

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Saad Dahlab Blida 1

Institut d'Aéronautique et des Études Spatiales

Département De Navigation Aérienne

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Aéronautique

Option : Operations Aériennes

THEME

**Transition vers l'ACR/PCR : Analyse Comparative et
Développement d'une application pour la Gestion des Chaussées
Aéroportuaires**

Réalisé par :

Mlle. AMROUNE KENZA

Dirigé par :

Mme. Drareni Fatima Zahra

Co-promoteur :

Mr. Nounou Hicham

Edition, septembre 2023

Aircraft Classification Rating



PCR

БСВ



Remerciements

L'aboutissement de ce projet, étendu sur une période de plusieurs mois, suscite en moi une satisfaction profonde. Cette étape marque l'occasion de réfléchir aux multiples défis et obstacles qui ont jalonné cette démarche, tout en accordant une sincère reconnaissance aux individus qui ont apporté une contribution inestimable à sa réalisation.

Il n'existe pas de témoignage de gratitude plus profondément ressenti que celui que nous exprimons envers Dieu, le Tout-Puissant et Miséricordieux, le Souverain des temps et des circonstances, le Créateur incontesté de l'univers. C'est grâce à Sa bienveillance que j'ai pu préserver ma santé tout au long de cette année, ce qui m'a conféré la force et la détermination nécessaires pour donner vie à ce modeste projet.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ma respectueuse professeure, **Madame Drareni Fatima Zahra**, pour avoir dirigé mes recherches et m'avoir encadré tout au long de ce projet. Je la remercie pour la confiance qu'elle m'a accordée et pour ses précieux conseils ainsi que ses remarques constructives qui ont grandement contribué à l'amélioration de la qualité de mon travail et de ce mémoire. Sa patience et sa disponibilité ont été inestimables, et j'ai grandement apprécié son accompagnement, à la fois sur le plan académique et humain. Je lui exprime ma sincère gratitude et mon profond respect.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers **Monsieur Nounou Hicham**, Senior Manager et Consultant en aéronautique au sein de la SCCM (organisme de conseil en aéronautique et industrie), expérimenté 5000 heures de vol. Son rôle dans la réalisation de ce projet a été absolument essentiel, et son expertise en aviation a été d'une inestimable valeur.

Je salue avec admiration son exceptionnelle pédagogie, ses compétences inégalées dans le domaine de l'aviation, ainsi que sa grande disponibilité, sa souplesse d'esprit, et sa gentillesse. Ses conseils avisés et sa patience ont été un phare tout au long de ce voyage académique, et sa contribution a largement contribué à l'atteinte de mes objectifs. Monsieur Nounou Hicham incarne la quintessence de la collaboration professionnelle et je lui suis profondément reconnaissant pour son engagement sans faille dans la réussite de ce projet.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers **Madame la Directrice, AMINA BENKHEDDA**, pour son inestimable bienveillance à mon égard. Elle m'a accueilli au sein de sa famille académique et m'a traité comme un membre de sa propre famille. Son dévouement constant pour mon développement, sa prévenance et sa disponibilité infaillibles ont été d'une importance capitale tout au long de mon parcours. Elle n'a jamais hésité à me guider sur le bon chemin, à observer attentivement mon évolution, et à répondre à mes besoins. Son intervention rapide pour résoudre les problèmes auxquels j'ai pu être confronté est une démonstration de sa sollicitude exceptionnelle.

Un remerciement spécial revient également à Monsieur Mohand Lagha, dont la formation en logique informatique m'a fourni les bases essentielles pour la réalisation de ce logiciel. C'est grâce à sa qualité d'enseignement et à son soutien continu que j'ai pu concrétiser ce projet. Leur impact dans ma vie académique et professionnelle est indélébile, et je suis profondément reconnaissant pour leur soutien précieux et leur influence positive dans mon parcours.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance envers **Monsieur DJAMEL EDDINE Benyelles**, Responsable du Département de l'Ingénierie et de la Navigation Aérienne au sein de la Direction des Opérations Aériennes (DOA) d'Air Algérie, ainsi que **Madame Kardi Aida**, Ingénieure en Opérations et Responsable de la Documentation au sein de la DOA d'Air Algérie. Leur précieuse contribution réside dans la fourniture de la documentation essentielle qui a servi de fondement à une partie théorique significative de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers l'équipe pédagogique de l'Institut d'Aéronautique et des Études Spatiales, ainsi qu'envers les intervenants professionnels qui ont contribué à ma formation. Leur partage de connaissances et d'expériences dans le domaine a été précieux. Leur confiance en moi, les entretiens accordés, et leurs réponses à mes questions ont grandement enrichi mon parcours académique.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes qui, par leurs paroles, écrits, conseils et critiques, ont éclairé ma réflexion et ont accepté de partager leurs précieuses idées en m'accordant des entretiens.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers l'ensemble des professeurs et enseignants qui ont été disponibles pour moi au cours de ces deux années de Master. Un remerciement particulier à la famille des Opérations Aériennes pour son soutien continu et pour m'avoir orienté vers un secteur professionnel qui me correspond.

Mes remerciements vont également à tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'examiner ce mémoire et en y apportant leurs précieuses suggestions.

Je tiens à adresser un remerciement spécial à toutes les personnes qui m'ont aidé et encouragé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail. Leur patience, leur expertise, et leur soutien technique, économique, et moral ont été inestimables. Bien qu'il soit difficile de tous les nommer, qu'ils sachent que leur contribution est sincèrement appréciée.

Dédicace

À l'homme dont je suis extrêmement fière d'être la fille, mon père bien-aimé, '**RACHID**'. Cette dédicace est un témoignage vibrant de l'amour, de la reconnaissance et de la profonde gratitude que j'éprouve pour lui, pour tous les soutiens indéfectibles et les innombrables sacrifices qu'il a consentis pour moi.

À ma raison de vivre, ma mère exceptionnelle, '**Aziza**', une véritable lumière qui non seulement éclaire mon chemin mais aussi inonde ma vie de douceur et d'un amour infini.

À mon cher frère, '**YACINE et ALI**', et à ma chère sœur '**MYRIAM**', des compagnons de vie qui enrichissent mon existence de leur présence précieuse.

À celui qui occupe une place spéciale dans mon cœur et qui a toujours été mon pilier, mon soutien indéfectible, mon conjoint bien-aimé, '**BELKHIRI BOUBAKER**'. C'est grâce à lui que ma réussite a trouvé sa raison d'être.

À la mémoire de mon grand-père, '**KHALIFA**', qui avait une foi inébranlable en moi, et à mon oncle, '**KARIM**', que je porte toujours dans mon cœur avec une tendre affection. Puisse Dieu veiller sur leurs âmes dans son vaste paradis.

À toute ma famille, source de chaleur, de soutien et de réconfort.

À tous mes amis, en particulier '**TBRAHIM**' et '**AHMED**', dont la présence dans ma vie est une bénédiction.

À vous, cher lecteur, je dédie ces mots empreints d'amour et de gratitude.

Résumé

L'objectif de cette étude est de présenter la nouvelle réglementation ACR/PCR de l'OACI, qui entrera en vigueur le 28 novembre 2024, en remplacement de la méthode ACN-PCN. Dans ce cadre, nous développerons une application, nommée ACR ProTrack, dans le but de rationaliser de manière significative les procédures quotidiennes des agents BIA, des contrôleurs et des agents techniques des opérations aériennes. Cette application informatique vise à accroître l'efficacité et la sécurité du processus de préparation des vols.

ACR ProTrack repose sur un algorithme d'admissibilité spécialement conçu pour répondre aux normes ACR/PCR en évaluant les caractéristiques des chaussées aéronautiques et des aéronefs. Son objectif premier est de déterminer avec précision si les aéronefs peuvent opérer en toute sécurité sur les pistes, en fonction de leur classification. Ce projet aspire à mettre à disposition des compagnies aériennes l'application ACR ProTrack, laquelle sera compatible avec les systèmes Windows et iPad. Son déploiement contribuera à renforcer la sécurité des opérations aériennes en simplifiant le processus d'évaluation de l'admissibilité des aéronefs.

Mots-clés :

Les méthodes ACN/PCN, ACR/PCR ; les chaussées aéronautiques ; l'algorithme d'admissibilité ; ACR ProTrack.

Abstract

The objective of this study is to introduce the new ICAO ACR/PCR regulation, set to be in effect on November 28, 2024, as a replacement for the ACN-PCN method. Within this framework, we will be developing an application named ACR ProTrack, with the primary purpose of significantly streamlining the daily procedures conducted by BIA agents, controllers, and technical agents in aviation operations. This computer-based application has been strategically designed to augment both the efficiency and safety aspects of flight preparation processes.

ACR ProTrack is founded upon an eligibility algorithm that has been purposefully crafted to align with the ACR/PCR standards. It achieves this alignment by evaluating the distinctive attributes of aeronautical pavements and aircraft. Its central objective is to precisely ascertain whether aircraft can safely conduct operations on runways, contingent on their classification. This project's ultimate goal is to furnish airlines with the ACR ProTrack application, compatible with both Windows and iPad systems. The successful deployment of this application is poised to make a significant contribution to the fortification of aviation safety by simplifying the aircraft eligibility assessment process.

Keywords:

ACN/PCN methods, ACR/PCR ; aeronautical pavements ; eligibility algorithm ; ACR ProTrack.

Abréviations et acronymes

HWD: Heavy Weight Dual

MTOW: Maximum Takeoff Weight

DSWL: Charge sur roue simple

FAA: Federal Aviation Administration

MAGW: Maximum Allowable Gross Weight

FAARFIELD 2.0: Federal Aviation Administration's Rigid and Flexible Empirical Design Procedures for Airfield Pavements Version 2.0

CDF: Cumulative Damage Factor

CDFac: Cumulative Damage Factor for Asphalt Concrete

RDEC: Ratio of Dissipated Energy Change

COMFAA 3.0: Computer Program for the Federal Aviation Administration (Version 3.0)

ICAO-ACR 1.32: International Civil Aviation Organization - Aircraft Classification Number and Pavement Classification Number (Version 1.32)

MRW: Maximum Rolling Weight

CP : Coefficient de Pondération (Weighting Coefficient)

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale (ICAO en anglais)

ACN : Aircraft Classification Number

PCN : Pavement Classification Number

ACR : Aircraft Classification Rating

PCR : Pavement Classification Rating

ACR ProTrack : Application de suivi d'admissibilité des aéronefs

STAC : Service Technique en Aéronautique

SSLI : Service de Sauvetage et Lutte contre l'Incendie

RSE : Roue Simple Équivalente

RSI : Roue Simple Isolée

VS : Répartition de la Masse sur le Train d'Atterrissage Principal en %

ESG : Module d'élasticité (de Young) du terrain de fondation

BIA : Bureau International de l'Aviation Civile

CBR : California Bearing Ratio

Tables des figures

Figure I.1 couches des matériaux d'une chaussée souple -----	11
Figure I.2 couches des matériaux d'une chaussée rigide -----	4
Figure I.3 correction des ACN en fonction de la pression réelle q' de gonflage Des pneumatiques sur chaussée rigide -----	12
Figure II.1 l'épaisseur de référence pour l'ACR-----	28
Figure II.2 Schématisation de la procédure de calcul de DSWL et la définition de ACR. [15] -----	29
Figure II.3 Définition de la grille pour une disposition simple du train d'atterrissage principal [6]-----	36
Figure II.4 Définition de la grille pour les trains d'atterrissage principaux complexes [6].-----	37
Figure II.5 Représentation d'une grille de calcul située à l'interface couche de base/couche de fondation, et d'un point de calcul P (x_i, y_j, z_k). [8]-----	41
Figure II.6 CDF de l'aéronef, CDF total et contribution de l'aéronef au CDF maximal [6]-----	46
Figure III.1 Corrélation entre ACN et ACR pour la catégorie de couche de fondation : (a) A, (b) B, (c) C et (d) D-----	50
Figure III.2 Ratio de ACR/ACN. -----	51
Figure III.3 Comparaison des valeurs de ACN et de ACR des aéronefs avec une configuration à double roue pour la catégorie de couche de fondation D. [7] -----	52
Figure III.4 Comparaison des valeurs de ACN et de ACR des aéronefs avec une configuration à double roue pour la catégorie de couche de fondation C. [7]-----	52
Figure III.5 Comparaison des valeurs de ACN et de ACR des aéronefs avec une configuration à double roue pour la catégorie de couche de fondation B. [7]-----	53
Figure III.6 Comparaison des valeurs de ACN et de ACR des aéronefs avec une configuration à double roue pour la catégorie de couche de fondation A. [7] -----	53
Figure III.7 Coupe transversale de chaussée pour l'analyse de la réponse de la chaussée et l'analyse de la couche de fondation (CDF) [7].-----	54
Figure III.8 Variation de la contrainte verticale et de la CDF couche de fondation avec l'augmentation de l'ACN [7]. -----	55
Figure III.9 Variation de la contrainte verticale et de l'ACR avec l'augmentation de l'ACN [7]. -----	56
Figure III.10 Variation de la contrainte verticale et du CDF de la couche de fondation avec l'augmentation de l'ACR. [7]-----	56
Figure III.11 Coupe transversale du revêtement utilisée pour l'analyse de sensibilité. [7]-----	57
Figure III.12 résultats de comparaison entre PCN ET PCR [7] -----	59

