de l'aérodrome de Constantine :**

Le plan de l'aérodrome de Constantine est représenté par la figure 3-4 ci-dessous:

ARP : 36° 17' 07" N 006° 37' 09" E  
ALT. AD : 706 M

TWR : 118.3-119.7(s)
SOL : 121.9
APP : 120.1

AD

Piste	DIRECTION	THR	FORCE PORTANTE
14	136°	361704.08 N 00638 53.34E	PCN 54/F/C/W/T
32	316°	361607.98N 0063800.02 E	
16	159°	361716.9N 0063638.4 E	PCN 93/F/D/W/T
34	339°	361546 N 0063721 E	

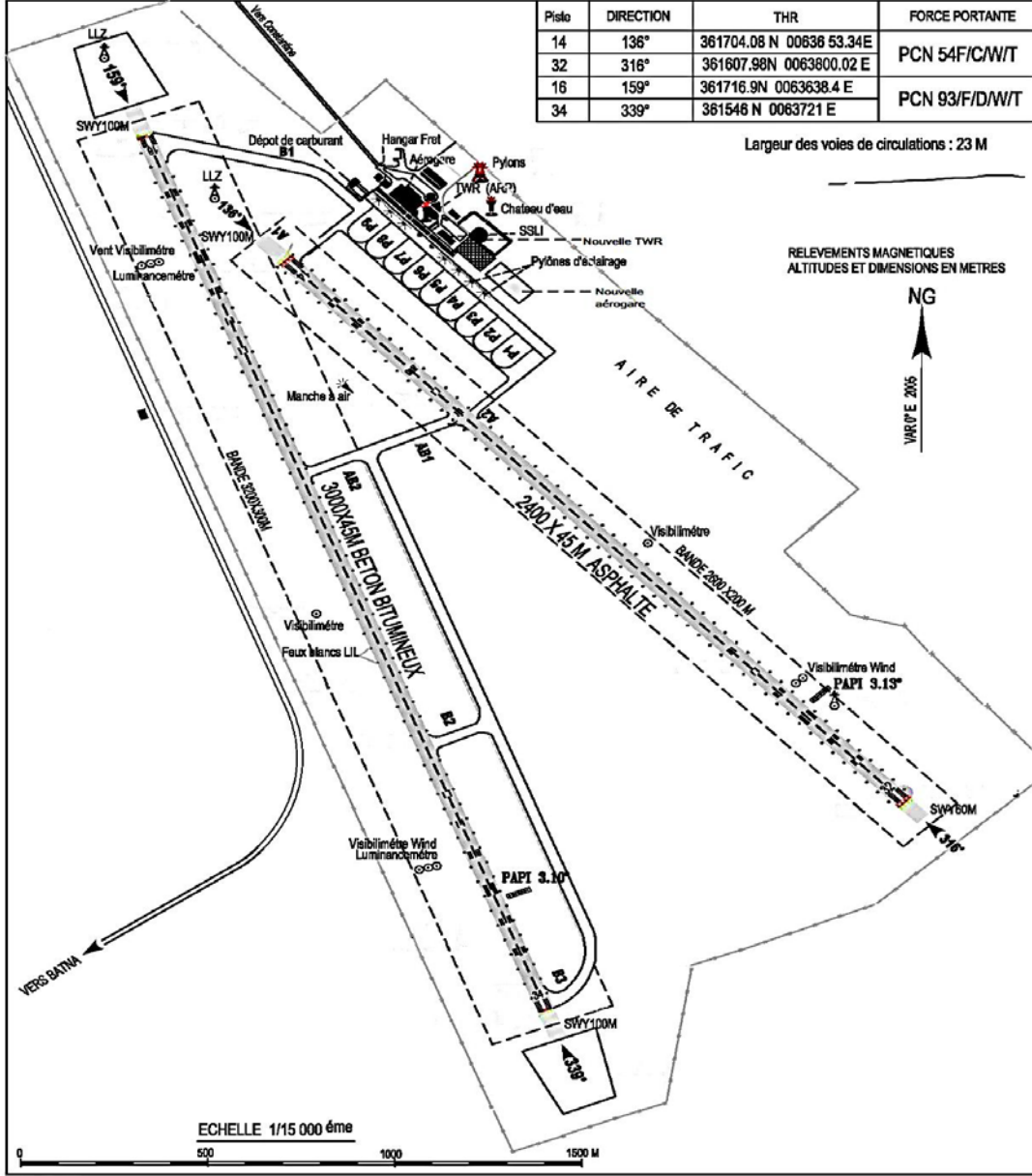


Figure 3-4: Plan de l'aérodrome de Constantine.

### **3.4.1. Les principales parties du système piste de l'aérodrome :**

#### **3.4.1.1. Les pistes :**

- La piste principale : Elle a 3000 mètres de longueur et 45 mètres de largeur, elle est réalisée en béton bitumineux ce qui lui donne une grande force portante (PCN=93), le premier seuil de la piste est dirigé à 159° et il est marqué 16 ce qui fait que le deuxième seuil est dirigé à 339° et il est marqué 34.

NB : Le seuil 16 se trouve à 339°, il est marqué 16 car la route de l'aéronef se termine à 159° par rapport au nord vrai (0°).

- La piste secondaire : Elle a 2400 mètres de longueur et 45 mètres de largeur, elle est réalisée en Asphalte, sa force portante est moins importante que celle de la principale (PCN=54), le premier seuil de la piste est dirigé à 136° et il est marqué 14, donc le deuxième est dirigé à 316° et il est marqué 32. La piste possède une raquette du côté de seuil 32 afin que l'aéronef puisse faire un demi-tour lors du décollage depuis la 32 en raison d'absence de l'entrée d'une voie de circulation.

Le balisage des pistes est un moyen d'aide à la navigation, il comprend les feux de bord, les feux d'extrémité et les feux de seuils de pistes.

Le balisage de bord de piste est constitué par des feux de couleur blanche (rouge face à l'atterrissage en amont d'un seuil décalé) régulièrement espacés de 60 m sur deux alignements implantés à moins de 3 m de chacun des deux bords latéraux de la piste,

Un balisage d'extrémité de piste comprenant six feux directionnels de couleur rouge disposés perpendiculairement à l'axe de la piste à une distance de 3 m au plus au-delà de l'extrémité opposée au seuil d'atterrissage,

Un balisage de seuil de piste comprenant six feux directionnels de couleur verte qui, en l'absence de décalage de seuil, se confondent avec les feux d'extrémité correspondant à l'utilisation de la piste dans le sens opposé. Dans le cas d'un seuil décalé, ce balisage de seuil doit ou bien être composé de feux encastrés ou bien se voir substitué deux barres de flanc composées chacune de 5 feux répartis perpendiculairement à l'axe de la piste sur au moins 10m au-delà du bord de piste.

### 3.4.1.2. Les voies de circulation :

Les voies de circulation de l'aérodrome de Constantine ont une largeur de 23 mètres, elles sont réalisées en béton bitumineux (PCN=93) ce qui assure le déplacement des aéronefs qui utilisent la piste principale et qui nécessitent une grande résistance du sol.

Le Marquage des pistes et des voies de circulation contient : les Marques de seuils, les Marques axiales de piste, les Marques de distances constantes, les Marques d'identification de QFU, les Marques de bord de piste, les Marques TDZ, et les marques axiales des voies de circulation.

### 3.4.1.3. Le parking avions :

Le parking avions contient neuf poste de stationnement séparés avec des traits jaunes, il contient ainsi une aire d'atterrissage d'hélicoptères.



**Figure 3-5:** Vue de l'aérodrome de Constantine.

3.4.2. Les aides de radionavigation et d'atterrissage :

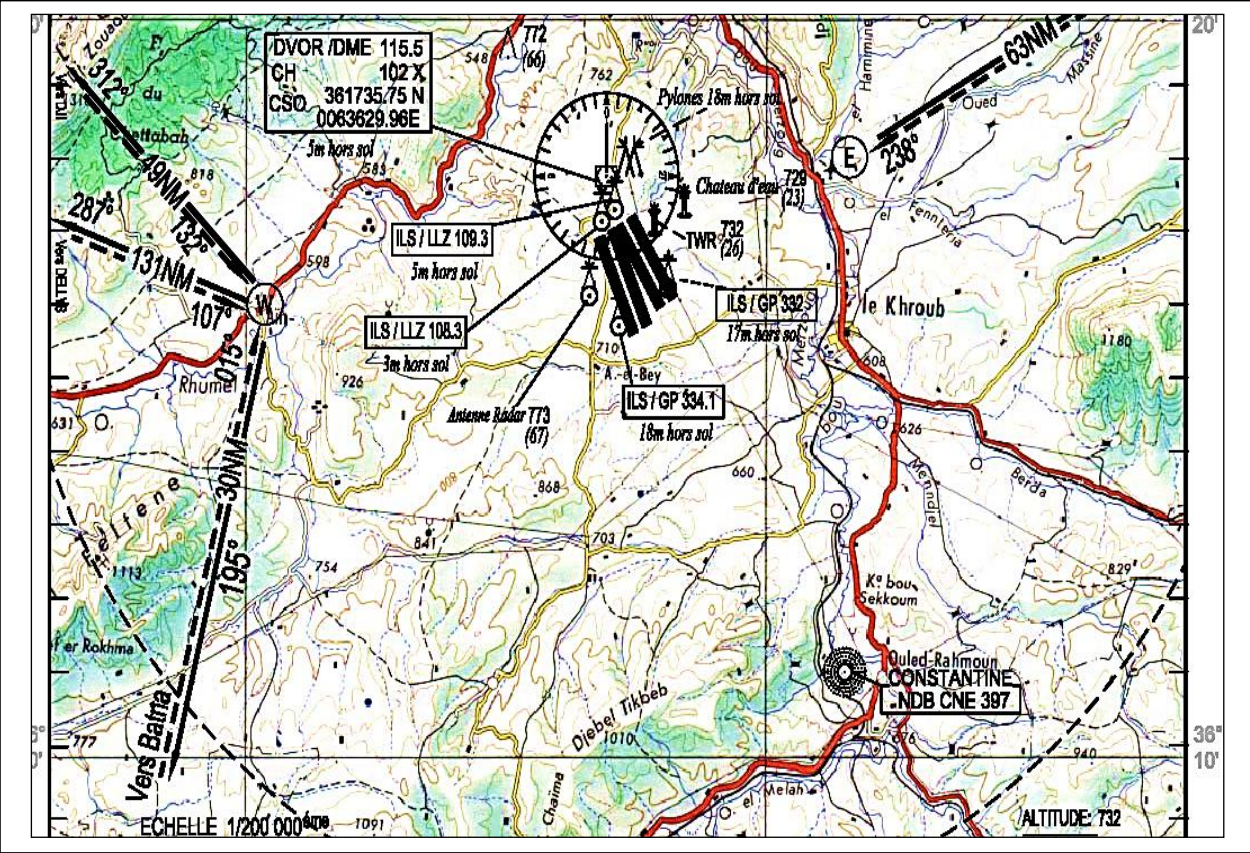


Figure 3-6: Emplacement des instruments de radionavigation de l'aérodrome de Constantine.



Type d'aide CAT d'ILS/MLS (pour VOR/ILS/MLS indiquer (déclinaison))	Identification	Fréquences	Heures de fonctionnement	Coordonnées de l'emplacement de l'antenne d'émission	Altitude de l'antenne d'émission DME	Observations
1	2	3	4	5	6	7
DVOR/DME (0°E 2005)	CSO	115.5 Mhz CH 102 X	H 24	361735.75N0063629.96E		
NDB	CNE	397 Khz	H 24	361125.09N 0064337.83E		50 NM
LLZ32/ILS CAT I (0° E 2005)	CT	109.3 Mhz	H 24	361710.09N 0063645.50E		285 M THR 14
GP 32		332 Mhz	H 24	361619.51N 0063753.27E		336°/ 370 M/THR 32
OM	2 traits/sec	75 Mhz	H 24	361325.46N 0064112.55E		136°/ 3.75 NM THR32
LLZ34/ILS CAT I (0° E 2005)	CS	108.3 Mhz	H 24	361725.34N0063635.00E		
GP 34		334.1 Mhz	H 24	361553.42N 0063712.98E		
DME/P	CS	CH 20X	H 24	361553.42N 0063712.98E		

**Tableau 3-1:** Les instruments de radionavigation de l'aérodrome de Constantine.

### 3.4.2.1. Principe de fonctionnement des instruments :

- **Le VOR :** (VHF Omnidirectional Range) est un système de positionnement radioélectrique utilisé en navigation aérienne, avec les fréquences de la bande VHF, Un récepteur de navigation VOR permet de déterminer le relèvement magnétique d'un aéronef par rapport à

une station radioélectrique au sol (balise émetteur VOR), dont la position est connue. Le relèvement magnétique d'un aéronef par rapport à un VOR s'exprime par le rayon issu du VOR, sur lequel l'aéronef se trouve. Chaque rayon issu de la balise est appelé un RADIAL.