Figure III.13 Coupe transversale de la chaussée de la piste d'atterrissage. [7]	62
Figure III.14 Valeurs ACN des avions pour la catégorie couche A comparées au PCN [7]	63
Figure III.15 Valeurs ACR des avions pour la catégorie A comparées au PCR [7].	63
Figure III.16 Coupe transversale de la chaussée de la piste d'atterrissage. [7]	65
Figure III.17 Valeurs ACN des avions pour la catégorie C comparées au PCN [7]	66
Figure III.18 Valeurs ACR des avions pour la catégorie D comparées au PCR. [7]	66
Figure IV.1 : Algorithme d'Admissibilité	74
Figure IV.2 base de données de ACR ProTrack	78
Figure IV.3 logo de l'application ACR ProTrack	79
Figure IV.4 interface utilisateur d'ACR ProTrack	80
Figure IV.5 interface de connexion d'ACR ProTrack	80
Figure IV.6 la notification de l'interface de connexion.	81
Figure IV.7 interface ACR ProTrack	81
Figure IV.8 Interface 'ADD a New Aircraft' affichant un message de réussite de l'enregistrement des données	82
Figure IV.9 Interface 'ADD a New Aircraft' affichant un message de l'échec de l'enregistrement des données à cause de la saisie de la masse.	82
Figure IV.10 Interface Principale de l'ACR Calculator	83
Figure IV.11 Notification résultant de la comparaison des pressions dans l'interface.	83
Figure IV.12 A321-100 déclaré comme aéronef admis pour un PCR de chaussée de 940, mais refusé pour un PCR de chaussée de 500.	84
Figure IV.13 Interface Principale pour Comparer ACR/PCR et Calcul d'ACR	84
Figure IV.14 Extrait du Code Source Implémentant le Programme de Calcul AC	85
Figure IV.15 Résultat du Calcul de l'ACR.	85
Figure IV.16 Conformément à l'algorithme d'admissibilité, une admission pour le B737-7 pour un PCR :560.	86
Figure IV.17 Conformément à l'algorithme d'admissibilité, les résultats affichent un refus pour l'A321-100 pour un PCR :350.	86

Liste des tableaux

Tableau I-1 Valeurs de P'/ P. Nombre limite de mouvements à la charge réelle P [4].	19
Tableau II-1: codes de résistance et caractéristiques des chaussées rigides et souples [6].	23
Tableau II-2 des catégories de pression maximale admissible des pneus [6]	24
Tableau II-3: types de méthodes d'évaluation [6]	24
Tableau II-4 Description des couches de la chaussée rigide [9]	27
Tableau II-5 structure de référence pour l'ACR souple (aéronef équipé de deux roues ou moins sur toutes les jambes du train principal)	30
Tableau II-6 structure de référence pour l'ACR souple (aéronef équipé de plus de deux roues sur toute jambe du train principal)	30
Tableau II-7 Ecart-types par section de chaussée [6]	40
Tableau II-8 Tableau schématique de la procédure recommandée de calcul de la PCR [6]	43
Tableau II-9 caractéristiques de la chaussée [6]	44
Tableau II-10 analyse des différents types d'aéronefs [6]	45
Tableau II-11 ACR et masses opérationnelles des aéronefs [6]	45
Tableau III-1 Les caractéristiques de charge des aéronefs . [7]	58
Tableau III-2 la flotte d'aéronefs que La chaussée était censée supporter annuellement [7]	62

Tables des matières

<u>REMERCIEMENTS</u>	3
<u>DEDICACE</u>	6
<u>RESUME</u>	7
<u>ABSTRACT</u>	8
<u>ABREVIATIONS ET ACRONYMES</u>	8
<u>TABLES DES FIGURES</u>	11
<u>Liste des Tableaux</u>	13
<u>INTRODUCTION GENERALE</u>	1
 Chapitre I : Les Principes Fondamentaux des Chaussées Aéroportuaires et l'Approche ACN-PCN	
I. INTRODUCTION :	3
I.1 CHAUSSÉES AÉROPORTUAIRES : FONDEMENTS ET FONCTIONS	3
I.1.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES CHAUSSÉES AÉROPORTUAIRES :	3
I.1.1.1 Différents types de chaussées :	3
A. Chaussées Souples :	3
B. Chaussées Rigides :	4
I.1.2 DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES :	4
I.1.3 ÉVALUATION ET ENTRETIEN DES CHAUSSÉES :	4
I.1.4 AUSCULTATIONS DES CHAUSSÉES :	6
I.1.4.1 La portance des chaussées :	6
I.1.4.2 L'adhérence des chaussées :	7
I.1.5 PARTICULARITÉS DES CHAUSSÉES AÉRONAUTIQUES :	7
I.2 HISTORIQUE ET DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE ACN-PCN :	8
I.3 PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA MÉTHODE ACN-PCN :	8
I.4 LA MÉTHODE ACN-PCN :	9
I.4.1 NUMÉRO DE CLASSIFICATION DE CHAUSSÉE (PCN) :	9
I.4.1.1 Type de chaussée pour la détermination des numéros ACN et PCN :	9
I.4.1.2 Catégorie de résistance du terrain de fondation :	9
I.4.1.3 Catégorie de pression maximale admissible des pneus :	10
I.4.1.4 Méthode d'évaluation :	10
I.4.2 NUMÉRO DE CLASSIFICATION D'AÉRONEF (ACN) :	11
I.4.2.1 Calcul d'ACN :	11
I.4.2.2 Cas de Chaussées souples	12
I.4.2.3 Cas de Chaussées rigides	12

I.4.3	LE CALCUL DU PCN :	14
I.4.3.1	Le calcul du PCN se décline en deux approches :	14
I.4.3.2	Calcul de l'ACNi correspondant à la charge Poi:	15
I.5	CONDITIONS D'ADMISSIBILITÉ D'UN AÉRONEF SUR LES CHAUSSÉES AÉRONAUTIQUES.....	17
I.5.1	ADMISSIBILITÉ D'UN AÉRONEF :	17
I.5.1.1	Pressions limites :	17
I.5.1.2	Charge admissible des avions :	17
I.5.1.3	Cas de dépassement du PCN :	17
I.6	LIMITATIONS ET LACUNES IDENTIFIÉES DANS LA MÉTHODE ACN-PCN :	19
I.7	CONCLUSION :	21

Chapitre II: Transition vers la Méthode ACR/PCR

II.	INTRODUCTION :	22
II.1	VERS LE SYSTÈME ACR-PCR : TRANSITION EN TROIS ÉTAPES :	22
II.1.1	CALENDRIER ET ADOPTION DU SYSTÈME ACR-PCR	22
II.2	MÉTHODE ACR-PCR :	23
II.2.1	ACR ET PCR :	23
II.2.2	DÉTERMINATION DE LA VALEUR NUMÉRIQUE DU ACR :	25
II.2.2.1	Chaussées rigides :	26
II.2.2.2	Chaussées souples :	29
II.2.3	DÉTERMINATION DE LA VALEUR NUMÉRIQUE DU PCR :	38
II.2.4	PROCÉDURE STANDARD POUR DÉTERMINER ET PUBLIER LES PCR EN UTILISANT LE CONCEPT DE CDF : 39	
II.2.4.1	Concept de CDF :	39
II.2.4.2	Déviations latérales :	40
II.2.4.3	Calcul de l'endommagement en cas de déviation latérale [8] :	41
II.2.5	DÉTERMINATION DE L'ENDOMMAGEMENT CUMULÉ POUR LE TRAFIC COMPOSÉ [8] :	41
II.2.6	CATÉGORIE DE TERRAIN DE FONDATION POUR LE PCR :	42
II.3	RÉSUMÉ ALGORITHMIQUE DE LA PROCÉDURE POUR CALCULER LE PCR :	43
II.4	CONCLUSION :	47

Chapitre III : Analyse Comparative des Méthodes ACN-PCN et ACR-PCR pour l'Évaluation des Chaussées d'Aéroport : Mise en Œuvre, Avantages, et Conclusions

III.	INTRODUCTION :	48
III.1	BILAN DES SYSTÈMES ACR-PCR POUR LES CHAUSSÉES D'AÉROPORT :	48
III.1.1	COMPARAISON ENTRE PCN ET PCR POUR LES CHAUSSÉES AÉROPORTUAIRES :	48
III.1.2	MÉTHODE DE LA FAA POUR LA DÉTERMINATION DU PCR [7] :	49
III.1.3	INDICE CDF ET COUVERTURES :	49
III.1.3.1	Comparaison ACN-ACR	50
III.1.3.1.1	Méthodologie de l'Étude :	54
III.1.3.2	Comparaison PCN-PCR :	57
III.1.3.3	Impact de la PCR non restreinte:	60
III.1.3.4	Mise en œuvre des procédures de rapport ACN-PCN et ACR-PCR [7]:	61

III.1.3.4.1 Estimation du PCN et du PCR	62
III.1.3.4.2 Estimation du PCN et de PCR :	65
III.2 AVANTAGES, MODIFICATIONS ET OBJECTIFS DE LA MÉTHODE ACR/PCR :.....	68
III.2.1 AVANTAGES DE LA MÉTHODE ACR-PCR :.....	68
III.2.2 MODIFICATIONS À APPORTER :.....	69
III.2.3 LES OBJECTIFS GÉNÉRAUX DE LA MÉTHODE ACR-PCR :.....	70
III.3 CONCLUSION :	70

Chapitre IV: Développement de l'Application ACR ProTrack

IV. INTRODUCTION :.....	71
IV.1 DESCRIPTIONS DE L'ALGORITHME D'ADMISSIBILITÉ INTÉGRÉ À L'APPLICATION :	71
IV.1.1 CONDITIONS D'ADMISSIBILITÉ D'UN AÉRONEF SUR LES CHAUSSÉES AÉRONAUTIQUES :.....	72
IV.1.2 ALGORITHME D'ADMISSIBILITÉ INTÉGRÉ À L'APPLICATION :.....	74
IV.2 OUTILS DE DÉVELOPPEMENT WEB UTILISÉ :.....	75
IV.2.1 MYSQL :	75
IV.2.2 PYTHON 3 : UN LANGAGE DE PROGRAMMATION PUISSANT POUR WINDOWS ET IPAD	75
IV.2.2.1 Caractéristiques Principales :.....	76
IV.2.3 QT DESIGNER : CRÉEZ DES INTERFACES UTILISATEUR VISUELLEMENT.....	76
IV.2.3.1 Caractéristiques Principales :.....	76
IV.3 PRÉSENTATION DE L'APPLICATION ACR PROTRACK ET DE SON OBJECTIF.....	77
IV.3.1 LA POLYVALENCE D'ACR PROTRACK.....	77
IV.4 MODÉLISATION, CONCEPTION ET LA MISE EN FORME DE L'APPLICATION ACR PROTRACK : .	78
IV.4.1 WORKFLOW :	78
IV.4.1.1 Présentation d'une partie de base de données MySQL :	78
IV.4.2 ACR PROTRACK :	79
IV.5 CONCLUSION :	87
<u>CONCLUSION GENERALE</u>.....	88
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	88
<u>Les ANNEXES</u>.....	92

I NTRODUCTION GENERALE

"Quand le besoin se fait sentir, la créativité se réveille." Cette maxime prend tout son sens dans le domaine de l'aviation, où la sécurité des opérations aériennes dépend en grande partie de la qualité des chaussées des aérodromes. Ces surfaces pavées, qui soutiennent les aéronefs lors de l'atterrissage et du décollage, sont un maillon essentiel de l'infrastructure aéroportuaire, garantissant le bon fonctionnement des opérations aériennes.

En l'absence de capacité portante adéquate, des problèmes coûteux de maintenance et de réhabilitation surviennent, impactant Ces dernières décennies, l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) a promu le système ACN-PCN pour évaluer la capacité portante des chaussées. Cependant, malgré sa simplicité, ce système a montré des lacunes et des incohérences dans son application mondiale.

Face à ces défis, une transition majeure est en cours avec la création du système ACR-PCR par la Commission européenne. Cette nouvelle méthode, qui entrera en vigueur le 28 novembre 2024, intègre les dernières avancées en conception et évaluation des chaussées aéroportuaires.

Ce mémoire se concentre sur cette transition vers la méthode ACR-PCR, en mettant en lumière ses avantages et ses implications pour l'industrie aéroportuaire. Nous explorerons également le développement d'une application informatique, ACR ProTrack, conçue pour faciliter la mise en œuvre de cette nouvelle réglementation en simplifiant l'évaluation de l'admissibilité des aéronefs sur les pistes.

Nous analyserons en profondeur les différences entre l'ACN-PCN et l'ACR-PCR, en nous penchant sur leurs avantages et leurs impacts potentiels. Cette transition représente un tournant significatif dans l'évaluation et la gestion des chaussées aéroportuaires, avec des implications majeures pour l'efficacité et la sécurité des opérations aéroportuaires. "considérablement les ressources financières des aéroports.

Cette transition de l'ancienne méthode ACN-PCN vers la nouvelle méthode ACR-PCR pose des questions fondamentales. **Quels sont les avantages et les inconvénients de ce changement de méthode ? Comment cette transition peut-elle influencer la sécurité et l'efficacité des opérations aéroportuaires ?** De plus, **comment le développement de l'application ACR ProTrack peut-il faciliter cette transition et améliorer la gestion des chaussées ?** Ces questions sont au cœur de notre recherche et guideront notre analyse approfondie de la transition vers la méthode ACR-PCR.

Chapitre I :

Les Principes Fondamentaux des
Chaussées Aéroportuaires et l'Approche
ACN-PCN

I. Introduction :

Les chaussées aéroportuaires sont le fondement de la sécurité et de la fiabilité des opérations aériennes mondiales. Ce premier chapitre, "Fondements de la Méthode ACN-PCN," explore les particularités des chaussées aéronautiques. Nous examinerons leur rôle essentiel, en comprenant pourquoi ces surfaces sont bien plus que de simples revêtements. Cette base servira à comparer la méthode ACN-PCN avec l'ACR-PCR dans les chapitres suivants.

I.1 Chaussées Aéroportuaires : Fondements et Fonctions

I.1.1 Présentation générale des chaussées aéroportuaires :

Les chaussées aéronautiques représentent l'ensemble des aires sur lesquelles circulent, manœuvrent et stationnent des avions [1].

I.1.1.1 Différents types de chaussées :

On distingue principalement deux types de chaussées : les chaussées souples et les chaussées rigides. Par le jeu des renforcements successifs, d'autres cas complexes se présentent (couches bitumineuses sur dalles en béton, superposition de dalles de béton) [1].

A. Chaussées Souples :

On appelle chaussées souples, les chaussées constituées principalement de couches de matériaux traités aux liants hydrocarbonés (matériaux bitumineux) qui reposent sur des couches de matériaux non traités. Le dimensionnement de ce type de chaussées est basé sur l'hypothèse que l'endommagement de la chaussée proviendrait de la rupture du sol support [1]

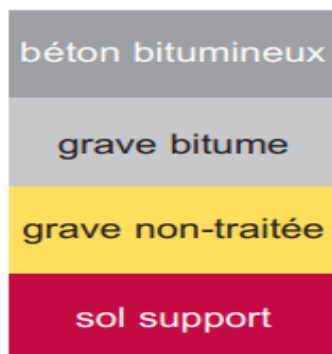


Figure I.1 couches des matériaux d'une chaussée souple

B. Chaussées Rigides :

On appelle chaussées rigides, des chaussées comportant en couche supérieure des matériaux traités au liant hydraulique (béton de ciment essentiellement). La nature du béton hydraulique fait que la rigidité des dalles qui constituent la partie supérieure de la chaussée protège le sol support des sollicitations mécaniques. La rupture de la chaussée s'amorce en premier lieu dans la dalle par excès de contraintes [1].

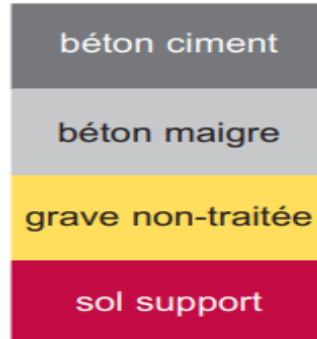


Figure I.2 couches des matériaux d'une chaussée rigide

I.1.2 Dimensionnement des chaussées :

Le dimensionnement des chaussées a pour objet d'établir l'épaisseur et la nature des différentes couches nécessaires à l'accueil d'un trafic attendu. La méthode française de dimensionnement des chaussées aéronautiques s'appuie, pour les chaussées souples, sur l'équation CBR (Californian Bearing ratio) et pour les chaussées en béton de ciment, sur les équations de Westergaard. Contrairement à la méthode suivie pour dimensionner les chaussées routières, il n'existe pas d'essieu de référence dans le domaine aéronautique.

L'atterrisseur principal de chaque avion (roue simple isolée - RSI, tandem ou boggie) est ramené à une roue simple équivalente (RSE) produisant les mêmes effets sur la chaussée. La durée de vie retenue pour une chaussée souple est de 10 ans, contrairement à une chaussée rigide qui elle, est dimensionnée pour une durée de vie de 20 ans [1]

I.1.3 Évaluation et entretien des chaussées :

L'évaluation des chaussées aéronautiques doit s'intéresser à la fois à leurs caractéristiques structurelles et à leurs caractéristiques fonctionnelles [1].

A. Indice de service :

Les chaussées aéronautiques doivent être régulièrement évaluées afin de suivre leur évolution. Pour cela, l'inspection visuelle permet d'apprécier rapidement d'éventuels problèmes d'intégrité de surface ou de structure. On attribue un indice de service défini par un indicateur numérique représentatif de l'état de la chaussée [1].

Il prend des valeurs comprises entre 0 (chaussée hors service) et 100 (chaussée neuve). Ainsi, l'indice croît avec le niveau de service offert. La procédure utilisée pour déterminer cet indice consiste à enregistrer, pour une section donnée de chaussée, les dégradations observées et codifiées conformément aux recommandations du Catalogue des dégradations éditées par le STAC [1].

Chaque zone se voit attribuer une note fonction des dégradations relevées, elles-mêmes caractérisées à l'aide des d'informations suivantes :

- le type de dégradation (22 types retenus pour les chaussées souples, 10 pour les chaussées rigides)
- le niveau de gravité : léger, moyen, ou élevé ;
- la densité de dégradation dans la zone relevée, densité mesurée par une surface caractéristique de chaque type de dégradation.
- La fréquence optimale des relevés est d'une fois par an pour l'ensemble des aires.
- L'analyse en détail de zones homogènes permet donc de repérer celles présentant des Problèmes d'intégrité de surface ou de structure, pouvant conduire à des travaux d'entretien ou à l'intervention des appareils d'auscultation des chaussées.

B. Entretien des chaussées :

L'entretien général des chaussées aéronautiques recouvre principalement les opérations suivantes [1] :

- ✓ Le balayage,
- ✓ L'entretien des marques de balisage,
- ✓ Le dégommeage (enlèvement de la gomme provenant des pneumatiques des avions) par jet d'eau haute pression, sablage ou grenailage,
- ✓ Réparation des dégradations superficielles,
- ✓ Scellement de fissures - réfection de joints

I.1.4 Auscultations des chaussées :

I.1.4.1 La portance des chaussées :

La portance des chaussées peut être mesurée à l'aide de deux types d'appareils :

a) Heavy Wight Réflectomètre (HWD) :

Est un appareil léger utilisé pour mesurer l'impact d'une charge roulante sur une chaussée. Il simule cette charge en appliquant un chargement impulsif sur une plaque circulaire, mesurant ensuite la déformation résultante de la chaussée à l'aide d'un capteur d'effort.

La force de la charge est ajustée en fonction de la chaussée testée, et l'appareil peut fonctionner à la fois sur chaussée sèche et sous un film d'eau de 1 mm grâce à un système de mouillage intégré. D'autres appareils similaires, dotés de systèmes auto-mouillants, sont également disponibles pour des mesures similaires [1].

b) La remorque :

La portance du STAC permet une auscultation lourde, et a pour principe d'appliquer sur la chaussée, à l'aide d'un vérin, une charge comparable à celle d'une roue d'avion. La charge admissible de la chaussée est déduite directement par l'analyse de la réponse de la chaussée sous l'application répétée d'une charge.

Le matériel d'essai est constitué d'un tracteur et d'une remorque La remorque sert de massif de réaction pour les essais. Elle est pourvue de deux caissons de 20 m³ servant de lest qui porte sa masse à 60 tonnes [1].

Cas des chaussées souples :

C'est le comportement à la fatigue du complexe chaussée/sol de fondation qui est étudié. La chaussée est soumise à des cycles de chargement/déchargement sous des charges croissantes en mesurant pendant chaque cycle les déformations de la chaussée [1].

Cas des chaussées rigides :

Le principe consiste à déterminer la charge produisant une déformation à la flexion égale à la déformation admissible du béton. L'essai est réalisé à l'endroit le plus fragile, et l'expérience montre qu'il s'agit généralement du coin de dalle [1].

I.1.4.2 L'adhérence des chaussées :

L'adhérence entre les pneumatiques d'un avion et la piste est essentielle pour la sécurité des opérations aériennes. Pour mesurer cette adhérence sur une chaussée mouillée, le STAC et Aéroports de Paris ont développé l'Instrument de mesure automatique de glissance (IMAG).

Il s'agit d'une remorque équipée d'une troisième roue lestée, tractée sur la chaussée. En mesurant la force nécessaire pour faire glisser cette roue, on détermine le coefficient de frottement longitudinal, crucial pour assurer la sécurité des atterrissages, du roulage et du freinage des avions [1].

I.1.5 Particularités des chaussées aéronautiques :

A. Charges appliqué:

- Pas de limitation de charges, pouvant aller jusqu'à 25-30 tonnes à la roue.
- Les pressions des pneumatiques peuvent atteindre plus de 1,5 MPa (15 bars) pour certains types d'aéronefs.
- Sur les pistes, dont la largeur peut atteindre plus de 45 m, le trafic est dispersé et la configuration des atterrisseurs variables d'un avion à l'autre. [1]
- Sur les voies de dégagement ou de manœuvres les charges sont moins dispersées.

B. Vitesses variables :

- très faibles, générant des phénomènes de poinçonnement important sur la couche superficielle.
- très élevées, notamment au décollage et à l'atterrissage (supérieures à 300 km/h).
- Très faible circulation de charges diverses qui induit une fatigue due à une répétition restreinte de charges lourdes (de l'ordre de 10 000 répétitions) engendrant de grandes déformations. [1]

C. Particularités:

- L'état de la surface de la piste est essentiel pour la sécurité des avions lorsqu'ils roulent à grande vitesse.
- La rugosité de la piste peut varier en raison de l'accumulation de gomme.
- Il est souvent difficile d'effectuer des travaux d'entretien sur la piste en raison du trafic aérien continu et des contraintes de sécurité. [1]

- Pourcentage des pentes à respecter :
 - Profil en long piste $\leq 1,5 \%$
 - Profil en travers piste $\leq 1,5 \%$
 - Pente transversale voies de relation $\leq 1,5 \%$
 - Pente poste de stationnement $\leq 1 \%$ dans toutes les directions

I.2 Historique et développement de la méthode ACN-PCN :

La méthode ACN/PCN, élaborée par l'OACI depuis 1983, permet d'évaluer la compatibilité des avions avec les chaussées aéroportuaires. L'ACN représente l'impact d'un avion sur une chaussée, tandis que le PCN indique la capacité portante de la chaussée. Un avion dont l'ACN est inférieur ou égal au PCN de la chaussée peut l'utiliser sans restriction.

Cette méthode a été initiée dans les années 1950, notamment avec l'introduction du DC-8-50 en 1958, nécessitant des revêtements plus résistants. La FAA a limité le développement d'aéronefs stressant les chaussées, mais cette politique a été levée en 1995, entraînant une croissance. Aujourd'hui, la méthode ACN-PCN est cruciale pour la gestion des revêtements aéroportuaires, assurant la sécurité et l'efficacité des opérations mondiales. [14].

I.3 Principes fondamentaux de la méthode ACN-PCN :

1) Classification des chaussées PCN :

Chaque chaussée se voit assigner un numéro de classification de chaussée (PCN) qui représente sa capacité à supporter la charge des aéronefs d'où La méthode ACN/PCN classe les chaussées aéronautiques en fonction de leur résistance structurelle [4].

2) Détermination de l'ACN :

Pour chaque type d'aéronef en fonction de ses caractéristiques géométriques, de sa MTOW et de la répartition de sa charge L'ACN est calculé. Ce dernier représente l'effet de charge que l'aéronef exerce sur la chaussée [4].

3) Comparaison ACN/PCN : Une fois que l'ACN et le PCN sont déterminés, une comparaison est effectuée pour évaluer si la chaussée est adéquate pour accueillir l'aéronef en question, les résultats de la comparaison vont être évalués comme suivant :

4) Si $ACN \leq PCN$: l'aéronef peut manœuvrer sur la chaussée sans restriction, alors l'aéronef est considéré comme admissible.

5) Sinon, l'aéronef peut néanmoins être accepté sous certaines conditions.