- **Le NDB** : est une balise radio, non directionnelle. C'est à dire, que l'émetteur au sol émet le même signal, avec la même force, dans toutes les directions. Pour pouvoir connaître la direction vers laquelle se trouve un NDB, il faut que l'aéronef soit équipé d'un ADF (Automatic Direction Finder) qui n'est autre qu'un système de réception utilisant les principes de la radiogoniométrie.
- **L'ILS** : (Instrument Landing System) est un système automatique d'aide à l'atterrissage. Il permet une approche de précision compatibles avec des conditions météorologiques dégradées, en offrant un guidage dans les plans vertical et horizontal jusqu'au seuil.

L'ILS comprend :

- ✓ Un système de guidage horizontal appelé **LOCALIZER**.
- ✓ Un système de guidage vertical appelé **GLIDE**.

Le **LOCALIZER** fournit les informations de guidage dans le plan horizontal. Ce dernier émet, grâce à un réseau d'antennes directrices situées dans le prolongement de la piste, un faisceau radioélectrique permettant de fournir au pilote une indication d'écart horizontal par rapport à l'axe de piste.

Le **GLIDE** fournit au pilote une information d'écart par rapport au plan de descente. Il émet des faisceaux radioélectriques dans le prolongement de l'axe de piste permettant de fournir au pilote une indication d'écart vertical par rapport à la pente de descente nominale.

- **LE DME** : Il permet de mesurer la distance qui sépare un aéronef d'une balise au sol en chronométrant le temps que met une impulsion radioélectrique UHF pour faire le trajet aller et retour entre l'avion et la station sol. Cette distance est une distance oblique et non réelle. Donc lorsque l'aéronef survole la verticale de la station sol l'instrument à bord indique la hauteur de l'aéronef.

La portée d'un DME est une portée optique soit environ 200Nm et sa précision est d'environ 0,25 Nm soit (+/- 0,25 % de la distance).

- **Les MARKER :** sont des radiobalises à rayonnement vertical, implantées tout le long de l'axe d'approche, à des distances variables du seuil. Les émissions des Marker forment des cônes d'émission verticaux étroits Leur rôle est de renseigner le pilote du passage de l'appareil à leur verticale et ainsi de corrélérer le plan de descente.

### 3.4.3. Espace aérien ATS :

1	Désignation et limites laterals	CONSTANTINE CTR Cercle de 10 NM de rayon centré sur DVOR/DME(361735.75N0063629.96E)
2	Limites verticals	450 M GND
3	Classification de l'espace aérien	D
4	Indicatif d'appel et langues de l'organe ATS	Constantine TWR et APP, Fr. En
5	Altitude de transition	1920 M
6	Observations	Néant.

**Tableau 3-2:** L'espace aérien ATS de l'aérodrome de Constantine.

### 3.4.4. Installations de télécommunications des services de la circulation aérienne :

Désignation du service.	Indicatif d'appel	Fréquences	Heures de fonctionnement	Observations
1	2	3	4	5
TWR	Constantine TWR	118.3 Mhz-119.7 Mhz (s)	H 24	Néant
APP	Constantine APP	102.1 Mhz	H 24	Néant
SOL	Constantine SOL	121.9 Mhz	H 24	-

**Tableau 3-3:** Les installations de télécommunication de l'aérodrome de Constantine.

### 3.4.5. Renseignements météorologiques :

1	Centre météorologique associé à l'aérodrome	Centre régional météorologique de CONSTANTINE.
2	Heures de service Centre météorologique responsable en dehors de ces heures	H 24 Centre régional météorologique de CONSTANTINE.
3	Centre responsable de la préparation des TAF et périodes de validité des prévisions	Centre national de prévision et d'assistance TAFOR 0024 0606 1212 1818 TAF 0009 0312 0615 0918 1221 1524 1803 2106
4	Types de prévisions d'atterrissage disponibles et intervalle de publication	METAR – SPECI
5	Exposés verbaux / Consultations assurés	P – T – D – TV
6	Documentation de vol et langue (s) utilisée(s) dans cette documentation	C – CR – PL – TB (fr)
7	Cartes et autres renseignements disponibles pour les exposés verbaux ou la consultation	S – U – P – W – T – SWH – SWM – SWL
8	Equipement complémentaire de renseignement	WXR - APT Station météorologique automatique (capteurs de vent, visibilimètre et luminancemètre).
9	Organes ATS auxquels sont fournis les renseignements	TWR, APP
10	Renseignements supplémentaires (limitation du service, etc. )	Néant

**Tableau 3-4:** Les renseignements météorologiques fournis à l'aérodrome de Constantine.

### 3.4.6. Les obstacles de l'aérodrome de Constantine :

Les obstacles autour de l'aérodrome de Constantine sont d'une hauteur importante, par conséquent, le mouvement des aéronefs est plus difficile. Les obstacles sont un facteur qui affecte la capacité.

Présentation des obstacles de l'aérodrome de Constantine :

3.4.6.1. Les obstacles de l'aérodrome - piste 14 - :

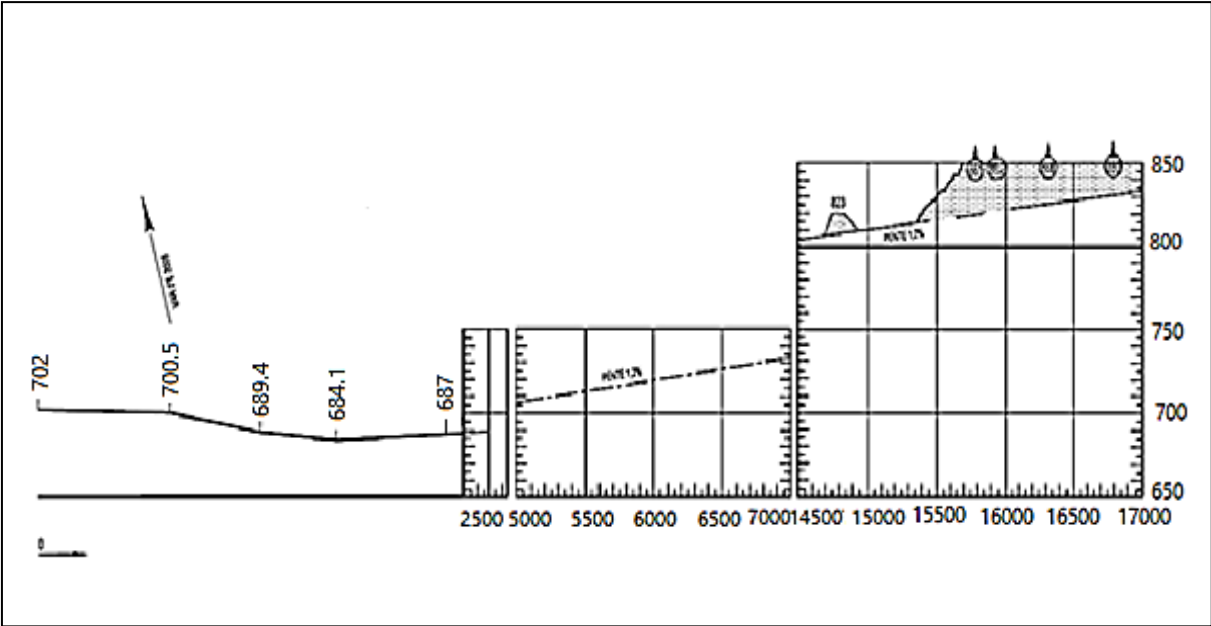


Figure 3-7: Hauteur des obstacles -piste 14-

3.4.6.2. Les obstacles de l'aérodrome - piste 32 - :

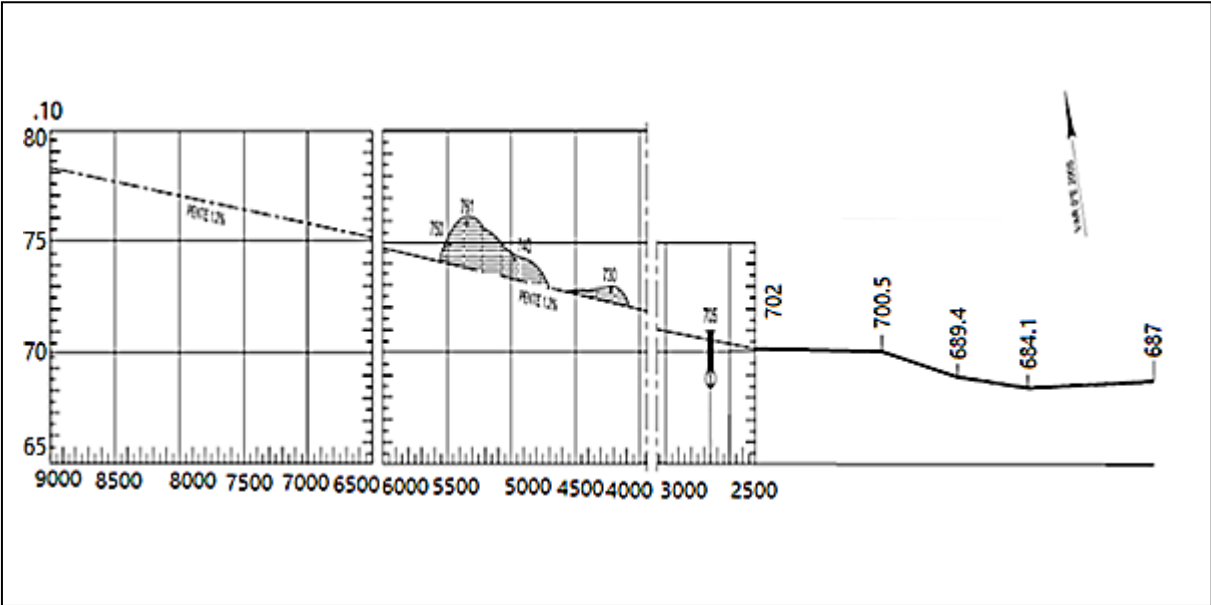
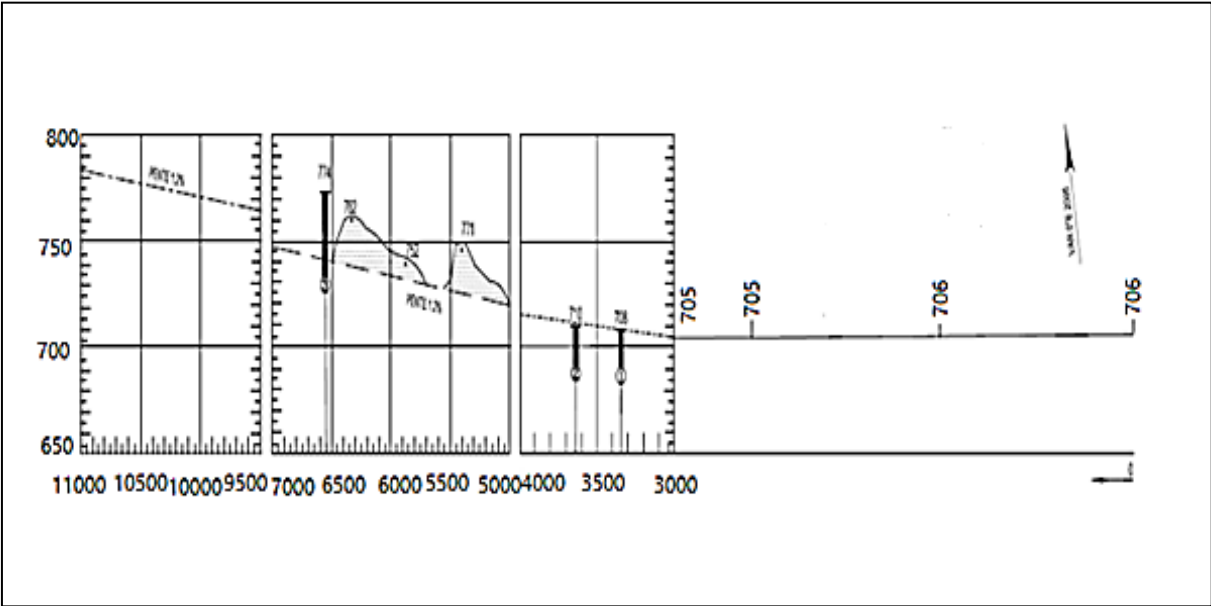


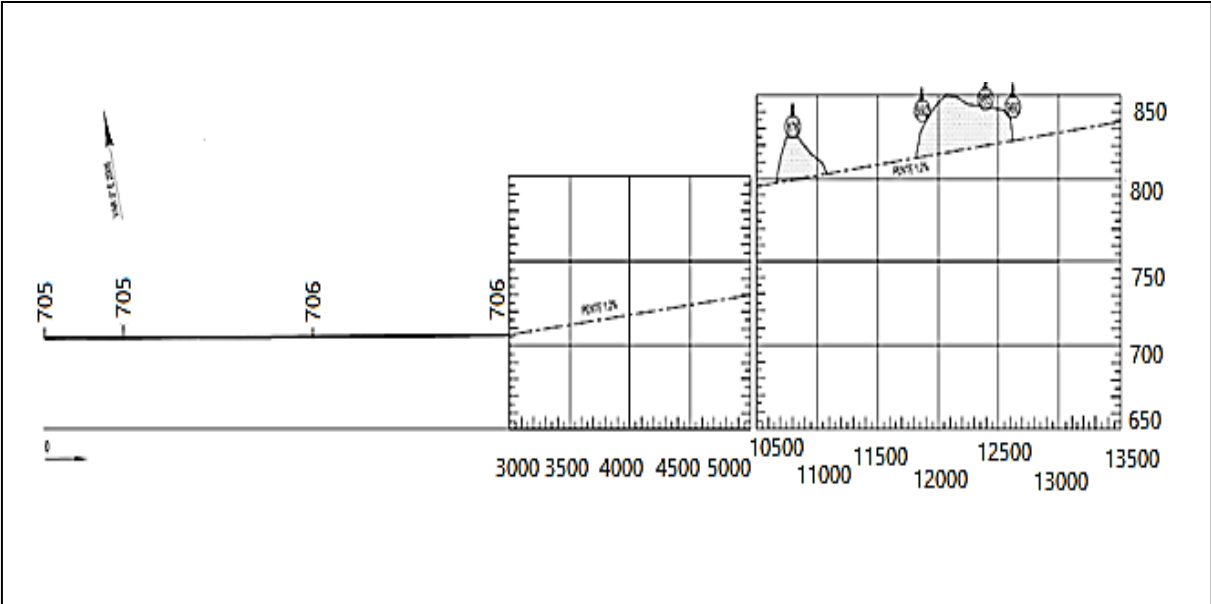
Figure 3-8: Hauteur des obstacles - piste 32 -

**3.4.6.3. Les obstacles de l'aérodrome - piste 34 - :**



**Figure 3-9:** Hauteur des obstacles – piste 34 –

**3.4.6.4. Les obstacles de l'aérodrome - piste 16 - :**



**Figure 3-10:** Hauteur des obstacles - piste 16 –

D'après la hauteur des obstacles autour de l'aérodrome de Constantine, ce dernier est classé parmi les plus difficiles au monde.

### 3.5. Projets en cours à l'aérodrome de Constantine :

Les travaux de réalisation d'une nouvelle tour de contrôle aux normes internationales ont été lancés au niveau de l'aéroport international Mohamed Boudiaf, Cette nouvelle structure aéroportuaire, s'inscrit dans le cadre du projet de développement et de modernisation de la gestion de l'espace aérien national, décidé pour les aérodromes Alger, Oran, Constantine, Ghardaïa et Tamanrasset.

La nouvelle tour, d'une hauteur de 45 mètres avec salle technique de trois niveaux sur une superficie de plus de 2.622 m<sup>2</sup>, permettra d'améliorer les conditions de travail des aiguilleurs du ciel.



**Figure 3-11:** Maquette de la nouvelle tour de contrôle de l'aéroport de Constantine.

La nouvelle salle d'approche et l'installation de nouveaux équipements ATC de contrôle de la navigation aérienne.

**Chapitre 4 :**

**Etude et calcul de la capacité  
de l'aérodrome de  
Constantine**



## **4.1. Introduction :**

L'estimation de la capacité maximale des mouvements d'aéronefs qu'un aéroport puisse traiter dans l'unité de temps est une étude importante qui permet de connaître la demande de trafic pouvant être traité sans atteindre la saturation. Une méthode d'approche analytique reconnue utilisée pour évaluer la capacité de piste, va être appliquée sur l'aéroport de Constantine Mohamed Boudiaf. Les données utilisées seront basées sur la journée la plus saturée de l'année.

## **4.2. Méthodologie mise en œuvre pour la capacité piste :**

Une méthode inspirée de celle du Dr. Antonio A. Trani va être élaborée pour l'évaluation de la capacité de piste, c'est une approche par manipulation d'un modèle mathématique ou une approche analytique.

La capacité théorique maximale est définie comme le nombre maximal de mouvements par unité de temps admissible sur une infrastructure donnée, avec une structure de trafic donnée, en appliquant systématiquement les séparations minimales et dans les conditions d'exploitation optimales (notamment les conditions météorologiques). Cette valeur de capacité est un maximum théorique qui ne tient pas compte de paramètres tels que les facteurs humains (précision dans la tenue de vitesses d'approche, durée des délivrances et collationnements d'autorisations du contrôleur aérien, temps de réaction des pilotes et des contrôleurs, etc.) et les marges de sécurité opérationnelles appliquées par le contrôle aérien afin d'assurer le respect des minima réglementaires malgré les aléas.

Le principe du calcul de capacité piste théorique maximale mis en œuvre est le suivant :

- Calcul des séparations minimales à appliquer entre deux mouvements (c'est-à-dire calculer la séparation temporelle minimale entre un départ d'un avion de la catégorie 4 et une arrivée d'un avion de la catégorie 1, la séparation temporelle minimale entre un départ de la catégorie 3 et un départ de la catégorie 4, entre deux arrivées de la catégorie 2, etc.). Ces séparations minimales sont calculées à partir des données géométriques du système de piste, des procédures de navigation aérienne et des performances des avions ;
- Calcul des probabilités d'occurrence de chaque couple d'avions successifs (c'est-à-dire calculer la probabilité qu'un départ d'un avion de la catégorie 4 et une arrivée d'un avion de

la catégorie 1 se suivent, la probabilité qu'un départ de la catégorie 3 et un départ de la catégorie 4 se suivent, la probabilité que deux arrivées de la catégorie 2 se suivent, etc.). Ces probabilités sont calculées à partir de la structure du trafic (la proportion d'avions de chaque catégorie) ;

- Calcul de la séparation minimale moyenne entre deux avions. Il s'agit de la moyenne des valeurs de séparations temporelles calculées lors de la première étape, pondérée par les probabilités calculées à la deuxième étape. La capacité théorique est alors obtenue en mouvements par heure en divisant une heure par la séparation minimale moyenne calculée.

### **4.3. Analyse de l'existant :**

- Trafic mis à l'étude correspondant à la journée du 23 août 2016. Cette journée détaillée comporte 36 arrivées et 35 départs.

Ces données de trafic contiennent les horaires de départs et des d'arrivées des avions, ainsi que leur type (A320, ATR72, etc.), permettant ainsi la détermination des besoins en postes de stationnement ainsi qu'en infrastructure du système de piste.

- L'utilisation des bretelles de sortie de piste pour le scénario d'infrastructure actuelle, les bretelles sont utilisées suivant le QFU, pour les calculs, il est considéré que pour la piste (16/34) tous les avions stationnés empruntent les bretelles de sortie droite AB2, ainsi que pour la piste (14/32) tous les avions stationnés empruntent les bretelles de sortie droite A2.

- L'utilisation des postes de stationnement :

Dans le cas du scénario d'infrastructure actuelle, les postes de stationnement sont utilisés conformément aux informations figurant sur le manuel d'exploitation des postes de stationnement du gestionnaire de l'infrastructure. Lors de l'affectation des postes de stationnement, les avions sont préférentiellement placés au contact du terminal. Les postes de stationnement situés au large sont utilisés lorsque l'offre de stationnement au contact du terminal ne suffit plus à accueillir la demande de trafic.

- Concernant la performance des avions, ils sont classés par catégories de performances et de masse maximale au décollage :

Les catégories des avions sont :

**Catégorie 1** : Avions dont la masse est inférieure à 7 tonnes (léger),

**Catégorie 2** : Avions dont la masse est comprise entre 7 et 40 tonnes (moyen),

**Catégorie 3** : Avions dont la masse est comprise entre 40 et 136 tonnes (moyen),

**Catégorie 4** : Avions dont la masse est supérieure à 136 tonnes, (lourd).

- Les départs se font systématiquement du seuil de piste.

- Les avions ne sont considérés qu'à partir de l'approche finale pour les arrivées et jusqu'à la fin de la montée initiale pour les départs.

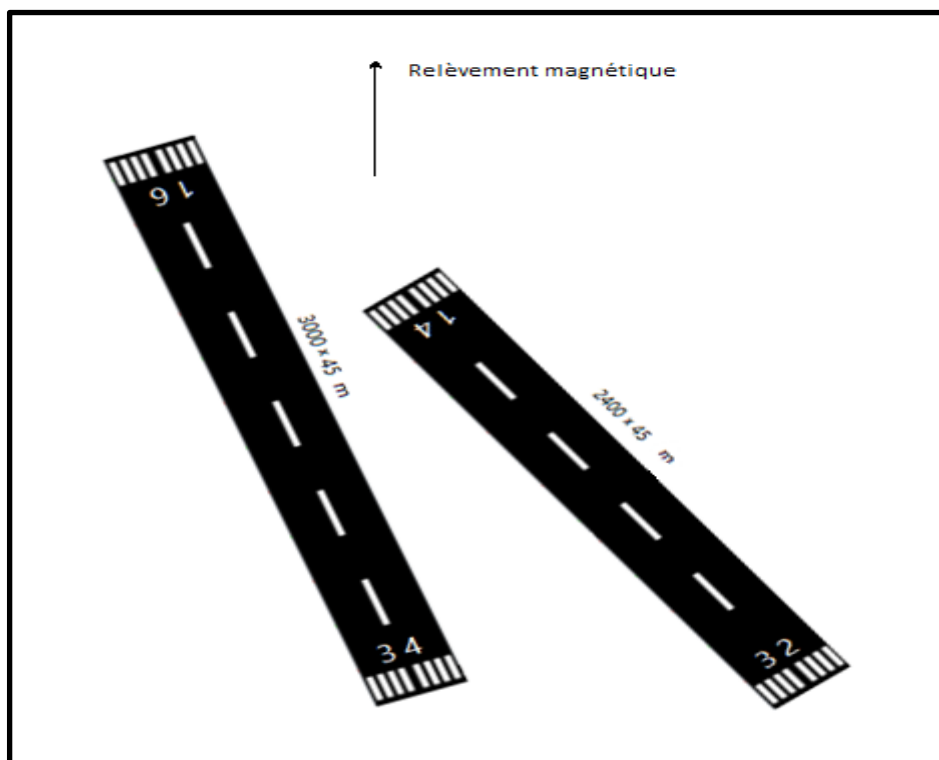
#### **4.3.1. Scénario étudiés :**

➤ **Piste 16/34 :**

C'est une piste desservie par un ILS jusqu'à la surface de la piste et le long de cette surface, en général c'est la piste principale et la plus fréquente.

➤ **Piste 14/32 :**

C'est une piste desservie par un ILS et destinée à l'approche avec une hauteur de décision inférieure à 60 m mais aussi au moins égale à 30 m, et une portée visuelle de piste au moins égale à 350 m.



**Figure 4-1:** Les pistes de l'aérodrome de Constantine.

#### 4.3.2. Valeur caractéristique des vitesses d'approche :

Ce sont les vitesses moyennes sur la trajectoire d'approche finale à prendre en compte des différents types d'aéronefs. Ces valeurs peuvent être extraites des manuels de vol ou d'exploitation.