I.4 La méthode ACN-PCN :

I.4.1 Numéro de classification de chaussée (PCN) :

Les spécifications de l'O.A.C.I. sur les renseignements à communiquer sur la résistance des chaussées résident dans les huit points suivants [11] :

1. La force portante d'une chaussée devra être déterminée.
2. La force portante d'une chaussée destinée à des aéronefs dont la masse sur l'aire de trafic est supérieure à 5 700 kg sera communiquée au moyen de la méthode ACN-PCN en indiquant tous les renseignements suivants :
3. Numéro de classification de chaussée (PCN).
4. Type de chaussée considéré pour la détermination des numéros ACN-PCN.
5. Catégorie de résistance du terrain de fondation

I.4.1.1 Type de chaussée pour la détermination des numéros ACN et PCN :

Type de chaussée	Lettre de code
Chaussée rigide	R
Chaussée souple	F

I.4.1.2 Catégorie de résistance du terrain de fondation :

Catégorie de résistance	Caractérisée par :		Représentant toutes les valeurs de :		Lettre de code
	Valeur K (MN/m ³)	Valeur CBR	Chaussées rigides Valeur K (MN/m ³)	Chaussées souples Valeur CBR	
Résistance élevée	K = 150	CBR = 15	K > 120	CBR > 13	A
Résistance moyenne	K = 80	CBR = 10	60 < k < 120	8 < CBR < 13	B
Résistance faible	K = 40	CBR = 6	25 < k < 60	4 < CBR < 8	C
Résistance ultra faible	K = 20	CBR = 3	K < 25	CBR < 4	D

I.4.1.3 Catégorie de pression maximale admissible des pneus :

Catégorie de pressions pneumatiques	Limite de pression	Lettre de code
Illimitée	Pas de limite de pression	W
Élevée	Pression limitée à 1,75 MPa	X
Moyenne	Pression limitée à 1,25 MPa	Y
Faible	Pression limitée à 0,50 MPa	Z

I.4.1.4 Méthode d'évaluation :

Méthode d'évaluation	Lettre de code
<i>Évaluation technique</i> : étude spécifique des caractéristiques de la chaussée et utilisation de techniques d'étude du comportement des chaussées.	T
<i>Évaluation faisant appel à l'expérience acquise sur les avions</i> : connaissance du type et de la masse spécifiques des avions utilisés régulièrement et que la chaussée supporte de façon satisfaisante.	U

Les exemples ci-après illustrent la façon dont les données sur la résistance des chaussées sont communiquées selon la méthode ACN-PCN.

Exemple 1 : Si la force portante d'une chaussée rigide reposant sur un terrain de fondation de résistance moyenne a, par évaluation technique, été fixée à PCN = 80 et s'il n'y a pas de limite de pression des pneus, les renseignements communiqués seront les suivants [11] :

$$PCN = 80 / R / B / W / T$$

Exemple 2 : Si la force portante d'une chaussée composite, qui se comporte comme une chaussée souple et qui repose sur un terrain de fondation de résistance élevée a été évaluée, selon l'expérience acquise sur les avions, à PCN = 50 et que la pression maximale admissible des pneus soit de 1,25 MPa, les renseignements communiqués seront les suivants [11] :

$$PCN = 50 / F / A / Y / U$$

I.4.2 Numéro de Classification d'Aéronef (ACN) :

Les valeurs des ACNs pour les principaux avions sont publiées, indiquant leur capacité à opérer sur différentes catégories de chaussées et sous des conditions de gonflage des pneus spécifiques. Pour une variété d'aéronefs couramment utilisés dans le monde [4].

Exemple 3 : Voici un Exemple d'un tableau ACR [3]

Les ACN caractéristiques du B737-300 sont visualisés de la manière suivante :

Aircraft	Weight Max/Min [kg]	Load on one main gear [%]	Tire Pressure [MPa]	Flexible Pavement Subgrades CBR [%]				Rigid Pavement Subgrades k [MPa/m]				$\frac{ST}{SB}$ [cm]
				High A 15	Medim B 10	Low C 6	V.Low D 3	High A 150	Medim B 80	Low C 40	V.Low D 20	
B737-300	623000	45.9	1.40	35	37	41	45	40	42	44	46	
	325000			16	17	18	21	19	20	21	22	

Masse maximale au roulage M (kg)

Masse à vide en ordre d'exploitation m (kg)

Pression standard des pneumatiques q (MPa)

Valeurs des ACN caractéristiques pour une chaussée souple (code F) et pour une catégorie de résistance du sol support élevée (code A)

Pourcentage de répartition de la charge totale sur l'atterrisseur principal Vs (%)

I.4.2.1 Calcul d'ACN :

Pour le calcul de l'ACN équivalent ou un avion de masse réelle totale M_t et de pression réelle des pneumatiques q' fréquentant une chaussée pour laquelle un PCN est publié. D'où, Le tableau des ACN (caractéristiques) fournit pour l'avion, selon le type de chaussée et la catégorie de sol support indiqués dans la publication du PCN, les données suivantes [4] :

- ACN max : ACN correspondant à la masse maximale au roulage (M)
- ACN min : ACN correspondant à la masse à vide en ordre d'exploitation (m)
- q : pression standard de gonflage des pneumatiques.

Le calcul de l'ACN se fait par une simple interpolation comme suivant :

$$ACN = ACN_{min} - (ACN_{max} - ACN_{min}) \times \frac{(M - M_t)}{(M_{max} - M_{min})} \quad (1)$$

- Si la pression effective de gonflage des pneumatiques q' diffère sensiblement de la pression standard q ($q' - q > 0,1 \text{ MPa}$), une correction doit être réalisée selon les Indications suivantes :

I.4.2.2 Cas de Chaussées souples

La formule suivante est appliquée

$$ACN \text{ corrigé} = ACN * \frac{\frac{1}{0,5695CBR} - \frac{1}{32,035q'}}{\frac{1}{0,5695CBR} - \frac{1}{32,035q}} \quad (2)$$

I.4.2.3 Cas de Chaussées rigides

L'abaque ci-après est utilisé :

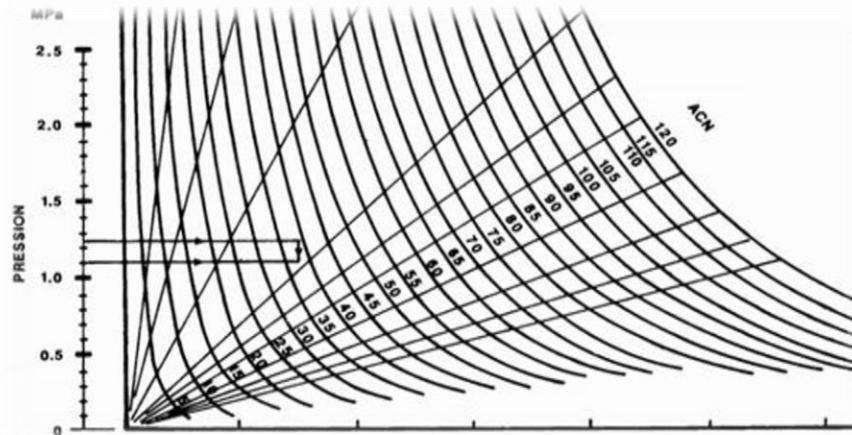


Figure I.3 correction des ACN en fonction de la pression réelle q' de gonflage Des pneumatiques sur chaussée rigide

Exemple 4: Un avion de type Boeing 737-800 est prévu à une masse réelle de 570 tonnes pour une pression effective de gonflage des pneumatiques q' de 1,0 MPa sur une piste pour laquelle les renseignements sont communiqués par PCN = 40 R/B/W/T.

Cette publication permet de caractériser la chaussée :

Code R : chaussée rigide.

Code B : catégorie de résistance du sol support moyenne.

Code W : pas de limite de pression des pneumatiques.

Code T : évaluation technique du PCN.

Le tableau des ACN caractéristiques fournit (chaussée rigide, catégorie B de résistance du sol support) pour l'avion les données suivantes [3] :

Type d'avion	Masses (kg)		Vs (%)	q (MPa)	ACN											
	Maximale (M)	Minimale (m)			Chaussée souple				Chaussée rigide							
					A	B	C	D	A	B	C	D				
B737-800	777000	406000	/	1.47	44	46	51	56	51	53	56	57	24	25	26	27

- ACN max = 53
- ACN min = 25
- Masse maximale au roulage : M = 777000 kg
- Masse à vide en ordre d'exploitation : m = 406000 kg
- Pression standard des pneumatiques : q = 1,47 MPa

L'ACN de l'avion pour la pression standard de gonflage des pneumatiques à sa masse réelle se déduit de la relation de calcul d'ACR :

$$ACN = 53 - (53 - 25) * \frac{777000 - 570000}{777000 - 406000} = 37.366 \approx 37$$

Les pressions réelle et standard de gonflage des pneumatiques diffèrent sensiblement ($q' = 1,0 \text{ MPa}$, $q = 1,47 \text{ MPa}$). Il convient de procéder à une correction de l'ACN suivant l'abaque correspondant (figure I.4) :

$$\text{ACN corrigé} = 37$$

L'ACN de l'avion (37) est inférieur au PCN de la piste (40). L'avion peut donc être admis sans restriction.

- ➔ **Si**, La différence entre la pression réelle $q' - q < 0,1 \text{ MPa}$ (négligeable). Une correction de l'ACN en fonction de la pression ne sera pas requise et l'ACN de l'avion est finalement égal à 37.
- ➔ **Si l'ACN > PCN** de la piste (40) ; l'avion ne peut donc pas être admis sans restriction et une étude particulière doit être menée au niveau de l'autorité aéroportuaire pour juger de l'octroi d'une éventuelle autorisation

I.4.3 Le calcul du PCN :

Le processus de calcul des PCN vise à fournir des charges admissibles pour les chaussées aéroportuaires, en remplaçant les charges par des atterrisseurs types. Pour ce faire, une connaissance précise des caractéristiques du sol support et de la chaussée est essentielle, incluant le CBR pour les chaussées souples et le module de réaction corrigé du sol support ainsi que d'autres paramètres pour les chaussées rigides [4].

I.4.3.1 Le calcul du PCN se décline en deux approches :

- 1) **Calcul approché** : Le PCN est déterminé en se basant uniquement sur les caractéristiques de la chaussée, sans prendre en compte le trafic. Il constitue une estimation de la capacité portante de la chaussée et peut être utilisé en l'absence de données de trafic [4].
 - 2) **Calcul optimisé** : Cette méthode prend en compte à la fois les caractéristiques de la chaussée et le trafic auquel elle est destinée. Elle cherche à obtenir un PCN plus adapté au trafic réel en considérant les ACN de chaque avion et leur pondération en fonction de leur part dans le trafic équivalent [4].
- Le processus de calcul optimisé comprend plusieurs étapes, notamment la collecte de données sur la chaussée et le trafic, le calcul des charges admissibles pour chaque avion, et la

pondération des charges en fonction de leur impact sur la chaussée (annexe 2). Cette méthode vise à obtenir un PCN qui reflète plus précisément les conditions de la chaussée et du trafic [4].

- Le calcul des PCN vise à déterminer des charges admissibles pour les chaussées aéroportuaires en remplaçant les charges par des atterrisseurs types, en tenant compte des caractéristiques de la chaussée et du trafic. Cela garantit que l'admissibilité des avions et les autorisations ne diffèrent pas lors du passage de la méthode par atterrisseurs types à la méthode ACN-PCN [4].

I.4.3.2 Calcul de l'ACNi correspondant à la charge Poi:

Choix de la catégorie de résistance du sol support conformément à la codification de l'O.A.C.I. [4] :

A. Calcul de l'ACNi :

L'ACN pour la charge P_{oi} (ou P_{oi}/C_p) considérée a pour expression [4] :

$$ACNi = ACNi\ max - (ACNi\ max - ACNi\ min) * \frac{Poi - mi}{Mi - mi} \quad (3)$$

P_{toi} : charge totale admissible, égale à P_{oi}/p_i (ou $P_{oi}/C_p/p_i$),

p_i : pourcentage de répartition de la charge totale sur l'atterrisseur principal(vs%),

M_i : masse maximale au roulage MRW,

mi : masse à vide en ordre d'exploitation DOW.

B. Calcul final du PCN :

Le PCN est donné par la relation suivante :

$$PCN = ACN1.t1 + ACN2.t2 + ... + ACNn.tn \quad (4)$$

Ce PCN traduit une bonne connaissance des caractéristiques de la chaussée et reflète sa portance réelle. Il doit donc être publié avec la lettre de code T [4].

- Le calcul des PCN implique des considérations importantes, notamment [4] :
- Le PCN est déterminé en comparant les ACN des avions, qui tiennent compte de leur charge réelle, ce qui diffère de la détermination théorique du PCN basée sur une charge admissible sur 10 ans.
 - Certaines situations peuvent conduire à des avions ayant un ACN supérieur à leur charge admissible, ce qui pourrait sembler dépasser les limites de la chaussée.
 - Une approche consiste à prendre en compte le trafic réel total et à calculer les ACN des avions significatifs en fonction de leur charge réelle.
 - Ensuite, la valeur maximale des ACN est divisée par 1.1 pour les chaussées souples et par 1.05 pour les chaussées rigides pour obtenir le PCN de la chaussée, sauf si le PCN calculé de manière optimisée est plus élevé.
 - Cela garantit que tous les avions du trafic de référence ont un ACN inférieur ou égal à 1.1PCN pour les chaussées souples et à 1.05PCN pour les chaussées rigides.
 - Toutefois, il existe des risques associés à la publication d'un tel PCN, car cela pourrait permettre l'acceptation d'avions dont l'ACN est inférieur au PCN retenu mais supérieur au PCN calculé de manière optimisée.
 - De plus, une augmentation du trafic des avions contraignants peut être acceptée dans la limite de 5%.
 - Il est donc crucial de vérifier régulièrement l'admissibilité du trafic total lors de modifications ou d'augmentations du trafic de référence pour assurer la sécurité des opérations.