On a pour valeurs :

Type d'avions	Catégorie A	Catégorie B	Catégorie C	Catégorie D
Vitesse d'approche en finale (Kts)	90	108	138	158

**Tableau 4-1:** type d'aéronef et leur vitesse moyenne en finale

#### 4.3.3. Les minima d'espacement entre deux arrivées dus aux turbulences de sillage :

Les minima d'espacement entre deux arrivées dus aux turbulences de sillage sont exprimés dans le tableau ci-dessous:

Avion suiveur Avion de tête	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Type 1	(*)	(*)	(*)	(*)
Type 2	4Nm	3 Nm	3 Nm	(*)
Type 3	4 Nm	3 Nm	3 Nm	(*)
Type 4	6 Nm	5Nm	5 Nm	4 Nm

**Tableau 4-2:** Minima d'espacement entre deux arrivées dus aux turbulences de sillage.

#### 4. 3.4. Minima d'espacement entre deux départs dus aux turbulences de sillage par unité de temps :

Les minima d'espacement entre deux départs dus aux turbulences de sillage sont exprimés dans le tableau ci-dessous:

Avion suiveur Avion de tête	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Type 1	(*)	(*)	(*)	(*)
Type 2	120 (180s)	120 (180s)	120 (180s)	(*)
Type 3	120 (180s)	120 (180s)	120 (180s)	(*)
Type 4	120 (180s)	120 (180s)	120 (180s)	120 (180s)

**Tableau 4-3:** Minima d'espacement entre deux arrivées dus aux turbulences de sillage.

#### 4.4. Temps d'occupation de piste :

##### 4.4.1. TOP départ :

Une fois l'aéronef franchi l'extrémité de piste en service ou amorce un virage, une autorisation de décollage est donné à l'avion suivant.

Le temps d'occupation peut être calculé par la méthode suivante :

##### ❖ Hypothèse :

- Accélération constante, vitesse variant de  $V_0$  à la vitesse de décollage sur une distance égale à la distance de décollage.
- Survol jusqu'à l'extrémité de piste.

- Virage après décollage.

On a :

Le temps mis par un aéronef pour passer de la vitesse  $V_1$  à la vitesse  $V_2$  avec une accélération constante sur une distance  $D$  :

$$T_1 = 4D / (V_1 + V_2) \quad (4.1)$$

Le temps mis par un aéronef pour parcourir une distance  $D$  à une vitesse  $V$  :

$$T_2 = 2D / V \quad (4.2)$$

Formulation :

- Décollage dans l'axe de piste :  $TOP = 4 Dd / Vd + 2 (L - Dd) / Vd$  (4.3)

- Virage dégagement avant l'extrémité de piste :  $TOP = 4 Dd / Vd + Tdv$  (4.4)

Avec :

**Dd** : Distance de décollage en (mètre).

**Vd** : Vitesse de décollage en ( Kts).

**L** : Longueur de piste.

**Tdv**: Temps de dégagement en vol de l'axe de piste.

#### 4.4.2. Application numérique sur les deux pistes de l'aérodrome de Constantine :

$L = 3000$  m (piste 16/34),  $L = 2400$  m (piste 14/32).

$Tvd = 30$  secondes ; distance de décollage prise par le manuel d'identification des avions.

- 1<sup>er</sup> cas : décollage dans l'axe :  $TOP = (4 Dd / Vd) + (2 (L - Dd) / Vd)$ .

Les vitesses sont converties en (m/s) ) d'où  $1 \text{ Kts} = 0.51 \text{ m/s}$ .

✓ Piste (16/34):

Valeur Type d'avion	Dd (m)	Vd (Kts)	TOP (s)
Catégorie A	800	100	149
Catégorie B	1290	130	129
Catégorie C	2494	160	135
Catégorie D	2700	170	131

Tableau 4-4: TOP pour décollage dans l'axe piste (16/34).

✓ Piste (14/32):

Valeur Type d'avion	Dd (m)	Vd (Kts)	TOP (s)
Catégorie A	800	100	125
Catégorie B	1290	130	111

Tableau 4-5: TOP pour décollage dans l'axe piste (14/32).

- 2<sup>ème</sup> cas virage de dégagement avant extrémité de piste :  $TOP = 4 Dd / Vd + Tdv$

Valeur Type d'avion	Dd (m)	Vd (Kts)	Tvd (s)	TOP (s)
Catégorie A	800	100	30	93
Catégorie B	1290	130	30	108
Catégorie C	2494	160	30	152
Catégorie D	2700	170	*	*

Tableau 4-6: TOP avec virage de dégagement avant extrémité de piste.

#### 4.4.3. TOP arrivée :

Une autorisation d'atterrissage ne peut être délivrée à un aéronef si l'aéronef à l'arrivée qui le précède n'a pas dégagé la piste en service, hormis le cas où les espacements peuvent être réduits.

Pour le calcul de TOP, on divisera cette partie en quatre phases :

1. Survol de la piste a décélération constante du seuil a la zone de toucher des roues.
2. Roulage à vitesse constante.
3. Freinage à décélération constante jusqu'à la sortie de piste.
4. Roulage à vitesse constante de l'axe de piste au point de dégagement.

Formulation :

$$TOP = 4DS / (V_s + V_t) + 2D_{st} / V_t + 4(db - D_{st} - D_s) / (V_t + V_s) + 2d_{ag} \cdot \sin(\text{axe, bretelle}) / V_s \quad (4.5)$$

Avec :

**Ds** : distance de vol du seuil jusqu'au point de toucher des roues (mètre).

**Dst** : distance nécessaire à la stabilisation de l'aéronef (mètre).

**db** : distance du seuil à la bretelle de sortie à laquelle l'avion est affecté (mètre).

**Dag** : distance perpendiculaire entre l'axe de piste et le point de dégagement (mètre).

**Sin (axe, bretelle)** : sinus de l'angle entre l'axe de piste et le point de dégagement.

**Vs** : vitesse de passage au seuil d'exploitation (Kts).

**Vt** : vitesse de toucher des roues (Kts).

**VS** : vitesse de sortie (Kts).

**Vr** : vitesse de roulage sur la piste (Kts).

#### 4.4.4. Application sur les pistes de l'aérodrome de Constantine :

La piste principale de l'aérodrome de Constantine a 3000 m de longueur et la piste secondaire a 2400 m, les sorties des deux pistes sont des sorties droites.



✓ **Piste 16/34** : 3 sorties droite (B2, AB2, B1)

Dégagement B2 :

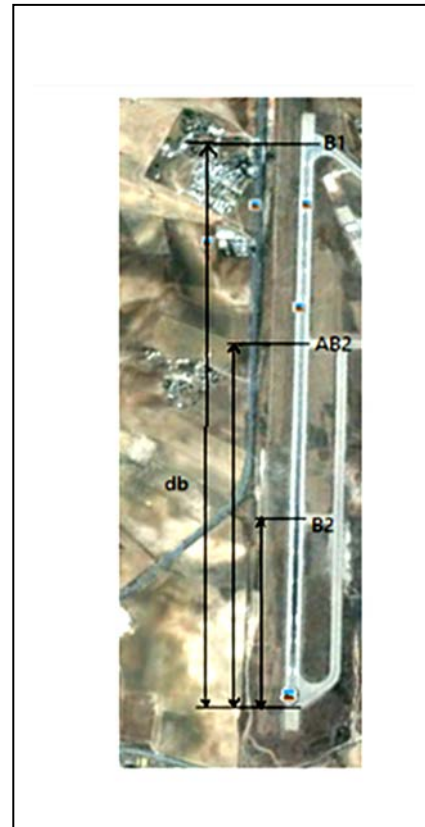
$db = 950 \text{ m}$  ;  $VS = 10 \text{ Kts}$  ;  $\sin(\text{axe, bretelle}) = \sin 90^\circ$

Dégagement AB2 :

$db = 1860 \text{ m}$  ;  $VS = 10 \text{ Kts}$  ;  $\sin(\text{axe, bretelle}) = \sin 90^\circ$

Dégagement B1 :

$db = 2950 \text{ m}$  ;  $VS = 10 \text{ Kts}$  ;  $\sin(\text{axe, bretelle}) = \sin 90^\circ$



**Figure 4-2:** Représentation de db pour la piste principale.

valeur Type d'avion	Ds (m)	Vs (Kts)	Vt (Kts)	Dst (m)	Dag (m)	VS(Kts) et angle°	Vr (Kts)
Cat. A	200	75	70	175	90	10 Kts si sortie droite $\sin 90^\circ$ 55 kts si sortie rapide $\sin 30^\circ$	15
Cat. B	400	100	95	250	90		15
Cat. C	500	135	130	325	90		15
Cat. D	600	145	140	350	140		15

**Tableau 4-7:** Valeurs caractéristiques.

**TOP à l'arrivée pour la piste 16/34 pour chaque type d'avion :**

Valeur Type d'avion	TOP B2 (s)	TOP AB2 (s)	TOP B1 (s)
Cat. A	95	184	291
Cat. B	67	67	216
Cat. C	50	100	162
Cat. D	54	102	159

**Tableau 4-8:** TOP arrivée pour la piste 16/34.

✓ **Piste 14/32 :**

2 sorties droites, A1 et A2

Dégagement A2 :

$db = 1700 \text{ m}$  ;  $V_s = 10 \text{ Kts}$  ;  $\sin(\text{axe, bretelle}) = \sin 90^\circ$

Dégagement A1 :

$db = 2380 \text{ m}$  ;  $V_s = 10 \text{ Kts}$  ;  $\sin(\text{axe, bretelle}) = \sin 90^\circ$



**Figure 4-3:** Représentation de db pour la piste secondaire.

Valeur Type d'avion	Ds (m)	Vs (Kts)	Vt (Kts)	Dst (m)	Dag (m)	VS(Kts) et angle°	Vr (Kts)
<b>Cat. A</b>	200	75	70	175	90	- 10 Kts si sortie droite sin 90°. - 55 kts si sortie rapide sin 30°.	15
<b>Cat. B</b>	400	100	95	250	90		15
<b>Cat. C</b>	500	135	130	325	90		15
<b>Cat. D</b>	600	145	140	350	140		15

**Tableau 4-9:** Valeurs caractéristiques.

**TOP à l'arrivée pour la piste 14/32 pour chaque type d'avion :**

Valeur Type d'avion	TOP A2 (s)	TOP A1 (s)
<b>Cat. A</b>	168	235
<b>Cat. B</b>	123	174

**Tableau 4-10:** TOP à l'arrivée piste 14/32.

## 4.5. Calcul des cadences élémentaires à partir des procédures :

### 4.5.1. Arrivée-arrivée :

La cadence élémentaire arrivée-arrivée est la durée entre deux passages successifs au seuil de la piste, elle est représentée par la matrice :

$A = [a_{ij}]$  en secondes = espacement minimal de deux arrivées de type i et j au seuil de la piste.

**1<sup>er</sup> cas : l'avion suiveur rattrape l'avion en tête :  $V_{ai} < V_{aj}$**

$V_{ai}$  (Kts) = Vitesse moyenne sur une trajectoire d'approche finale de l'avion de type i/j.

**Mij :** L'espacement minimal qui peut être appliqué au seuil de piste.

On a :

$$a_{ij} = \text{Max} (3600 * m_{ij} / V_{ai} ; 3600 * LAA / V_{aj} + TOP_i) \quad (4.6)$$

**m<sub>ij</sub>** : max (E, TS<sub>ij</sub>), en Nm.

**E** : espacement longitudinal minimal lié à la qualité de surveillance, en Nm.

**TS<sub>ij</sub>** : espacement longitudinal minimal des avions types i et j dû à la turbulence de sillage, en Nm.

**TOP<sub>i</sub>** : temps d'occupation de piste à l'arrivée par l'avion de type i, en secondes.

**LAA** : distance entre la limite d'autorisation d'atterrir et le seuil.

**2<sup>ème</sup> cas : l'avion de tête est plus rapide que l'avion suiveur : V<sub>ai</sub> > V<sub>aj</sub>**

**V<sub>ai</sub> (Kts)** = Vitesse moyenne sur une trajectoire d'approche finale de l'avion de type i/j.

**M<sub>ij</sub>** : L'espacement minimal qui doit être appliqué dès le début de l'approche final.

On a :

$$a_{ij} = \text{Max} (3600 * m_{ij} / V_{ai} + L_a (1/V_{aj} - 1/V_{ai}) ; 3600 * LAA / V_{aj} + TOP_i) \quad (4.7)$$

Avec :

**m<sub>ij</sub>** : max (E, TS<sub>ij</sub>), en Nm.

**E** : espacement longitudinal minimal lié à la qualité de surveillance, en Nm.

**TS<sub>ij</sub>** : espacement longitudinal minimal des avions types i et j dû à la turbulence de sillage, en Nm.

**L<sub>a</sub>** : longueur de la trajectoire d'approche finale, en Nm.

**TOP<sub>i</sub>** : temps d'occupation de piste à l'arrivée par l'avion de type i, en secondes.

**LAA** : distance entre la limite d'autorisation d'atterrir et le seuil.

#### **4.5.2. Arrivée- Départ :**

La cadence élémentaire entre un avion à l'arrivée et un avion au départ dépend de :

- Temps d'occupation de piste de l'avion en tête (pas d'autorisation de décollage pour l'avion suiveur tant que l'avion en tête n'a pas encore dégagé la piste).

- L'espace minimal dû à la turbulence de sillage, en cas de seuil décalé.

La cadence élémentaire arrivée-départ est représentée par la matrice :

$\mathbf{B} = [b_{aj}]$  en secondes = espace minimal entre une arrivée  $i$  et un départ de type  $j$  au seuil de la piste.

On a :

$$B_{ij} = \max(TOP_i, S_{ij}) \quad (4.8)$$

Avec :

$TOP_i$  : Temps d'occupation de piste à l'arrivée de l'avion de type  $i$ .

$$S_{ij} : \begin{cases} t_{sij} : \text{s'il existe seuil décalé.} \\ 0 \text{ si non} \end{cases}$$

#### 4.5.3. Départ-arrivée :

Les arrivées sont prioritaires à partir d'un point fictif, situé en amont du seuil de piste, qu'on appelle **verrou**. Sa position dépend des catégories d'aéronefs en présence. L'espace minimal appliqué entre un avion au départ et un autre à l'arrivée correspond donc à la distance entre le verrou et le seuil de piste.

La cadence élémentaire départ-arrivée est représentée par la matrice suivante :

$\mathbf{C} = [c_{ij}]$  en secondes = espace minimal entre un avion au départ de type  $i$  et un avion à l'arrivée de type  $j$  au seuil de la piste.

On a :

$$C_{ij} = 3600 * X_{ij} / V_{aj} \quad (4.9)$$

$X_{aj}$  : Distance entre le verrou et le seuil de la piste, en Nm.

$V_{aj}$  : Vitesse moyenne sur la trajectoire d'approche finale de l'avion de queue, en Kts.

#### 4.5.4. Départ-Départ :

La cadence élémentaire départ-départ est présentée par la matrice suivante :

$D = [d_{ij}]$  en secondes = espacement minimal entre deux départ de type i et au seuil de la piste.

$$D_{ij} = \max ( TO_{Pi}, ts_{ij}, e_{ij} ) \quad (4.10)$$

Avec :

$TO_{Pi}$  : Temps d'occupation de la piste au départ d'avion de type i, en seconde.

$ts_{ij}$  : Espacement minimal des avions types i et j dû à la turbulence de sillage, en Nm.

$e_{ij}$  : Autres contraintes d'espacement des avions de type i et j liées à la qualité de surveillance au mode d'espacement vertical longitudinal au routage (divergente ou non).

#### 4.6. Cadence moyenne :

La cadence moyenne représente la durée moyenne entre deux arrivées successives, deux départs successifs, une arrivée et un départ successifs et un départ et une arrivée successifs, elle est calculée pour chaque séquence.

$$\text{- Cadence moyenne arrivée-arrivée} = \bar{A} = {}^tP \cdot A \cdot P \quad (4.11)$$

$$\text{- Cadence moyenne arrivée-départ} = \bar{B} = {}^tP \cdot B \cdot P \quad (4.12)$$

$$\text{- Cadence moyenne départ- arrivée} = \bar{C} = {}^tP \cdot C \cdot P \quad (4.13)$$

$$\text{- Cadence moyenne départ-départ} = \bar{D} = {}^tP \cdot D \cdot P \quad (4.14)$$

Avec :  $P = [P_i]$ =matrice 1\*4 ou  $P_i$  (i=1 à 4) = proportion des avions de type i par rapport au volume total du trafic pour la piste 16/34 et  $P_i$  (i=1 à 2) pour la piste 14/32, cette dernière supporte que les avions des catégories A et B.

${}^tP$  : la matrice transposée de la matrice P.

## 4.7. Application numérique :

### 4.7.1. Calcul des cadences élémentaires :

Pour le calcul des cadences élémentaire. On prend le cas le plus échéant, c.-à-d., lorsqu'un avion atterrit il dégage par la sortie droite AB2 pour QFU 16, et par la sortie droite A2 pour QFU 14.

Et un espacement longitudinal minimal de 7 Nm (surveillance radar).

En utilisant le tableau des vitesses d'approche finale suivant:

Type d'avions	Catégorie A	Catégorie B	Catégorie C	Catégorie D
Vitesse d'approche en finale (Kts)	90	108	138	158
TOP AB2	184	67	100	102

**Tableau 4-11:** Vitesses moyennes en final (Kts) et TOP QFU 16.

Type d'avions	Catégorie A	Catégorie B
Vitesse d'approche en finale (Kts)	90	108
TOP A2	168	123

**Tableau 4-12:** Vitesses moyennes en final (Kts) et TOP QFU 14.

On a LAA= 7 Nm et La= 15Nm.

#### A- Arrivée-Arrivée :

**1<sup>er</sup> cas :** l'avion suiveur rattrape l'avion en tête :  $V_{ai} < V_{aj}$

$$a_{ij} = \text{Max} (3600 * m_{ij} / V_{ai} ; 3600 * LAA / V_{aj} + TOP_i) \quad (4.6)$$

**2<sup>ème</sup> cas :** l'avion de tête est plus rapide que l'avion suiveur :  $V_{ai} > V_{aj}$

$$a_{ij} = \text{Max} (3600 * m_{ij} / V_{ai} + La(1/V_{aj} - 1/V_{ai}) ; 3600 * LAA / V_{aj} + TOP_i) \quad (4.7)$$

✓ Construction de la matrice A [a<sub>ij</sub>]:

On prend un exemple [a<sub>3,4</sub>] (QFU 16) pour montrer le calcul et on remplira la matrice avec les mêmes étapes:

$V_{a_3} = 138 \text{ Kts}$ ,  $V_{a_4} = 158 \text{ Kts}$  donc:  $V_{a_3} < V_{a_4}$ .

$$a_{3,4} = \text{Max} (3600 * m_{3,4} / V_{a_3} ; 3600 * \text{LAA} / V_{a_4} + \text{TOP3}) \quad (4.6)$$

$m_{3,4}$  : 7 Nm surveillance radar.

**TOP3:** 100 s.

**LAA:** 7 Nm.

Application numérique:

$$a_{3,4} = \text{Max} (3600 * 7 / 138 ; 3600 * 7 / 158 + 100); \quad a_{3,4} = \text{Max} (183, 259); \quad a_{3,4} = 259 \text{ s.}$$

**B- Arrivée-Départ :**

$$B_{ij} = \max (\text{TOP}_i, S_{ij}) \quad (4.8)$$

✓  $S_{ij} = 0$  pas de seuil décalé.

Alors:

$$B_{ij} = \text{TOP}_i \quad (4.15)$$

**C- Départ-Arrivée:**

$$C_{ij} = 3600 * X_{ij} / V_{aj} \quad (4.9)$$

**Piste 16/34:** Le verrou se trouve à une distance de  $X_{ij} = 7 \text{ Nm}$  pour n'importe quel type d'appareil.

**Piste 14/32:** Le verrou se trouve à une distance de  $X_{ij} = 7 \text{ Nm}$  pour n'importe quel type d'appareil.

**D- Départ-Départ:**

$$D_{ij} = \max (\text{TOP}_i, t_{sij}, e_{ij}) \quad (4.10)$$

**TOP<sub>i</sub>:** On prend le TOP départ pour chaque une des pistes.



Tableau représentatif des matrices des cadences élémentaires des deux pistes d'aérodrome de Constantine:

Cadences élémentaires: Piste 16/34	Cadences élémentaires: Piste 14/32
$A = \begin{bmatrix} 464 & 417 & 367 & 343 \\ 347 & 300 & 250 & 233 \\ 380 & 333 & 283 & 259 \\ 382 & 335 & 285 & 261 \end{bmatrix}$	$A = \begin{bmatrix} 448 & 401 \\ 403 & 356 \end{bmatrix}$
$B = \begin{bmatrix} 184 & 184 & 184 & 184 \\ 67 & 67 & 67 & 67 \\ 100 & 100 & 100 & 100 \\ 102 & 102 & 102 & 102 \end{bmatrix}$	$B = \begin{bmatrix} 168 & 168 \\ 123 & 123 \end{bmatrix}$
$C = \begin{bmatrix} 280 & 233 & 183 & 159 \\ 280 & 233 & 183 & 159 \\ 280 & 233 & 183 & 159 \\ 280 & 233 & 183 & 159 \end{bmatrix}$	$C = \begin{bmatrix} 280 & 233 \\ 280 & 233 \end{bmatrix}$
$D = \begin{bmatrix} 149 & 149 & 149 & 149 \\ 129 & 129 & 129 & 129 \\ 135 & 135 & 135 & 135 \\ 131 & 131 & 131 & 131 \end{bmatrix}$	$D = \begin{bmatrix} 125 & 125 \\ 120 & 120 \end{bmatrix}$

**Tableau 4-13:** Cadences élémentaires des pistes d'aérodrome de Constantine.

#### 4.7.2. Calcul des cadences moyennes :

Afin de déterminer les cadences moyennes en applique les formules (4.11) ; (4.12) ;(4.13) ;(4.14), on a besoin également de la matrice de proportion des avions de type i par rapport au volume totale du trafic de l'heure la plus dense de la journée type.

La journée type est dénommée «caractéristique» pour dimensionner un système de piste, elle est choisie comme représentative du fonctionnement à forte charge de l'aéroport, mais sans qu'il s'agisse d'une charge exceptionnelle (les heures de pointe ne sont donc pas nécessairement les plus fortes heures de pointe enregistrées). Pour la journée du 23 août 2016, l'aéroport de Constantine a marqué un trafic maximal de 71 mouvements détaillés dans le tableau suivant :

Tranche d'horaire	arrivée	départ	Nombre de mvts
00h-01h	0	0	0
01h-02h	1	0	1
02h-03h	0	0	0
03h-04h	0	0	0
04h-05h	0	0	0
05h-06h	0	0	0
06h-07h	1	0	1
07h-08h	4	2	6
08h-09h	4	3	7
09h-10h	3	3	6
10h-11h	2	2	4
11h-12h	1	2	3
12h-13h	2	2	4
13h-14h	3	3	6
14-h15h	0	2	2
15h-16h	3	2	5
16h-17h	2	4	6
17h-18h	3	0	3
18h-19h	2	3	5
19h-20h	1	3	4
20h-21h	1	2	3
21h-22h	2	1	3
22h-23h	1	1	2
<b>Nombre de mouvements total de la journée</b>			<b>71</b>

**Tableau 4-14:** Nombre de mouvements enregistré de la journée type.

D'après le tableau précédent, le plus grand nombre de mouvement (7 mvts) a été enregistré de 08h à 09h. Le détail de ces informations est représenté dans le tableau suivant :

Catégorie	Arrivée	Départ
<b>A</b>	0	0
<b>B</b>	2	1
<b>C</b>	2	2
<b>D</b>	0	0
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>3</b>

**Tableau 4-15:** les catégories d'avions de la journée type.

Nombre de mouvement : 7 mvts dont 4 arrivées et 3 départs.