Concernant les PCN publiés par expérience :

- Les PCN obtenus à partir du calcul approché ou du calcul optimisé reflètent une bonne connaissance des caractéristiques de la chaussée et sont publiés avec la lettre de code U.
- Dans certaines situations où les caractéristiques de la chaussée sont mal connues, notamment si la chaussée n'a jamais été évaluée ou si elle a changé avec le temps, le PCN est déterminé en se basant sur l'expérience du trafic, l'ACN de l'avion le plus critique utilisant la chaussée, et l'état des chaussées.
- Le PCN ainsi obtenu est également publié avec la lettre de code U.

I.5 Conditions D'admissibilité D'un Aéronef Sur Les Chaussées

Aéronautiques

I.5.1 Admissibilité d'un aéronef :

I.5.1.1 Pressions limites :

Lorsque le PCN comporte une lettre de code indiquant une limitation de pression de gonflage des pneumatiques (code X, Y, Z), les avions dont la pression effective (q') dépasse la valeur limite (q_0) ne peuvent être admis sur la chaussée, quelle que soit leur charge [12].

I.5.1.2 Charge admissible des avions :

La méthode ACN/PCN est utilisée pour connaître les conditions de recevabilité sur une plateforme à sa charge réelle. Elle consiste en la comparaison de l'ACN de l'avion au PCN de la chaussée].

La charge admissible totale P_{to} d'un avion se calcule à partir du PCN par la relation [4] :

$$P_o = m + (M - m) \times \frac{PCN - ACN_{min}}{ACN_{max} - ACN_{min}} \quad (5)$$

Avec :

M : est la masse maximale au roulage

m : est la masse à vide en ordre d'exploitation.

ACN max : Valeur d'ACN correspondant à la masse maximale au roulage M ;

ACN min : Valeur d'ACN correspondant à la masse vide en ordre d'exploitation m ;

Pour le type de chaussée et la catégorie de résistance du sol support communiqués dans le PCN (Tableau des ACN)

I.5.1.3 Cas de dépassement du PCN :

Deux cas sont à considérer comme suivant :

Cas 1:

- ✓ **PCN < ACN ≤ 1,1 PCN pour les chaussées souples**
- ✓ **PCN < ACN < 1,05 PCN pour les chaussées rigides**

Dans ce **cas 1**, l'avion peut être autorisé sous réserve que le nombre annuel **n** de mouvements réels en surcharge n'excède pas **5 %** du total annuel des mouvements réels contenus dans le trafic de référence **Nr** [12]

Nr = nombre total des mouvements réels des avions pris en compte dans le trafic de référence.

$$n \leq 0,05 Nr \quad (6)$$

- Si d'autres avions ont auparavant subi la même procédure, il convient d'inclure dans **n** leur nombre de mouvements réels [12].
- Si la règle des **5%** n'est plus respectée, il convient de calculer le trafic équivalent total et de suivre alors la procédure du **cas 2** [12].

Calcul de l'ACN équivalent à la masse réelle (Mt) :

$$ACN = ACN_{min} - (ACN_{max} - ACN_{min}) \times \frac{(M - Mt)}{(M_{max} - M_{min})} \quad (1)$$

Où **M_{min}** et **M_{max}** représentent respectivement la masse à vide opérationnelle et la masse maximale au roulage, **ACN_{min}** et **ACN_{max}** représentant les ACN correspondants [12].

Ou condition précédente non respectée [12]

Cas 2 :

- ✓ **ACN > 1,1 PCN pour les chaussées souples**
- ✓ **ACN > 1,05 PCN pour les chaussées rigides**

- Si le PCN est affecté du code **U**, la méconnaissance des caractéristiques de la chaussée devrait, sauf atterrissage d'urgence, **inciter à refuser** l'avion.
- Si le PCN. Est affecté du code **T**, il convient de se ramener à la charge admissible **Po** du type d'avion considéré pour la chaussée, **charge admissible donne la relation** [12] :

On compare alors cette charge admissible **P_o** à la charge réelle prévue pondérée **P'** pour chaque aire concernée [12] on mentionner que :

$$P' = Mt \times Vs \times CP \quad (7)$$

P' représente la charge pondérée de l'avion, **Vs** c'est répartition de masse sur le train principal en %.

Donc :

- Si $P' \leq 1,1 P_0$ l'avion peut, toujours sur l'aire concernée, être accepté sous réserve de Respecter la règle des 5%,
- Si enfin $P' > 1,5 P_0$: l'autorisation d'atterrissage doit être **impérativement refusée** sauf urgence.
- Si $1,1 P_0 < P' < 1,5 P_0$ dans ce cas, il convient de calculer le trafic équivalent total journalier T' que supporte la chaussée :
 - Si $T' > 10$ mouvements équivalents par jour, l'atterrissage **doit être refusé** à moins d'admettre une usure rapide des chaussées.
 - Si $T' \leq 10$ mouvements équivalents par jour, l'avion **peut être autorisé à sa charge réelle P_0 mais en limitant sa fréquence** aux valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous [4] :

Valeurs de P'/ P. Nombre	Valeurs de P'/ P. Nombre limite de mouvements à la charge réelle P	Suivi des chaussées
1,1	2 par jour	Recommandé
1,1-1,2	1 par jour	Recommandé
1,2-1,3	1 par semaine	Obligatoire, régulier et fréquent
1,3-1,4	2 par mois	Idem
1,4-1,5	1 par mois	Idem

Tableau I-1 Valeurs de P'/ P. Nombre limite de mouvements à la charge réelle P [4].

Remarque : les principes de calcul du trafic équivalent T' sera définie dans la partie Annexe 2.

I.6 Limitations et lacunes identifiées dans la méthode ACN-PCN :

La méthode ACN-PCN, qui a été largement utilisée pour la classification des aéronefs et des chaussées d'aéroport, présente certaines limitations et lacunes qui ont conduit au développement de la nouvelle méthode ACR-PCR. Voici quelques-unes des limitations et lacunes identifiées dans la méthode ACN-PCN :

- **Empirisme** : La méthode ACN-PCN repose en grande partie sur des données empiriques et des valeurs expérimentales pour déterminer la capacité portante de la chaussée en fonction de l'avion. Cela signifie qu'elle ne tient pas pleinement compte des avancées dans les théories analytiques de conception des chaussées [13].
- **Manque d'uniformité** : Il n'existe pas de méthode unique pour la détermination du PCN dans la méthode ACN-PCN, ce qui signifie que les autorités aéroportuaires peuvent utiliser différentes procédures pour obtenir des valeurs de PCN. Cela peut entraîner des divergences dans la classification des chaussées entre les aéroports [13].
- **Limitations des données disponibles** : Les valeurs ACN sont basées sur les données de la FAA et d'autres sources, mais ces données peuvent ne pas toujours refléter avec précision la variété des avions commerciaux et militaires actuellement en service. Cela peut conduire à des estimations imprécises de la capacité portante de la chaussée pour certains avions.
- **Dépendance vis-à-vis du type de chaussée** : La méthode ACN-PCN différencie entre les chaussées flexibles et rigides, ce qui signifie que la classification dépend du type de chaussée. Cela peut rendre difficile la comparaison directe de la capacité portante entre les deux types de chaussées [13].
- **Manque de prise en compte des avancées technologiques** : La méthode ACN-PCN n'a pas suivi l'évolution des technologies des avions et des chaussées. Les avions modernes peuvent avoir des caractéristiques de charge différentes de celles des avions plus anciens, et la méthode ACN-PCN peut ne pas prendre pleinement en compte ces changements [13].
- **Limitation de la méthode ACN/PCN** : La méthode ACN-PCN présente des limites, notamment en différenciant les chaussées flexibles et rigides, compliquant la comparaison de la capacité portante. De plus, elle n'intègre pas les matériaux modernes. Il est essentiel d'harmoniser rapidement ACN/PCN avec la méthode de conception LEA (ACR-PCR) pour une classification précise, prenant en compte les avancées technologiques et éliminant les distinctions inutiles entre types de chaussées [13].

I.7 Conclusion :

La méthode ACN-PCN, bien qu'ayant été un outil pratique pour la classification des aéronefs et des chaussées, présente des limitations en termes d'empirisme, de manque d'uniformité, de dépendance au type de chaussée, et de manque de flexibilité. La nouvelle méthode ACR-PCR a été développée pour répondre à certaines de ces lacunes en intégrant des approches plus analytiques et en cherchant à mieux refléter les besoins des aéroports modernes et des avion

Chapitre II:
Transition vers la Méthode
ACR/PCR

II. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons explorer en détail les aspects clés de la Méthode ACR/PCR, notamment ses normes et réglementations, ses implications pour les aéroports, les compagnies aériennes et les fabricants d'aéronefs. Cette transition vers la Méthode ACR/PCR représente une étape cruciale dans l'optimisation des pratiques de gestion des chaussées aéroportuaires à l'ère de l'aviation moderne.

II.1 Vers le système ACR-PCR : Transition en trois étapes :

La mise en œuvre du nouveau système de notation aéroportuaire ACR-PCR, approuvé par l'ICAO en 2019 et rendu obligatoire d'ici novembre 2024, repose sur une transition en trois étapes. Cette transition implique des ajustements significatifs, notamment le remplacement du PCN par le PCR, ce qui constitue un défi pour certains aéroports [14].

- a) **Transition pour les grands aéroports internationaux :** Pour les grands aéroports internationaux, la transition est relativement simple. Ils basculent du PCN, qui correspondait précédemment à l'ACN le plus élevé, vers le PCR, aligné sur l'ACR le plus élevé.
- b) **Transition pour les petits aéroports avec avion dominant :** Les petits aéroports dotés d'un avion dominant doivent ajuster leur PCN pour correspondre à l'ACN de cet avion. Ensuite, le PCR est calibré en fonction de l'ACR spécifique de cet avion [14].
- c) **Transition avec des défis particuliers :** Cependant, certains aéroports peuvent rencontrer des difficultés lors de cette transition, notamment en l'absence d'informations nécessaires pour établir la base de leur PCN actuel. Dans de tels cas, il sera essentiel de faire appel à une assistance professionnelle pour déterminer la valeur appropriée du PCR. Une complication majeure réside dans le changement de catégorie de sous-sol, où certains aéroports passeront d'une catégorie à une autre en fonction du CBR du sous-sol. Cette détermination pourrait également nécessiter une expertise professionnelle [14].

Cette transition en trois étapes souligne la complexité de l'adoption du système ACR-PCR, avec des défis variables selon la taille et les caractéristiques de chaque aéroport.

II.1.1 Calendrier et adoption du système ACR-PCR

Le système ACR-PCR, approuvé par l'ICAO, entrera en vigueur en novembre 2024. À partir de cette date, les aéroports devront publier les classifications de résistance des chaussées (PCR)

dans la Publication d'Information sur l'Aérodrome (AIP) pour toutes les chaussées aéroportuaires [5].

II.2 Méthode ACR-PCR :

La force portante de la chaussée pour des avions dont la masse sur l'aire de trafic est supérieure à 5 700 kg doit être communiquée en utilisant la méthode ACR-PCR, en incluant les informations suivantes [6] :

- a) La cote de classification de chaussée (PCR) et sa valeur numérique.
- b) Le type de chaussée pris en compte pour la détermination des ACR et PCR (rigide ou souple).
- c) La catégorie de résistance du terrain de fondation.
- d) La catégorie de pression maximale des pneus ou pression maximale admissible des pneus.
- e) La méthode d'évaluation utilisée.

II.2.1 ACR et PCR :

L'ACR d'un avion est déterminée conformément aux procédures normalisées associées à la méthode ACR-PCR. Ces procédures normalisées sont décrites dans le Manuel de conception des aérodromes de l'OACI.

a) Type de chaussée :

Le type de chaussée utilisé pour la détermination des ACR et PCR est soit rigide (lettre de code "R") soit souple (lettre de code "F"). Si la construction est composite ou non normalisée, une note le précise.

b) Catégorie de résistance du terrain de fondation

Code	Résistance	Caractéristiques
A	Élevée	$E \geq 150$ MPa (E= 200 MPa pour la valeur spécifique)
B	Moyenne	$100 \text{ MPa} \leq E < 150$ MPa (E= 120 MPa pour la valeur spécifique)
C	Faible	$60 \text{ MPa} \leq E < 100$ MPa (E= 80 MPa pour la valeur spécifique)
D	Ultra-faible	$E < 60$ MPa (E= 50 MPa pour la valeur spécifique)

Tableau II-1: codes de résistance et caractéristiques des chaussées rigides et souples [6].

c) Catégorie de pression maximale des pneus :

Les catégories de pression maximale admissible des pneus		
Catégories	Limite de pression	Code
Illimitée	Pas de limite de pression	W
Élevée	Pression limitée à 1,75 MPa	X
Moyenne	Pression limitée à 1,25 MPa	Y
Faible	Pression limitée à 0,5 MPa	Z

Tableau II-2 des catégories de pression maximale admissible des pneus [6]

d) Méthode d'évaluation

Évaluation	Code	Signification
Évaluation technique	Code T	Représente une étude spécifique des caractéristiques de la chaussée et de sa capacité à supporter les différents types d'aéronefs qu'elle est censée desservir, en utilisant le concept CDF par le biais d'une méthode de conception/évaluation mécaniste calibrée par rapport au comportement observé de la chaussée
Expérience des aéronefs utilisateurs	Code U	Représente une connaissance du type et de la masse spécifiques des aéronefs supportés de manière satisfaisante dans le cadre d'une utilisation régulière

Tableau II-3: types de méthodes d'évaluation [6]

Exemple 1 : Si la force portante d'une chaussée rigide reposant sur un terrain de fondation de résistance moyenne a, par évaluation technique, été fixée à PCR = 760 et s'il n'y a pas de limite de pression des pneus, les renseignements communiqués seront les suivants [6] :

$$PCR = 760 / R / B / W / T$$

Exemple 2 : Si la force portante d'une chaussée composite, qui se comporte comme une chaussée souple et qui repose sur un terrain de fondation de résistance élevée a été évaluée, selon l'expérience acquise sur les avions, à PCR = 550 et que la pression maximale admissible des pneus soit de 1,25 MPa, les renseignements communiqués seront les suivants [6]:

$$PCR = 550 / F / A / Y / U$$

Recommandation : Il est recommandé d'établir des critères pour réglementer l'utilisation d'une chaussée par un aéronef dont l'ACR est plus élevée que la PCR communiquée [6].

- **Aéronefs de masse inférieure ou égale à 5 700 kg :**

Pour les aéronefs dont la masse sur l'aire de trafic est inférieure ou égale à 5 700 kg, la force portante de la chaussée est communiquée en indiquant la masse maximale admissible de l'aéronef et la pression maximale admissible des pneus.

Exemple : 4 800 kg/0,60 MPa

II.2.2 Détermination de la valeur numérique du ACR :

Le fabricant de l'aéronef fournit le calcul officiel d'une valeur ACR. Le calcul de l'ACR nécessite des informations détaillées sur les caractéristiques opérationnelles de l'aéronef, telles que le centre de gravité arrière maximum, le poids maximum sur la rampe, l'espacement des roues et la pression des pneus [2].

1) Méthode de détermination des ACR

Les valeurs types utilisées dans la méthode sont indiquées ci-après et comprennent l'explication des différents termes [9] :

2) Catégorie du terrain de fondation :

Dans la méthode ACR-PCR, quatre valeurs types du terrain de fondation (valeurs de module) sont utilisées, au lieu d'une échelle continue de modules du terrain de fondation. La répartition des terrains de fondation en fonction d'une valeur type médiane dans chaque catégorie est jugée tout à fait satisfaisante pour la publication des données.

Les catégories du terrain de fondation s'appliquent aux chaussées souples et aux chaussées rigides. Voici le tableau récapitulatif des codes de résistance et de leurs caractéristiques pour les chaussées rigides et souples [9]

Ces codes indiquent la résistance des chaussées en fonction des valeurs de E (module de réaction des chaussées). Les valeurs spécifiques de E sont utilisées pour déterminer la catégorie de résistance correspondante.

3) Contrainte de travail du béton pour chaussées rigides :

La contrainte standard ($\sigma = 2,75 \text{ MPa}$) spécifiée pour les chaussées rigides est utilisée uniquement dans le but d'assurer une communication uniforme lors de la publication des données. Cependant, il est important de noter que cette contrainte standard n'a aucune relation avec la contrainte réelle utilisée dans la conception et/ou l'évaluation des chaussées. La contrainte de travail réelle utilisée dans ces processus est déterminée de manière indépendante et ne dépend pas de la contrainte standard de publication [9].

4) Charge sur roue simple calculée mathématiquement

1. La méthode ACR/PCR utilise le concept d'une charge calculée mathématiquement sur une roue unique pour déterminer l'interaction entre le train d'atterrissage de l'aéronef et la chaussée. Contrairement à d'autres paramètres, comme l'épaisseur de la chaussée, l'ACR ne spécifie pas directement cette épaisseur [9].
2. Dans cette méthode, l'épaisseur fournie par un modèle mathématique pour un train d'atterrissage est convertie en une épaisseur équivalente correspondant à une roue unique avec une pression de pneu standard de 1,50 MPa. La charge résultante sur la roue unique est ensuite utilisée sans référence directe à l'épaisseur de la chaussée.
3. L'objectif principal est d'obtenir une égalité des contraintes appliquées sur la chaussée plutôt que de se concentrer sur la valeur précise de l'épaisseur de la chaussée. Cette approche permet d'évaluer l'effet relatif de la charge d'un aéronef sur une chaussée, conformément aux principes de la méthode ACR-PCR [9].

II.2.2.1 Chaussées rigides :

La procédure ACR pour chaussée rigide lie la charge calculée sur roue simple, pour :

- Une pression constante des pneus de 1,50 MPa à une épaisseur de dalle de béton de référence (t).
- Elle tient compte des quatre catégories de terrain de fondation indiquées au (tableau de catégories de terrain de fondation).
- Une contrainte standard du béton de 2,75 MPa.

Il est à noter que, comme une contrainte standard du béton est utilisée, aucune information concernant la résistance à la flexion de la chaussée ou le nombre de revêtements n'est nécessaire pour le calcul de l'ACR rigide [9].

Les étapes ci-dessous sont utilisées pour déterminer l'ACR rigide d'un aéronef :

1. Structure de chaussée de référence :

En utilisant les données de l'aéronef publiées par le constructeur, obtenir l'épaisseur de référence (t), pour la masse donnée de l'aéronef, la valeur E du terrain de fondation et la contrainte standard du béton à publier, c'est-à-dire 2,75 MPa. Pour les quatre catégories de terrain de fondation, prendre la section transversale suivante pour le modèle d'analyse des couches élastiques, voir tableau suivant [9]:

Description de la couche	Désignation	Épaisseur (mm)	E, MPa	ν
Couche de roulement (PCC)	Couche 1	Variable	27 579	0,15
Couche de base (granulat concassé)	Couche 2	200	500	0,35
Terrain de fondation	Couche 3	Infinie	Voir le tableau II .1	0,40

Tableau II-4 Description des couches de la chaussée rigide [9]

- L'épaisseur minimale autorisée pour la couche 1 dans le modèle d'analyse des couches élastiques est de 50,8 mm
- Dans le modèle d'analyse des couches élastiques, l'interface horizontale entre la couche 1 et la couche 2 est supposée avoir un glissement total, ce qui signifie qu'il n'y a pas de liaison entre les deux couches [9].
- En revanche, l'interface horizontale entre la couche 2 et la couche 3 est supposée avoir une adhérence totale, ce qui signifie que les deux couches sont solidaires.
- Dans le modèle d'analyse des couches élastiques, la contrainte σ représente la contrainte horizontale maximale calculée au niveau du fond de la couche 1, qui correspond à la couche de béton en ciment Portland [9].

2. Train d'évaluation:

1. La valeur ACR est calculée pour un seul bogie (annexe 1) dans l'ensemble du train d'atterrissage principal [9].

2. Cela signifie que pour les trains d'atterrissage comportant deux roues jumelées (D), quatre roues dans un atterrisseur à bogie (2D), etc., l'ACR est calculée pour un seul ensemble de Roues. Pour les trains d'atterrissage plus complexes avec plus de deux bogies, l'ACR rigide de l'aéronef est déterminée par le bogie individuel ayant la plus grande valeur d'ACR rigide [9].
3. Tous les bogies sont évalués en fonction de la masse et du centre de gravité (CG) qui produisent la charge totale la plus élevée du train principal sur la chaussée [9].

3. Points d'évaluation des contraintes :

1. Le nombre de points d'évaluation de l'analyse des couches élastiques correspond au nombre de roues du train d'évaluation [9].
2. Ces points d'évaluation sont situés au fond de la couche 1, directement sous le point central de chaque roue [9].
3. L'épaisseur (t) de la couche 1 est ajustée de manière à ce que la contrainte maximale évaluée à tous les points d'évaluation soit égale à $\sigma = 2,75$ MPa [9].
4. La valeur (t) obtenue à partir de cet ajustement est considérée comme l'épaisseur de référence pour l'ACR [9].

Voici la Figure suivante explicative du processus des points d'évaluations des contraintes ci-dessus :

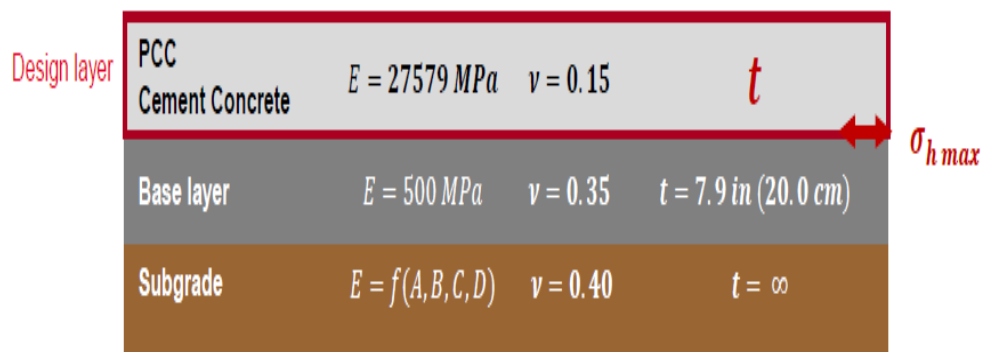


Figure II.1 l'épaisseur de référence pour l'ACR

4. Calcul de la charge calculée sur roue simple (DSWL)

De manière similaire à l'ACN, l'ACR est calculé comme le double de la charge standard sur une seule roue isolée (DSWL), (avec une pression de pneu fixe) nécessitant la même épaisseur de chaussée que l'aéronef considéré [15].

Les changements par rapport à l'ACN sont les suivants :

- La chaussée est conçue selon une procédure rationnelle de conception de chaussée (par opposition aux procédures CBR ou Westergaard) : c'est le changement majeur par rapport à l'ACN et la partie clé du calcul de l'ACR. Voir le point 1 dans la figure suivante ;
- La DSWL est calculée pour une pression de pneu de 1,50 MPa (au lieu de 1,25 MPa). Voir le point 2 dans la figure suivante ;
- L'ACR est exprimé en centaines de kilogrammes (au lieu de milliers). Voir le point 3 dans la figure suivante :

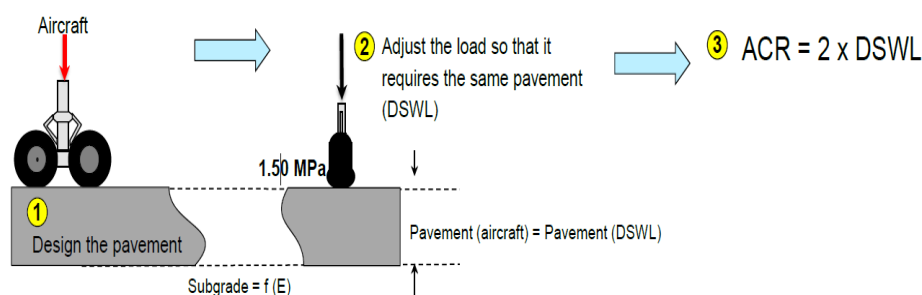


Figure II.2 Schématisation de la procédure de calcul de DSWL et la définition de ACR. [15]

5. Calcul de l'ACR :

La cote de classification de l'aéronef est déterminée en multipliant par deux la charge calculée sur roue simple (DSWL), exprimée en centaines de kilogrammes, pour la masse et la catégorie de terrain de fondation choisies. La valeur de l'ACR peut être arrondie au multiple de dix le plus proche avant d'être publiée [9].

$$ACR = 2 \times DSWL \quad (8)$$

II.2.2.2 Chaussées souples :

La procédure ACR pour les chaussées souples associe la charge calculée sur roue simple à une pression constante des pneus de 1,50 MPa, en utilisant une épaisseur totale de référence (t)

calculée pour 36 500 passages de l'aéronef. Cette procédure prend en compte les quatre catégories de terrain de fondation mentionnées dans le tableau des catégories [9].

i. Structures de chaussée de référence

- Le système ACR-PCR couvre une large gamme d'aéronefs, avec des structures de référence adaptées aux poids des avions. Pour les chaussées souples, il prend en compte les propriétés des couches constitutives, telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson et l'épaisseur, en supposant une continuité structurelle entre les couches.
- Les tableaux suivants définissent les structures de référence à utiliser pour le calcul de l'ACR souple [9].