Catégories d'appareil :

**A** : 0 soit 0/7

**B** : 3 soit 3/7

**C** : 4 soit 4/7

**D** : 0 soit 0/7

#### 4.7.2.1. Calcul de cadence moyenne piste 16/34 :

Arrivée-arrivée  $\bar{A}$ :

$$\checkmark \bar{A} = {}^tP . A . P$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{7} & \frac{4}{7} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 464 & 417 & 367 & 343 \\ 347 & 300 & 250 & 233 \\ 380 & 333 & 283 & 259 \\ 382 & 335 & 285 & 261 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 3/7 \\ 4/7 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{A} = 290 \text{ s.}$$

Arrivée-Départ  $\bar{B}$ :

$$\checkmark \bar{B} = {}^tP . B . P$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{7} & \frac{4}{7} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 184 & 184 & 184 & 184 \\ 67 & 67 & 67 & 67 \\ 100 & 100 & 100 & 100 \\ 102 & 102 & 102 & 102 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 3/7 \\ 4/7 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{B} = 86 \text{ s}$$

Départ-Arrivée  $\bar{C}$ :

$$\checkmark \bar{C} = {}^tP . C . P$$

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{7} & \frac{4}{7} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 280 & 233 & 183 & 159 \\ 280 & 233 & 183 & 159 \\ 280 & 233 & 183 & 159 \\ 280 & 233 & 183 & 159 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 3/7 \\ 4/7 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{C} = 204 \text{ s}$$

Départ-Départ  $\bar{D}$ :

$$\checkmark \bar{D} = {}^tP . D . P$$

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{7} & \frac{4}{7} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 149 & 149 & 149 & 149 \\ 129 & 129 & 129 & 129 \\ 135 & 135 & 135 & 135 \\ 131 & 131 & 131 & 131 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 3/7 \\ 4/7 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{D} = 132 \text{ s}$$

#### 4.7.2.2. Calcul de cadence moyenne piste 14/32 :

Arrivée-arrivée  $\bar{A}$ :

$$\checkmark \bar{A} = {}^tP \cdot A \cdot P$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{7} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 448 & 401 \\ 403 & 356 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 3/7 \end{bmatrix}; \quad \bar{A} = 66 \text{ s.}$$

Arrivée-Départ  $\bar{B}$ :

$$\checkmark \bar{B} = {}^tP \cdot B \cdot P$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{7} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 168 & 168 \\ 123 & 123 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 3/7 \end{bmatrix}; \quad \bar{B} = 23 \text{ s.}$$

Départ-Arrivée  $\bar{C}$ :

$$\checkmark \bar{C} = {}^tP \cdot C \cdot P$$

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{7} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 280 & 233 \\ 280 & 233 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 3/7 \end{bmatrix}; \quad \bar{C} = 43 \text{ s.}$$

Départ-Départ  $\bar{D}$ :

$$\checkmark \bar{D} = {}^tP \cdot D \cdot P$$

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{7} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 125 & 125 \\ 120 & 120 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 3/7 \end{bmatrix}; \quad \bar{D} = 22 \text{ s.}$$

## 4.8. Calcul de capacité horaire:

### 4.8.1. Capacité horaire arrivées ( $Ch_a$ ):

La capacité horaire arrivées est exprimée en mouvement d'avion par heure, représente le nombre maximal d'arrivée que le système de pistes peut écouler en une heure, le seuil de piste arrivée étant pris comme référence.

$$Ch_a \text{ (mvt/h)} = 3600 / \bar{A} \quad (4.16)$$

Ou  $\bar{A}$  = Cadence moyenne des arrivées.

### 4.8.2. Capacité horaire départs ( $Ch_d$ ):

La capacité horaire départs est exprimée en mouvement d'avion par heure, représente le nombre maximal de départ que le système peut écouler en une heure, le seuil de piste départ étant pris comme référence.

$$Ch_d \text{ (mvt/h)} = 3600 / \bar{D} \quad (4.17)$$

Ou  $\bar{D}$  = Cadence moyenne des départs.

### 4.8.3. Capacité horaire mixte avec priorité aux arrivées ( $Ch_{m_a}$ ):

La capacité horaire mixte avec priorité aux arrivées est égale à la somme de la capacité horaire arrivée et le nombre de départ qu'il est possible d'insérer par heure dans le flux des arrivées celle-ci étant prioritaire.

Pour la détermination du nombre de départ qu'il est possible d'insérer dans le flux des arrivées il doit être tenu compte du débit des départs qui, s'il est insuffisant peut limiter l'insertion des départs dans les trous du flux des arrivées.

✓ **Méthode calcul de la (Chm<sub>a</sub>):**

Soit les instants  $T_i$  et  $T_j$  de passage au seuil de piste des avions tête, de type i, et queue, de type j.

$g_{ij}(\text{en } s) = t_i - t_j$  (4-18) représente l'intervalle de temps pendant lequel il est possible d'insérer un ou plusieurs départs en deux arrivées.

Avec:

$$t_i = T_i + b'_i \quad (4-19)$$

$$t_j = T_j + c'_j \quad (4-20)$$

Ou:

$$b'_i: \text{ cadence élémentaire (arrivée de type i- départ moyen)} = \sum P_k b_{ik} \quad (4-21)$$

$$c'_j: \text{ cadence élémentaire (départ moyen- arrivée de type j)} = \sum P_k c_{kj} \quad (4-22)$$

$P_k$  = proportion des avions de type k.

$$b_{ik} \begin{cases} = \text{cadence élémentaire (arrivée de type i- départ de type k).} \\ = \text{Max (TOP}_i, S_{ik}). \end{cases}$$

**TOP<sub>i</sub>:** Temps d'occupation de piste à l'arrivée de l'avion de type i.

$$S_{ik} \begin{cases} = ts_{ik} \text{ s'il existe seuil décalé.} \\ = \text{sinon } 0. \end{cases}$$

**ts<sub>ik</sub> en s** = Espacement minimal des avions de type i et k dû à la turbulence de sillage.

$$c_{kj} \begin{cases} = \text{cadence élémentaire (départ de type k- arrivée de type j).} \\ = 3600 * X_{kj} / Va_j. \quad (4-23) \end{cases}$$

$\mathbf{X}_{kj}$  (**Nm**): Distance entre le point verrou et le seuil de piste au-delà duquel une arrivée de type j bloque un départ de type k.

$\mathbf{V}_j$  (**Kts**): Vitesse sur la trajectoire d'approche finale de l'avion de type j.

On a:

$$\mathbf{g}_{ij} = \mathbf{T}_i - \mathbf{T}_j + \mathbf{b}'_i - \mathbf{c}'_j = \mathbf{a}_{ij} + \mathbf{b}'_i - \mathbf{c}'_j \quad (4-24)$$

Avec:  $\mathbf{a}_{ij}$ : cadence élémentaire (arrive de type i- départ de type j).

$(\mathbf{nd}_{ij})$ : représente le nombre de départ qu'il est possible d'insérer entre deux arrivées de types i et j, dans l'hypothèse où le débit est suffisant pour ne pas limiter leur insertion dans les trous du flux des arrivées.

$$\mathbf{nd}_{ij} \begin{cases} = E(\mathbf{g}_{ij}/\bar{D}) + 1 & \text{si } \mathbf{g}_{ij} > 0; \text{ avec } \mathbf{n}_d: \text{ la matrice } \mathbf{n}_d = [\mathbf{nd}_{ij}] \\ = \text{sinon } 0. \end{cases} \quad (4-25)$$

Soit  $\bar{\mathbf{n}}_d$  le nombre moyen de départ qu'il est possible d'insérer entre deux arrivées, dans l'hypothèse où le débit des départs est suffisant pour ne pas limiter leur insertion dans les trous du flux des arrivées.

$$\bar{\mathbf{n}}_d = {}^t\mathbf{P} \cdot \mathbf{n}_d \cdot \mathbf{P} \quad (4-26)$$

Soit  $\mathbf{N}_d$  le nombre de départ qu'il est possible d'insérer dans le flux d'arrivées par heure, dans l'hypothèse où le débit des départs peut limiter leur insertion dans les trous du flux des arrivées.

$\mathbf{N}_d$  ne peut pas être supérieure à  $\mathbf{Ch}_d$ .

Si les départ se présentent correctement devant les trous du flux des arrivées ( $\mathbf{Ch}_a / \mathbf{Ch}_d < 1$ ):

$$\mathbf{N}_d = \min(\mathbf{Ch}_d; \mathbf{Ch}_a * \bar{\mathbf{n}}_d) \quad (4-27)$$

Dans le cas contraire, il faut diviser le terme  $\mathbf{Ch}_a * \bar{\mathbf{n}}_d$  par le terme:

$$\text{ABS}[E(1 - \mathbf{Ch}_a / \mathbf{Ch}_d)] + 1 \quad (4-28)$$

Pour représenter le fait que l'on peut insérer un départ que tous les deux trous, les trois trous....

Avec:

ABS = (valeur absolue); E = (partie entière).

Formulation:

$$N_d = \min (Ch_d; Ch_a * \bar{n}_d / ABS [E (1 - Ch_a / Ch_d)] + 1 ) \quad (4-29)$$

D' où:

$$Chm_a = Ch_{a+} N_d \quad (4-30)$$

$$Chm_a = Ch_{a+} \min (Ch_d; Ch_a * \bar{n}_d / ABS [E (1 - Ch_a / Ch_d)] + 1 ) \text{ mvt/h} \quad (4-31)$$

#### 4.8.4. Capacité horaire mixte avec priorité aux départs ( $Chm_d$ ):

La capacité horaire mixte avec priorité aux départs est égale à la somme de la capacité horaire départs et le nombre d'arrivées qu'il est possible d'insérer par heure dans le flux des départs celle-ci étant prioritaire.

Pour la détermination du nombre d'arrivées qu'il est possible d'insérer dans le flux des départs il doit être tenu compte du débit des arrivées qui, s'il est insuffisant peut limiter l'insertion des arrivées dans les trous du flux des départs.

##### ✓ Méthode calcul de la ( $Chm_d$ ):

Soit les instants  $T_i$  et  $T_j$  de passage au seuil de piste des avions tête, de type i, et queue, de type j.

$I_{ij}$  (en s) =  $t_i - t_j$  (4-32) représente l'intervalle de temps pendant lequel il est possible d'insérer un ou plusieurs départs en deux arrivées.

Avec:

$$t_i = T_i + c'_i \quad (4-33)$$

$$t_j = T_j + b'_j \quad (4-34)$$



Ou:

$$\mathbf{b}'_j: \text{Cadence élémentaire (arrivée moyen- départ de type } j) = \sum \mathbf{P}_k \mathbf{b}_{kj} \quad (4-35)$$

$$\mathbf{c}'_i: \text{Cadence élémentaire (départ de type } i\text{- arrivée moyen)} = \sum \mathbf{P}_k \mathbf{c}_{ik} \quad (4-36)$$

$\mathbf{P}_k$  = proportion des avions de type k.

$$\mathbf{b}_{kj} \begin{cases} = \text{cadence élémentaire (arrivée de type } k\text{- départ de type } j). \\ = \text{Max} (\text{TOP}_k, \mathbf{S}_{kj}). \end{cases}$$

$\text{TOP}_k$ : Temps d'occupation de piste à l'arrivée de l'avion de type k.

$$\mathbf{S}_{kj} \begin{cases} = \text{ts}_{kj} \text{ s'il existe seuil décalé.} \\ = \text{sinon } 0. \end{cases}$$

$\text{ts}_{kj}$  en s = Espacement minimal des avions de type k et j dû à la turbulence de sillage.

$$\mathbf{c}_{ik} \begin{cases} = \text{cadence élémentaire (départ de type } i\text{- arrivée de type } j). \\ = 3600 * \mathbf{X}_{ik} / \mathbf{V}_{a_i}. \quad (4-37) \end{cases}$$

$\mathbf{X}_{ik}$  [Nm]: Distance entre le point verrou et le seuil de piste au-delà duquel une arrivée de type k bloque un départ de type i.

$\mathbf{V}_{a_i}$  (Kts): Vitesse sur la trajectoire d'approche finale de l'avion de type i.

On a:

$$\mathbf{I}_{ij} = \mathbf{T}_i - \mathbf{T}_j + \mathbf{c}'_i - \mathbf{b}'_j = \mathbf{d}_{ij} + \mathbf{c}'_i - \mathbf{b}'_j \quad (4-38)$$

Avec  $\mathbf{d}_{ij}$ : cadence élémentaire (départ de type i- départ de type j).

$n_{aij}$ : représente le nombre d'arrivées de qu'il est possible d'insérer entre deux départs de type i et j, dans l'hypothèse où le débit est suffisant pour ne pas limiter leur insertion dans les trous du flux des départs.

$$\mathbf{n}_{aij} \begin{cases} = E (I_{ij} / \bar{A}) + 1 & \text{si } I_{ij} > 0; \text{ avec } n_a: \text{ la matrice } n_a = [n_{aij}] \\ = \text{sinon } 0. \end{cases} \quad (4-39)$$

Soit  $\bar{n}_a$  le nombre moyen d'arrivées de qu'il est possible d'insérer entre deux départs, dans l'hypothèse où le débit des arrivées est suffisant pour ne pas limiter leur insertion dans les trous du flux des départs.

$$\bar{n}_a = {}^t \mathbf{P} \cdot \mathbf{n}_a \cdot \mathbf{P} \quad (4-40)$$

Soit  $N_a$  le nombre d'arrivées qu'il est possible d'insérer dans le flux de départs par heure, dans l'hypothèse où le débit des arrivées peut limiter leur insertion dans les trous du flux des départs.

$N_a$  ne peut pas être supérieure à  $Ch_a$ .

Si les arrivées se présentent correctement devant les trous du flux des départs ( $Ch_d / Ch_a < 1$ ):

$$N_a = \min (Ch_a; Ch_d * \bar{n}_a) \quad (4-41)$$

Dans le cas contraire, il faut diviser le terme  $Ch_d * \bar{n}_a$  par le terme:

$$ABS [E (1 - Ch_d / Ch_a)] + 1 \quad (4-42)$$

Pour représenter le fait qu'on peut insérer une arrivée que tous les deux trous, trois trous ....

Avec:

ABS = (valeur absolue); E = (partie entière).

Formulation:

$$N_a = \min (Ch_a; Ch_d * \bar{n}_a / ABS [E (1 - Ch_d / Ch_a)] + 1) \quad (4-43)$$

D' où:

$$Ch_{m_d} = Ch_d + N_a \quad (4-44)$$

$$Ch_{m_d} = Ch_d + \min (Ch_a; Ch_d * \bar{n}_a / ABS [E (1 - Ch_d / Ch_a) + 1 ] ) \text{ mvt/h} \quad (4-45)$$

#### 4.9. Application numérique:

Calcul capacité des deux pistes de l'aérodrome de Constantine Mohamed Boudiaf;

- ✓ Pas de seuil décalé donc  $S_{ik} = 0$  et  $S_{jk} = 0$ .
- ✓ Les proportions des avions de type k par rapport au trafic total de la journée type:  
 $P_1 = 0; P_2 = 3/7; P_3 = 4/7; P_4 = 0$ .
- ✓ Pour les deux pistes (16/34, 14/32): le verrou se trouve à une distance de 7 Nm pour n'importe quel type d'appareil.
- ✓ Tous les avions dans la piste 16/34 utilisent la sortie droite AB2 et pour la piste 14/32 tous les avions utilisent la sortie droite A2.
- ✓ Espacement minimal longitudinal de 7 Nm de surveillance radar.

##### 4.9.1. Piste 16/34:

➤ Capacité horaire (arrivée)  $Ch_a$ :

$$Ch_a \text{ (mvt/h)} = 3600 / \bar{A} \longrightarrow Ch_a = 3600 / 290 \longrightarrow \boxed{Ch_a = 12 \text{ mvt/heure.}}$$

➤ Capacité horaire (départ)  $Ch_d$ :

$$Ch_d \text{ (mvt/h)} = 3600 / \bar{D} \longrightarrow Ch_d = 3600 / 132 \longrightarrow \boxed{Ch_d = 27 \text{ mvt/heure.}}$$

➤ **Capacité horaire mixte avec priorité aux arrivées:**

▪ **Calcul des cadences élémentaires (arrivée de type i- départ moyen):**

On a:  $b'_i = \sum P_k b_{ik}$  (4-21) avec:  $k= 1,4$ .

$b_{ik} = (TOP_i; S_{ik})$ .

Pour les différents i de k on retrouve les  $b_{ik}$  suivant:

Type k \ Type i	1	2	3	4
1	184	184	184	184
2	67	67	67	67
3	100	100	100	100
4	102	102	102	102

**Tableau 4-16:** Valeurs des cadences élémentaires (arrivée de type i- départ de type k).

- Calcul de  $b'_i$ :

Application dans la formule:

<b>i</b>	1	2	3	4
<b>b'_i</b>	184	67	100	102

**Tableau 4-17:** Valeurs de cadences (arrivée de type i- départ moyen).

▪ **Calcul des cadences élémentaires (départ moyen -arrivée de type j):**

On a:  $c'_j = \sum P_k c_{kj}$  (4-22) avec:  $k= 1,4$ .

$c_{kj} = 3600 * X_{kj} / Va_j$ .

Pour les différents k de j on retrouve les  $c_{kj}$  suivant:

Type j \ Type k	1	2	3	4
1	280	233	183	159
2	280	233	183	159
3	280	233	183	159
4	280	233	183	159

**Tableau 4-18:** Valeurs des cadences élémentaires (départ de type k- arrivée de type j).

- Calcul de  $c'_j$ :

Application dans la formule:

j	1	2	3	4
$c'_j$	280	233	183	159

**Tableau 4-19:** Valeurs de cadences (départ moyen- arrivée de type j).

- Calcul de  $g_{ij}$ :  $g_{ij} = T_i - T_j + b'_i - c'_j = a_{ij} + b'_i - c'_j$

Pour les différent i et j on trouve les  $g_{ij}$  suivant:

Type j \ Type i	1	2	3	4
1	368 s	368 s	368 s	368 s
2	134 s	134 s	134 s	141 s
3	200 s	200 s	200 s	200 s
4	204 s	204 s	204 s	204 s

**Tableau 4-20:** Valeurs d'intervalle de temps ou on peut insérer des départs.

- Calcul de  $nd_{ij}$ :

$$nd_{ij} \begin{cases} = E(g_{ij}/\bar{D}) + 1 & \text{si } g_{ij} > 0; \\ = \text{sinon } 0. \end{cases} \quad \text{avec } n_d: \text{ la matrice } n_d = [nd_{ij}] \quad (4-25)$$

$$n_d = \begin{bmatrix} 3 & 3 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix}$$

- Calcul de nombre moyen de départ  $\bar{n}_d$ :

$$\bar{n}_d = {}^t P \cdot n_d \cdot P$$

$$\bar{n}_d = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{7} & \frac{4}{7} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 3 & 3 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 3/7 \\ 4/7 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{n}_d = 2$$

- Calcul du nombre de départ  $N_d$ :

$$Ch_a/Ch_d = 12/27; \quad Ch_a/Ch_d < 1 \text{ Donc:}$$

$$N_d = \min(Ch_a; Ch_a * \bar{n}_d) \longrightarrow N_d = \min(12; 12 * 2)$$

Il est possible d'insérer: 12 départs.

$$Chm_a = Ch_a + N_d; \quad Chm_a = 12 + 12 = 24 \longrightarrow \boxed{Chm_a = 24 \text{ mvts/h}}$$

Type k \ Type i	1	2	3	4
1	280s	233s	183s	159s
2	280s	233s	183s	159s
3	280s	233s	183s	159s
4	280s	233s	183s	159s

**Tableau 4-21:** Valeurs des cadences élémentaires (départ de type i- arrivée de type k).

➤ **Calcul de la capacité horaire mixte avec priorité aux départs  $Chm_d$  :**

▪ **Calcul des cadences élémentaires (départ type i -arrivée moyen):**

On a:  $c'_i = \sum P_k c_{ik}$  avec:  $k= 1,4$ .

$$c_{ik} = 3600 * X_{ik} / V_{ak}.$$

Pour les différents i de k on retrouve les  $c_{ik}$  suivant:

Type k \ Type j	1	2	3	4
1	184s	184s	184s	184s
2	67s	67s	67s	67s
3	100s	100s	100s	100s
4	102s	102s	102s	102s

**Tableau 4-21:** Valeurs des cadences élémentaires (départ de type i- arrivée de type k).

- Calcul de  $c'_i$ :

Application dans la formule:

i	1	2	3	4
$c'_i$	204s	204s	204s	204s

**Tableau 4-22:** Valeurs de cadences (départ type i- arrivée moyen).

▪ **Calcul des cadences élémentaires (arrivée moyen-départ de type j):**

On a:  $b'_j = \sum P_k b_{kj}$  avec:  $k= 1,4$ .

$b_{kj} = (TOP_k; S_{kj})$ .

Pour les différents k de j on retrouve les  $b_{kj}$  suivant:

Type k \ Type j	1	2	3	4
1	184s	184s	184s	184s
2	67s	67s	67s	67s
3	100s	100s	100s	100s
4	102s	102s	102s	102s

**Tableau 4-23:** Valeurs de cadences (arrivée type k- départ type j).

- Calcul de  $b'_j$ :

Application dans la formule:

j	1	2	3	4
$b'_j$	86s	86s	86s	86s

**Tableau 4-24:** Valeurs de cadences (arrivée moyen- départ type j).

- Calcul de  $I_{ij}$ :  $I_{ij} = d_{ij} + c'_i - b'_j$

Pour les différents i et j on trouve les  $I_{ij}$  suivant:

Type i \ Type j	1	2	3	4
1	267s	267s	267s	267s
2	247s	247s	247s	247s
3	253s	253s	253s	253s
4	249s	249s	249s	249s

**Tableau 4-25:** Valeurs d'intervalle de temps ou on peut insérer des arrivées.

- Calcul de  $na_{ij}$ :

$$na_{ij} \begin{cases} = E(I_{ij}/\bar{A}) + 1 & \text{si } I_{ij} > 0; \text{ avec } n_a: \text{ la matrice } n_a = [na_{ij}] \\ = \text{sinon } 0. \end{cases} \quad (4-39)$$

$$n_a = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

- Calcul de nombre moyen de départ  $\bar{n}_a$ :

$$\bar{n}_a = {}^t P \cdot n_a \cdot P$$

$$\bar{n}_a = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{7} & \frac{4}{7} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 3/7 \\ 4/7 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{n}_a = 1$$

- Calcul du nombre de départ  $N_a$ :

$Ch_d/Ch_a = 27/12$ ;  $2 > 1$  Donc:

$$N_a = \min (Ch_a; Ch_d * \bar{n}_a / ABS [E (1 - Ch_d / Ch_a)] + 1 ); N_a = \min (12; 13.5)$$

Il est possible d'insérer: 12 arrivées.

$$Chm_d = Ch_d + N_a; Chm_d = 27 + 12 \longrightarrow \boxed{Chm_d = 39 \text{ mvts/h}}$$



**4.9.2. Piste 14/32:**

➤ **Capacité horaire (arrivée)  $Ch_a$ :**

$$Ch_a \text{ (mvt/h)} = 3600 / \bar{A} \longrightarrow Ch_a = 3600 / 66 \longrightarrow Ch_a = 54 \text{ mvt/heure.}$$

➤ **Capacité horaire (départ)  $Ch_d$ :**

$$Ch_d \text{ (mvt/h)} = 3600 / \bar{D} \longrightarrow Ch_d = 3600 / 22 \longrightarrow Ch_d = 164 \text{ mvt/heure}$$

➤ **Capacité horaire mixte avec priorité aux arrivées:**

▪ **Calcul des cadences élémentaires (arrivée de type i- départ moyen):**

On a:  $b'_i = \sum P_k b_{ik}$  avec:  $k=1,2$ .

$b_{ik} = (TOP_i; S_{ik})$ .