Description de la couche	Épaisseur (mm)	E, MPa	v
Couche de roulement (asphalte)	76	1379	0,35
Couche de base (granulat concassé)	Variable	Voir le tableau II .1	0,35
Terrain de fondation	Infinie	Voir le tableau II .1	0,35

Tableau II-5 structure de référence pour l'ACR souple (aéronef équipé de deux roues ou moins sur toutes les jambes du train principal)

Description de la couche	Épaisseur (mm)	E, MPa	v
Couche de roulement (asphalte)	127	1379	0,35
Couche de base (granulat concassé)	Variable	Voir le tableau II .1	0,35
Terrain de fondation	Infinie	Voir le tableau II .1	0,35

Tableau II-6 structure de référence pour l'ACR souple (aéronef équipé de plus de deux roues sur toute jambe du train principal)

Remarque :

- Épaisseur minimale admissible de la couche de base dans le modèle d'analyse des couches élastiques : 25,4 mm
- Les épaisseurs de couche calculées peuvent ne pas être réalistes aux extrémités de la gamme de poids des aéronefs en raison du nombre limité de structures de référence.
- Concept d'ACR $:(t)$ est un indicateur relatif, pas une base de conception pratique.

- Le modèle d'analyse des couches élastiques reste valide malgré les limitations des épaisseurs de couche calculées.

ii. Module de la couche de base

La couche de base en granulats concassés dans la structure de chaussée souple a une épaisseur variable. Le module (E) de cette couche dépend de l'épaisseur et du module du terrain de fondation, mais il n'est pas déterminé dans la procédure ACR.

Dans le modèle d'analyse des couches élastiques, la couche de base est subdivisée en sous-couches plus petites. Chaque sous-couche se voit attribuer une valeur de module à l'aide d'une procédure récursive, comme expliqué ci-dessous [9].

Les valeurs de module sont attribuées aux sous-couches. Les étapes de la procédure sont les suivantes [9] :

Étape 1 :

- Déterminer le nombre de sous-couches N.
 - Si l'épaisseur de la couche de base **t(B) < 381 mm**, alors N = 1 et la sous-couche n'est pas nécessaire.
 - Si **tB ≥ 381 mm**, le nombre de sous-couches est :

$$N = \text{int} \left(\frac{tB}{254} + 0,5 \right)$$

- t(B) s'exprime en mm, Lorsque l'épaisseur de la couche de base (tB) est exprimée en millimètres, la fonction entière arrondit cette valeur à l'entier suivant.

Étape 2 :

- Déterminer l'épaisseur de chaque sous-couche.
 - Si N = 1, alors l'épaisseur de la sous-couche est égale à l'épaisseur de la couche de base t(B), **t(sc)=t(B)**.

- Si $N > 1$, alors l'épaisseur de la sous-couche inférieure $N - 1$ est de 254 mm, et l'épaisseur de la sous-couche supérieure est de :

$$t(B) - (N - 1) \times 254 \text{ mm.}$$

Note : Les sous-couches de N n'ont généralement pas la même épaisseur.

Exemple 5 :

- Si l'épaisseur de la couche de base est de 660 mm, alors à partir de l'étape 1 :

$$N = \text{int} \left(\frac{660}{254} + 0,5 \right)$$

$$N = \text{int}(660/254 + 0.5)$$

$$N = \text{int}(2.598 + 0.5)$$

$$N = \text{int}(3.098)$$

$$N = 3$$

Le nombre de sous-couches est de trois. Les deux sous-couches inférieures mesurent chacune 254 mm, tandis que la sous-couche supérieure mesure $660 - 2 \times 254 = 152$ mm, La Figure ci-dessous montre le résultat sous forme de schéma :

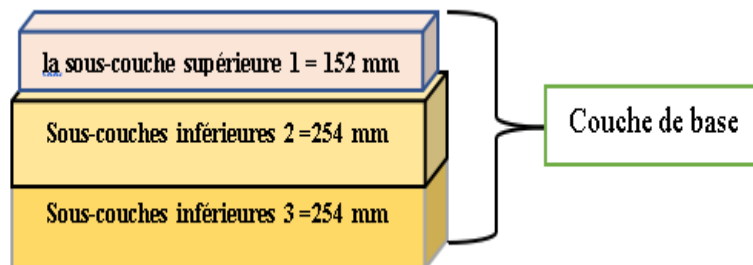


Figure II.3 le résultat résumer dans un schéma

Étape 3 :

- Attribuer une valeur de module E à chaque sous-couche.
- Les valeurs de module augmentent progressivement de la partie inférieure à la partie supérieure, ce qui indique que le matériau granulaire est de plus en plus confiné à mesure que l'on s'élève dans les couches.
- Les valeurs du module sont données par l'équation suivante :

$$E_n = E_{n-1} \times \{1 + [\log_{10}(t_n) - \log_{10}(25,4)] \times (c - d[\log_{10}(E_{n-1}) + \log_{10}(145,037)])\} \quad (9)$$

Avec :

c = 10,52 (constante) ;

d = 2,0 (constante) ;

E_n = le module de la sous-couche actuelle en MPa

E_{n-1} = le module de la sous-couche immédiatement inférieure à la sous-couche actuelle ; ou le module de la couche de fondation lorsque la sous-couche actuelle est la sous-couche inférieure ;

t_n = l'épaisseur de la sous-couche actuelle en mm ;

- ✓ Pour déterminer la valeur de module de la sous-couche actuelle, nous utilisons l'équation donnée, qui prend en compte différents paramètres tels que l'épaisseur de cette sous-couche (notée t_n) et le module de la sous-couche immédiatement inférieure (noté E_{n-1}).
- ✓ Si la sous-couche actuelle est la sous-couche inférieure, **alors le module de la couche de fondation** est utilisé à la place d' E_{n-1} .
- ✓ L'équation ci-dessus est appliquée de manière récursive en commençant par la sous-couche inférieure.

Étape 4 :

La procédure d'attribution du module de l'étape 3 doit être modifiée pour les deux sous-couches supérieures, chaque fois que :

- **127 mm < t(B) < 254 mm**
- **tB > a un multiple entier de 254 mm ;**

C'est à dire :

- Lorsque nous disons que tB (l'épaisseur de la couche de base) est supérieur à un multiple entier de 254 mm, cela signifie que l'épaisseur totale de la couche de base ne peut pas être divisée en un nombre entier de sous-couches de 254 mm d'épaisseur. Au lieu de cela, il sera nécessaire d'avoir une combinaison de sous-couches de différentes épaisseurs pour atteindre l'épaisseur totale requise.

Exemple 6 : supposons que tB soit de 700 mm. Comme 700 mm n'est pas un multiple entier de 254 mm, nous devons trouver une configuration de sous-couches qui, lorsqu'elles sont combinées, atteignent 700 mm.

- Nous pouvons utiliser la formule $N = \text{int}(tB/254 + 0,5)$ pour déterminer le nombre de sous-couches nécessaires. Dans ce cas, $N = \text{int}(700/254 + 0,5) = 3$. Cela signifie que nous aurons besoin de trois sous-couches pour atteindre l'épaisseur totale de 700 mm.
- Les sous-couches peuvent avoir des épaisseurs différentes pour atteindre l'épaisseur totale requise. Par exemple, nous pourrions avoir une sous-couche inférieure de 254 mm, une sous-couche médiane de 254 mm et une sous-couche supérieure de 192 mm pour atteindre l'épaisseur totale de 700 mm
- Cette modification fait en sorte que le module de toutes les sous-couches soit une fonction continue de l'épaisseur de la couche, sans aucun écart.
- Si $N > 1$ et tB dépasse un multiple entier de 254 mm, où $(254 \times 2 = 508)$ de plus de 127 mm, mais de moins de 254 mm, alors :
 - a) La sous-couche supérieure (sous-couche N) a une épaisseur comprise entre 127 mm et 254 mm, et toutes les sous-couches situées en dessous (sous-couches 1 à N-1) ont une épaisseur de 254 mm.
 - b) En utilisant l'équation de l'étape 3, calculer le module E_{254} qui serait obtenu pour la sous-couche N pour une épaisseur supposée de la sous-couche supérieure t_N égale à 254 mm.
 - c) Calculer le module de la sous-couche N-1 (c'est-à-dire la sous-couche située immédiatement sous la sous-couche supérieure) en utilisant l'équation de l'étape 3, mais en substituant $t_N = 508 \text{ mm} - t_N$, où t_N est l'épaisseur réelle de la sous-couche supérieure en mm.
 - d) Calculer le module de la sous-couche N par interpolation linéaire entre E_{N-1} (le module de la sous-couche N-1) et E_{254} :

$$E_N = E(N - 1) + t_N \times \frac{E(254) - E(N - 1)}{254} \quad (10)$$

Exemple 7 :

Épaisseur de couche supérieure de 192 mm, le terrain de fondation a un module de $E=200\text{MPa}$, pour $N= 3$ sous couches on calcul les modules des sous couches avec les équations décrites dans les étapes 3 et 4 :

1. Sous-couche inférieure (N-1) :

- Épaisseur $t_n = 254$ mm
- Modules- $E_{n-1} = 200$ MPa
- 2. Sous-couche intermédiaire (N-2) :**
- Épaisseur $t_n = 254$ mm
- $E_{n-1} = 200$ MPa
- $E_n = E_{n-1} \times \{1 + [\log_{10}(t_n) - \log_{10}(25,4)] \times (c - d[\log_{10}(E_{n-1}) + \log_{10}(145,037)])\}$
- $E_n = 200 \times \{1 + [\log_{10}(254) - \log_{10}(25,4)] \times (10,52 - 2[\log_{10}(200) + \log_{10}(145,037)])\}$
- $E_n \approx 285.3$ MPa

3. Sous-couche supérieure (N) :

- Épaisseur $t_n = 192$ mm
- $E_{n-1} = 285.3$ MPa (valeur calculée de la sous-couche intermédiaire (N-2))
- $E_{254} = 324.8$ MPa (valeur calculée du module pour une épaisseur supposée de 254 mm)
- $E_n = E_{n-1} + t_n \times (E_{254} - E_{n-1}) / 254$
 $E_n = 285.3 + 192 \times (324.8 - 285.3) / 254$
- $E_n \approx 305.8$ MPa

Donc, pour une épaisseur de couche supérieure de 192 mm, les modules des sous-couches de la couche de base sont approximativement :

- Sous-couche inférieure (N-1) : 200 MPa
- Sous-couche intermédiaire (N-2) : 285.3 MPa
- Sous-couche supérieure (N) : 305.8 MPa

iii. Train d'évaluation :

La valeur ACR (Airport Classification Rating) est calculée en prenant en compte toutes les roues du train d'atterrissage principal de l'aéronef, à l'exclusion des roues du train d'atterrissage avant. L'évaluation se fait en se basant sur la masse et le centre de gravité (CG) qui génèrent la charge totale la plus élevée exercée par le train d'atterrissage principal sur la chaussée.

En d'autres termes, on considère les trains principaux qui produisent la plus grande charge sur la surface de la piste lors de l'atterrissage [9].

iv. Points d'évaluation de la déformation :

Dans le modèle d'analyse des couches élastiques, la déformation « ϵ » représente la déformation verticale maximale calculée à la surface supérieure de la couche de fondation, qui est la couche la plus basse. Pour mesurer cette déformation, des points d'évaluation sont positionnés directement sous le point central de chaque roue et à des emplacements définis par une grille régulière rectangulaire. Cette grille est espacée de 10 cm et est alignée parallèlement aux axes principaux du train [9].

a) Pour les trains principaux simples qui comprennent deux bogies :

- L'origine de la grille est placée au centre géométrique d'un bogie [9].
- Les limites de la grille s'étendent sur 30 cm au-delà des coordonnées maximales des roues de chaque côté du bogie [9].

Voir la figure ci-dessous pour une illustration visuelle de cette configuration.

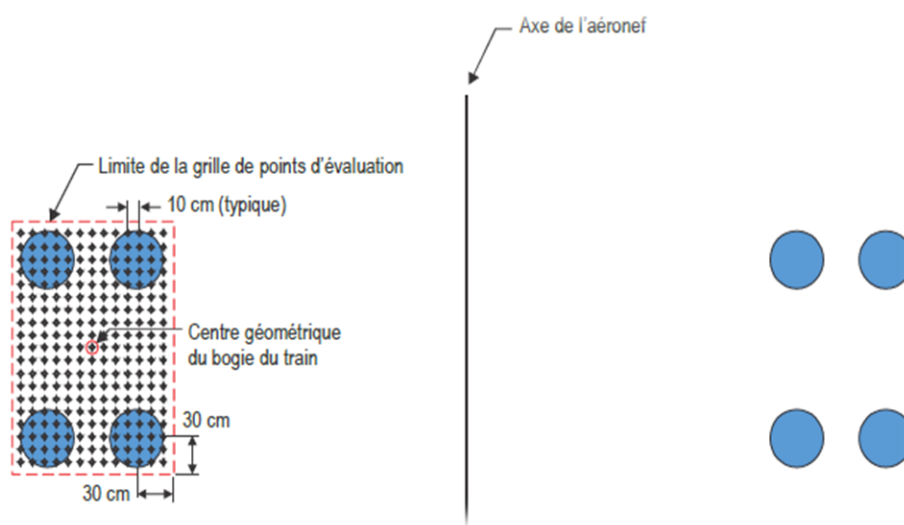


Figure II.4 Définition de la grille pour une disposition simple du train d'atterrissage principal [6]

b) Pour les types de trains plus complexes dont l'ensemble du train d'atterrissage principal comprend plus de deux bogies :

- L'origine de la grille se situe au centre géométrique de l'ensemble du train d'atterrissage.
- Les limites de la grille s'étendent sur 30 cm au-delà des coordonnées maximales des roues de tous les côtés. Aux fins du calcul des coordonnées du centre géométrique, toutes les roues incluses

doivent être pondérées de la même manière, indépendamment des différentes charges sur les roues ou pressions des pneus [9].