Pour les différents i de k on retrouve les  $b_{ik}$  suivant:

Type k \ Type i	1	2
1	168s	168s
2	123s	123s

**Tableau 4-26:** Valeurs des cadences élémentaires (arrivée de type i- départ de type k).

- Calcul de  $b'_i$ :

Application dans la formule:

i	1	2
$b'_i$	72s	53s

**Tableau 4-27:** Valeurs de cadences (arrivée de type i- départ moyen).

▪ **Calcul des cadences élémentaires (départ moyen -arrivée de type j):**

On a:  $c'_j = \sum P_k c_{kj}$  avec:  $k=1,2$ .

$$c_{kj} = 3600 * X_{kj} / Va_j.$$

Pour les différents k de j on retrouve les  $c_{kj}$  suivant:

Type k \ Type j	1	2
1	280s	233s
2	280s	233s

**Tableau 4-28:** Valeurs des cadences élémentaires (départ de type k-arrivée de type j).

- Calcul de  $c'_j$ :

Application dans la formule:

j	1	2
$c'_j$	120s	100s

**Tableau 4-29:** Valeurs de cadences (départ moyen- arrivée de type j).

- Calcul de  $g_{ij}$ :  $g_{ij} = T_i - T_j + b'_i - c'_j = a_{ij} + b'_i - c'_j$

Pour les différent i et j on trouve les  $g_{ij}$  suivant:

Type i \ Type j	1	2
1	400s	373s
2	336s	309s

**Tableau 4-30:** Valeurs d'intervalle de temps ou on peut insérer des départs.

- Calcul de  $nd_{ij}$ :

$$nd_{ij} \begin{cases} = E(g_{ij} / \bar{D}) + 1 & \text{si } g_{ij} > 0; \text{ avec } n_d: \text{ la matrice } n_d = [nd_{ij}] \\ = \text{sinon } 0. \end{cases} \quad (4-25)$$

$$n_d = \begin{bmatrix} 19 & 17 \\ 16 & 15 \end{bmatrix}$$

- Calcul de nombre moyen de départ  $\bar{n}_d$ :

$$\bar{n}_d = {}^t P \cdot n_d \cdot P$$

$$\bar{n}_d = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{7} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 19 & 17 \\ 16 & 15 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{3}{7} \end{bmatrix}; \quad \bar{n}_d = 3$$

- Calcul du nombre de départ  $N_d$ :

$$Ch_a/Ch_d = 54/164; \quad Ch_a/Ch_d < 1 \text{ Donc:}$$

$$N_d = \min(Ch_a; Ch_a \cdot \bar{n}_d) \longrightarrow N_d = \min(54; 54 \cdot 3)$$

Il est possible d'insérer: 54 départs.

$$Chm_a = Ch_a + N_d; \quad Chm_a = 54 + 54 = 108 \longrightarrow \boxed{Chm_a = 108 \text{ mvts/h}}$$

➤ **Calcul de la capacité horaire mixte avec priorité aux départs  $Chm_d$  :**

▪ **Calcul des cadences élémentaires (départ type i - arrivée moyen):**

$$\text{On a: } c'_i = \sum P_k c_{ik} \quad \text{avec: } k=1,2.$$

$$c_{ik} = 3600 \cdot X_{ik} / V_{ak}$$

Pour les différents i de k on retrouve les  $c_{ik}$  suivant:

Type k \ Type i	1	2
1	280s	233s
2	280s	233s

**Tableau 4-31:** Valeurs de cadences élémentaires (départ de type i- arrivée de type k).

- Calcul de  $c'_i$ :

Application dans la formule:

i	1	2
$c'_i$	100s	100s

**Tableau 4-32:** Valeurs de cadences (départ type i- arrivée moyen).

▪ **Calcul des cadences élémentaires (arrivée moyen-départ de type j):**

On a:  $\mathbf{b}'_j = \sum P_k \mathbf{b}_{kj}$  avec:  $k= 1,2$ .

$\mathbf{b}_{kj} = (\text{TOP}_k; S_{kj})$ .

Pour les différents k de j on retrouve les  $\mathbf{b}_{kj}$  suivant:

<b>Type j</b>	1	2
<b>Type k</b>		
1	168s	168s
2	123s	123s

**Tableau 4-33:** Valeurs de cadences élémentaires (arrivée de type k- départ de type j).

- Calcul de  $\mathbf{b}'_j$ :

Application dans la formule:

<b>j</b>	1	2
<b>b'_j</b>	53s	53s

**Tableau 4-34:** Valeurs de cadences (arrivée moyen- départ type j).

- Calcul de  $\mathbf{I}_{ij}$ :  $\mathbf{I}_{ij} = \mathbf{d}_{ij} + \mathbf{c}'_i - \mathbf{b}'_j$

Pour les différents i et j on trouve les  $\mathbf{I}_{ij}$  suivant:

<b>Type j</b>	1	2
<b>Type i</b>		
1	172s	172s
2	167s	167s

**Tableau 4-35:** Valeurs d'intervalle de temps ou on peut insérer des arrivées.

- Calcul de  $\mathbf{na}_{ij}$

$$\mathbf{na}_{ij} \begin{cases} = E(\mathbf{I}_{ij}/\bar{A}) + 1 & \text{si } \mathbf{I}_{ij} > 0; \text{ avec } \mathbf{n}_a: \text{ la matrice } \mathbf{n}_a = [\mathbf{na}_{ij}] \\ = \text{sinon } 0. \end{cases} \quad (4-39)$$

$$n_a = \begin{bmatrix} 3 & 3 \\ 3 & 3 \end{bmatrix}$$

- Calcul de nombre moyen de départ  $\bar{n}_a$ :

$$\bar{n}_a = {}^t P \cdot n_a \cdot P$$

$$\bar{n}_a = \begin{bmatrix} 0 & 3/7 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 3 & 3 \\ 3 & 3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 3/7 \end{bmatrix}; \quad \bar{n}_a = 0.42.$$

- Calcul du nombre de départ  $N_a$ :

$Ch_d/Ch_a = 164/54$ ;  $3 > 1$  Donc:

$$N_a = \min (Ch_a; Ch_d * \bar{n}_a / ABS [E (1 - Ch_d / Ch_a)] + 1 ); N_a = \min (54; 8)$$

Il est possible d'insérer: 8 arrivées.

$$Chm_d = Ch_d + N_a; Chm_d = 164 + 8 \longrightarrow \boxed{Chm_d = 172 \text{ mvts/h}}$$

#### 4.10. Capacité Parking:

L'aérodrome de Constantine dispose de 09 postes réparti comme suit:

- Parking P1: 02 postes catégorie A.
- Parking P2: 02 postes catégorie B.
- Parking P3: 03 postes catégorie C.
- Parking P4: 02 postes catégorie D.

Chaque catégorie d'aéronef dispose d'un certain nombre de postes de stationnement et d'un temps d'occupation du poste qui lui est designer:

Catégorie poste	Ni	Ti
<b>A</b>	02	60 min
<b>B</b>	02	60 min
<b>C</b>	03	90 min
<b>D</b>	02	100 min

**Ni:** Nombre de postes de stationnement par type d'aéronefs.

**Ti:** Temps de traitement par type d'aéronefs.

Avec un coefficient d'utilisation de **100 %**.

**Tableau 4-36:** Nombre de postes et temps de traitement par type d'aéronef.

#### 4.10. 1. Calcul de la capacité théorique maximale:

Méthode de calcul:

$$C_t = 60 * \sum (N_i / T_i) \quad \text{avec: } i = 1 \text{ à } n \quad (4-46)$$

60: temps de traitement = 1 heure.

Sachant que N= postes de stationnement réparti comme suit:

**N1:** 2 postes pour gros porteurs (**GP**).

**N2:** 3 postes pour moyen porteur (**MP**).

**N3:** 4 postes pour petit porteur (**PP**).

Application numérique:

$$C_t = 60 * (2/100 + 3/90 + 4/60) \quad \longrightarrow \quad \boxed{C_t = 7 \text{ avions/ heure}}$$

▪ Calcul capacité théorique pour utilisation gros porteurs :

$$C_t = 60 * (2/100 + 0/90 + 0/60) \quad \longrightarrow \quad \boxed{C_t = 1 \text{ avion/ heure}}$$

▪ Calcul capacité théorique pour utilisation moyen porteurs :

Remarque: les postes réservés aux **GP** sont aptes à recevoir le **MP** donc pour les postes de stationnement : **MP** = 2+3= 5 postes.

$$C_t = 60 * (0/100 + 5/90 + 0/60) \quad \longrightarrow \quad \boxed{C_t = 3 \text{ avions/ heure}}$$

▪ Calcul capacité théorique petit porteur :

Tous les postes peuvent recevoir le **PP** donc pour les postes de stationnement: **PP**= 9 postes.

$$C_t = 60 * (0/100 + 0/90 + 9/60) \quad \longrightarrow \quad \boxed{C_t = 9 \text{ avions/ heure}}$$

#### 4.10. 2. La capacité opérationnelle:

On a un coefficient d'utilisation égale à 100 %:

$$C_0 = C_t * 1 \text{ donc: } C_0 = C_t \quad (4-47)$$

- **GP:**  $C_0 = C_t \longrightarrow C_0 = 1$  avion/heure.
- **MP:**  $C_0 = C_t \longrightarrow C_0 = 3$  avions/heure.
- **PP:**  $C_0 = C_t \longrightarrow C_0 = 9$  avions/heure.

#### 4.11. Conclusion:

En application de ces différentes études théoriques, sur des exemples de cas réel de l'aérodrome de Constantine. Les résultats suivants ont été obtenus résumés dans le tableau ci-dessous:

#### TOP (s)

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
<b>TOP départ QFU 16</b>	149s	129s	135s	131s
<b>TOP départ QFU 14</b>	125s	111s	/	/
<b>TOP arrivée QFU 16 (sortie droite AB2)</b>	184s	67s	100s	102s
<b>TOP arrivée QFU 14 (sortie droite A2)</b>	168s	123s	/	/

#### CADENCES MOYENNES DES PISTES (s)

	$\bar{A} = t_a$	$\bar{B} = t_{ad}$	$\bar{C} = t_{da}$	$\bar{D} = t_d$
<b>Piste 16/34</b>	290s	86s	204s	132s
<b>Piste 14/32</b>	66s	23s	43s	22s

#### CAPACITE PISTE (mvt/h)

	$Ch_a$	$Ch_{m_a}$	$Ch_{m_d}$	$Ch_d$
<b>Piste 16/34</b>	12	24	39	27
<b>Piste 14/32</b>	54	108	172	164

#### CAPACITE PARKING (AVIONS/H)

Capacité	Nombre de poste
7 avions/h	9 postes

**Tableau 4-37:** Répartitions résultants.

## **Conclusion générale :**

Durant les dernières années, la croissance exponentielle du nombre de trafic aérien a impliquée des difficultés dans la gestion du domaine aéronautique ; la congestion dans les aéroports influence sur l'efficacité des services du transport aérien et par conséquent elle influence sur le confort des passagers.

L'aéroport de Constantine Mohamed Boudiaf est un aéroport sollicité par un grand nombre de trafic, ce qui rend les recherches sur son état de fonctionnement très important. Le résultat de cette recherche aidera à comprendre l'état actuel de la capacité de l'aéroport en question.

L'étude a été menée pour mettre au point les faiblesses potentielles de la capacité du système pistes de l'aérodrome de Constantine en prenant en considération les types d'aéronefs qui le fréquente ainsi que leur catégories, leur vitesses d'approche en finale et les séparations existante entre ces aéronefs et le temps d'occupation de la piste pour chaque type ; nous avons obtenus les résultats suivant pour les capacités :

- La piste 16/34 : 12 mvts/h pour la capacité horaire arrivée et 27 mvts/h pour les départs, on se qui concerne la capacité horaire avec priorité au arrivée elle est de 24 mvts/h et pour la priorité au départ 39 mvts/h.

- La piste 14/32 : 54 mvts/h pour la capacité horaire arrivée et 164 mvts/h pour les départs, on se qui concerne la capacité horaire avec priorité au arrivée elle est de 108 mvts/h et pour la priorité au départ 172 mvts/h.

La capacité parking trouvé pour les différentes catégories de porteur est de 7 avions/h, on comparant la capacité des pistes avec la capacité du parking, on trouve que le parking de l'aérodrome de Constantine est loin d'être suffisant, et il est nécessaire d'éliminer cette faiblesse afin de résoudre le problème de saturation.

Bien que la piste soit l'élément le plus important dans de nombreux systèmes aéroportuaires pour gérer les vols, il existe également d'autres facteurs qui affectent la capacité des aéroports à tenir compte des opérations.



## Bibliographie

- [1] Détermination de la capacité d'un aéroport, DGAC, Novembre 2005.
- [2] M. STOICA Dragos Constantin, Analyse, représentation et optimisation de la circulation des avions sur une plate-forme aéroportuaire, Toulouse, 2004.
- [3] M. ZAGAYE Oualid, Le développement stratégique : Cas de l'aéroport d'Oran, Oran, 2012.
- [4] ITAC - Décembre 1998, Chapitre 1, Chapitre 2, Chapitre 3, Chapitre 4, Chapitre 7.
- [5] Robert Horonjeff, Francis X. McKelvey William J. Sproule Seth B. Young, Planning and Design of Airports, fifth edition 2010.
- [6] Seth B. Young Alexander T Wells, Sixth Edition, Airport Planning and Management.
- [7] Nicolas LETERRIER, Aérodromes : Description et classification, 2008
- [8] Antonio A Trani, Airport Capacity, Edition Virginia Tech, 2003.
- [9] Guide capacité aéroportuaire. Tome 1 de la DGAC (Europe). Edition 2005.
- [10] Ferhat Nesrine, Capacité du système piste de l'aéroport d'Alger Houari Boumediene, 2016.
- [11] <http://www.sia-enna.dz/>
- [12] <http://www.lavionnaire.fr>
- [13] Documents OACI ;