La déformation « ϵ » est le maximum des déformations calculées pour tous les points d'évaluation.

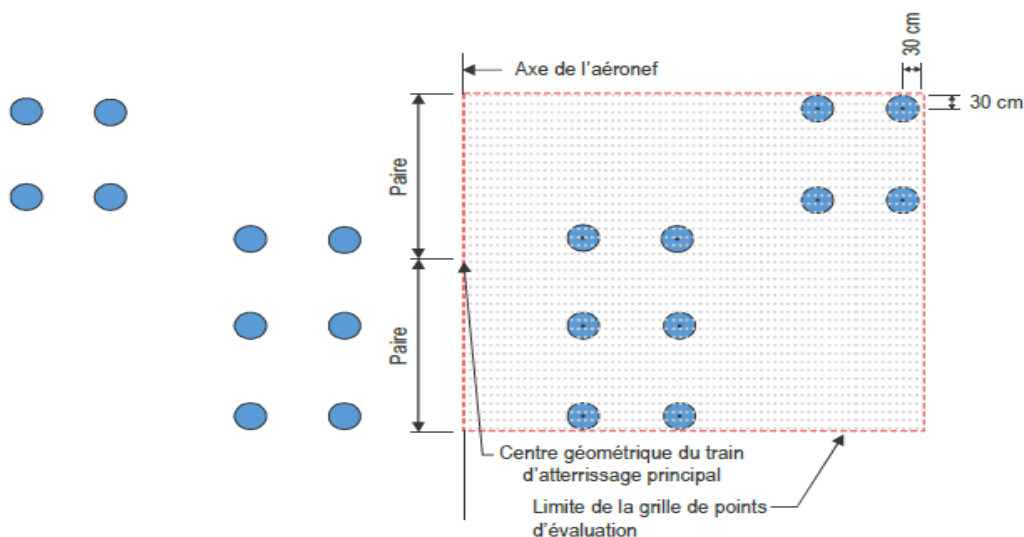


Figure II.5 Définition de la grille pour les trains d'atterrissage principaux complexes [6].

v. Modèle d'endommagement :

La procédure ACR souple s'appuie sur le critère de rupture du terrain de fondation associé à la loi D'endommagement élémentaire [9] :

$$De(\epsilon) = \frac{1}{Ce(\epsilon)} \quad (11)$$

Avec :

Ce : est le nombre de passages nécessaires pour appliquer une charge complète sur une surface unitaire de la chaussée produisant une rupture du terrain de fondation, pour une déformation verticale donnée du terrain de fondation ϵ [9].

vi. Calcul de la DSWL :

1. Au moyen des données relatives aux exigences de la chaussée publiée par le constructeur, calculer l'épaisseur de référence (t), pour la masse donnée de l'aéronef,
2. Déterminer la valeur E du terrain de fondation et 36 500 passages de l'aéronef.
3. Utiliser la structure de chaussée de référence appropriée avec les points d'évaluation décrits au précédemment.

4. L'épaisseur de la couche variable (de revêtement) est ajustée jusqu'à ce que l'endommagement (calculé) soit égal à 1,0.
5. L'épaisseur qui en résulte (t) est l'épaisseur de référence pour l'ACR.
6. Au départ de l'épaisseur de référence ci-dessus et du même modèle d'analyse des couches élastiques, obtenir une charge calculée sur roue simple pour le terrain de fondation sélectionné.
7. En maintenant la pression constante des pneus à 1,50 MPa.
8. La valeur de la charge calculée sur roue simple est ajustée jusqu'à ce que l'endommagement soit égal à 1,0 pour 36 500 passages.
9. Pour l'évaluation des déformations sous la charge sur roue simple, utiliser un point d'évaluation situé au sommet du terrain de fondation comme sur la figure 'contrainte', directement sous le centre de la roue.

vii. Calcul de l'ACR :

Pour cette étape, on utilise la même formule que celle employée pour une chaussée rigide, dans des conditions similaires.

$$ACR = 2 \times DSWL \quad (8)$$

viii. Ajustement de l'ACR en fonction de la pression des pneus

Normalement, les pneus sont gonflés à une pression correspondant à la masse maximale totale de l'aéronef sans poussée du moteur, et cette pression est maintenue même en cas de variations de masse au décollage. Cependant, il peut parfois être avantageux d'exploiter l'aéronef avec des masses réduites, un centre de gravité modifié et/ou des pressions de pneus réduites, ce qui nécessite le calcul d'ACR réduites [6].

II.2.3 Détermination de la valeur numérique du PCR :

La détermination de la valeur numérique du PCR pour une chaussée particulière peut être basée sur l'une des deux procédures : la méthode "Utilisation d'aéronef" ou la méthode "Évaluation technique". Les procédures de l'ICAO permettent aux États membres de déterminer comment les valeurs du PCR seront calculées. L'une ou l'autre procédure peut être utilisée pour déterminer un

PCR, mais la méthodologie utilisée doit être rapportée dans le cadre de la notation affichée.2.1
Méthode de détermination des PCR

II.2.4 Procédure standard pour déterminer et publier les PCR en utilisant le concept de CDF :

II.2.4.1 Concept de CDF :

Le CDF représente la durée de vie en fatigue d'une chaussée utilisée. Il est calculé en comparant les charges appliquées à la chaussée avec les charges admissibles jusqu'à la rupture.

Dans le cas d'un aéronef avec des départs annuels constants, le CDF est déterminé en considérant la déformation ou la contrainte maximale due à la charge sur un point spécifique de la structure de la chaussée [6].

$$\text{CDF} = \frac{\text{couvertures appliquées}}{\text{couvertures jusqu'à la rupture}} \quad (12)$$

Le concept de CDF (Coefficient de Durée de Vie en Fatigue) est essentiel pour déterminer la durée de vie d'une chaussée en fonction des charges appliquées [6].

- CDF = 1 : Durée de vie maximale atteinte, Aucune limitation de poids.
- CDF < 1 : Proportion de durée de vie utilisée, Aucune limitation de poids.
- CDF > 1 : Durée de vie en fatigue épuisée, entraînant un affaissement potentiel. Le terme "rupture" est défini selon les procédures de conception, limitation de poids pour au moins un aéronef dans le mélange.
- CDF = 1, Cette valeur de référence est utilisée pour déterminer les dimensions nécessaires afin de garantir une durée de vie en fatigue appropriée pour la chaussée selon les critères de conception spécifiés. Les nombreux types d'aéronefs sont comptabilisés en utilisant la loi de Miner [6] :

$$\text{CDF} = \text{CDF1} + \text{CDF2} + \dots + \text{CDFN} \quad (13)$$

- CDF_i représente le coefficient de durée de vie en fatigue pour chaque aéronef dans le trafic mixte.
- N est le nombre total d'aéronefs pris en compte.

II.2.4.2 Déviation latérale :

La répartition des passages d'aéronef pour un type d'aéronef donné pendant la durée de vie de la chaussée est décrite par une fonction de répartition gaussienne (ou normale), avec **un écart type** (s) qui dépend de plusieurs facteurs [6] :

- Le type d'aéronef, sa vitesse au sol et l'aire de manœuvre. Un autre terme fréquemment utilisé est la valeur de la déviation latérale, qui **correspond à deux fois l'écart type**.
- Les sections à grande vitesse (p. ex. les pistes) sont associées à des valeurs de s plus élevées que les sections à vitesse modérée (p. ex. les voies de circulation), tandis que la déviation peut être considérée comme négligeable ($s \cong 0$) sur les sections à faible vitesse (p. ex. les aires de trafic).
- Les valeurs suivantes de l'écart type peuvent être utilisées indépendamment du type d'aéronef

Section de la chaussée	Écart-type s (mètres)
Sections à grande vitesse (piste, voie de sortie rapide)	0,75
Sections à vitesse modérée (voies de circulation)	0,5
Aires de trafic et sections à faible vitesse	0

Tableau II-7 Ecart-types par section de chaussée [6].

- La conception de la FAA utilise une valeur fixe de $s = 0,776$ mètre pour tous les types d'aéronefs et d'éléments. Pour prendre en compte l'effet de la déviation latérale, on peut calculer le rapport passage/couverture (P/C) à partir de la répartition normale des passages d'aéronefs en discrétisant cette fonction de distribution à l'aide d'une grille de calcul.
- Une grille avec un espacement de 5 cm offre un bon compromis entre précision et temps de calcul. Lorsque la déviation est nulle ($P/C = 1$), cela signifie que le nombre de passages est égal au nombre de couvertures sur la grille, chacune associée à des pourcentages de trafic spécifiques [6].

- L'inclusion de la déviation latérale réduit l'endommagement théorique par rapport à une situation sans déviation, car elle permet de répartir les trajectoires des avions de manière plus réaliste. Ainsi, $D_{\text{déviation}}$ (avec déviation latérale) est inférieur à $D_{\text{zéro déviation}}$ (sans déviation latérale) [6].

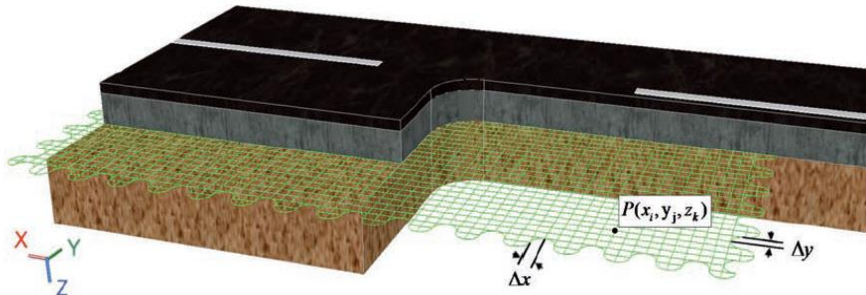


Figure II.6 Représentation d'une grille de calcul située à l'interface couche de base/couche de fondation, et d'un point de calcul P (x_i, y_j, z_k). [8]

II.2.4.3 Calcul de l'endommagement en cas de déviation latérale [8] :

1. Lorsque la méthode de la grille est utilisée, il est nécessaire d'obtenir l'endommagement total (pour un avion) en additionnant les différentes contributions à l'endommagement de chacun des profils nw .
2. Cette étape consiste à additionner les profils d'endommagement D non déviation (y, z), compensée par la valeur yw et pondérée par la probabilité d'occurrence Pw dans la loi de déviation latérale :
3. pw : nombre total de profils d'endommagement.

$$D_{\text{dév}}(y, z) = \sum_{w=1}^{nw} pw \times D_{\text{nondév}}(y - yw, z) \quad (14)$$

II.2.5 Détermination de l'endommagement cumulé pour le trafic composé [8] :

$$CDF(y_j, z) = \sum_{i=1}^m Ni \times (D_{\text{dév } i})(y_j, z) \quad (15)$$

L'endommagement cumulé pour tous les types d'aéronefs est donné par l'équation suivante, qui traite l'effet additif de l'endommagement selon la loi de Miner

Où :

- **m** = nombre total d'aéronefs dans le trafic composé ;
 - **i** = les différents types d'aéronefs ;
 - **N_i** = nombre de passages d'aéronefs.
- Si le rapport **P/C** est calculé pour chaque aéronef **i**, une expression équivalente donnant le CDF au décalage latéral **j** est [6] :

$$CDF(y_j, z) = \sum_{i=1}^m \frac{N_i}{\left(\frac{p}{c}\right)_j^i} \times D_i(z) \quad (16)$$

D_i est l'endommagement causé par un passage de l'aéronef **i**, y compris les effets éventuels de l'interaction entre les roues en tandem.

II.2.6 Catégorie de terrain de fondation pour le PCR :

Pour les chaussées existantes initialement conçues au moyen de la procédure de conception de l'indice portant californien (CBR), les valeurs de module du terrain de fondation peuvent être déterminées de plusieurs façons. La procédure qui sera applicable dans la plupart des cas consistent à utiliser les valeurs CBR disponibles et de substituer la relation :

$$\begin{aligned} E &= 1\,500 \times \text{CBR} \quad (E \text{ en psi}) \\ E &= 10 \times \text{CBR} \quad (E \text{ en MPa}) \end{aligned}$$

- Si le module de fondation est entré comme une valeur **k**, il peut être converti en valeur **E** équivalente au moyen des équations suivantes :

$$ESG = 20,15 \times k^{1,284} \quad (17)$$

- ESG = module d'élasticité (de Young) du terrain de fondation, en livres par pouce carré (psi)
- K = module de réaction du terrain de fondation, en livres par pouce cube (pci).

II.3 Résumé algorithmique de la procédure pour calculer le PCR :

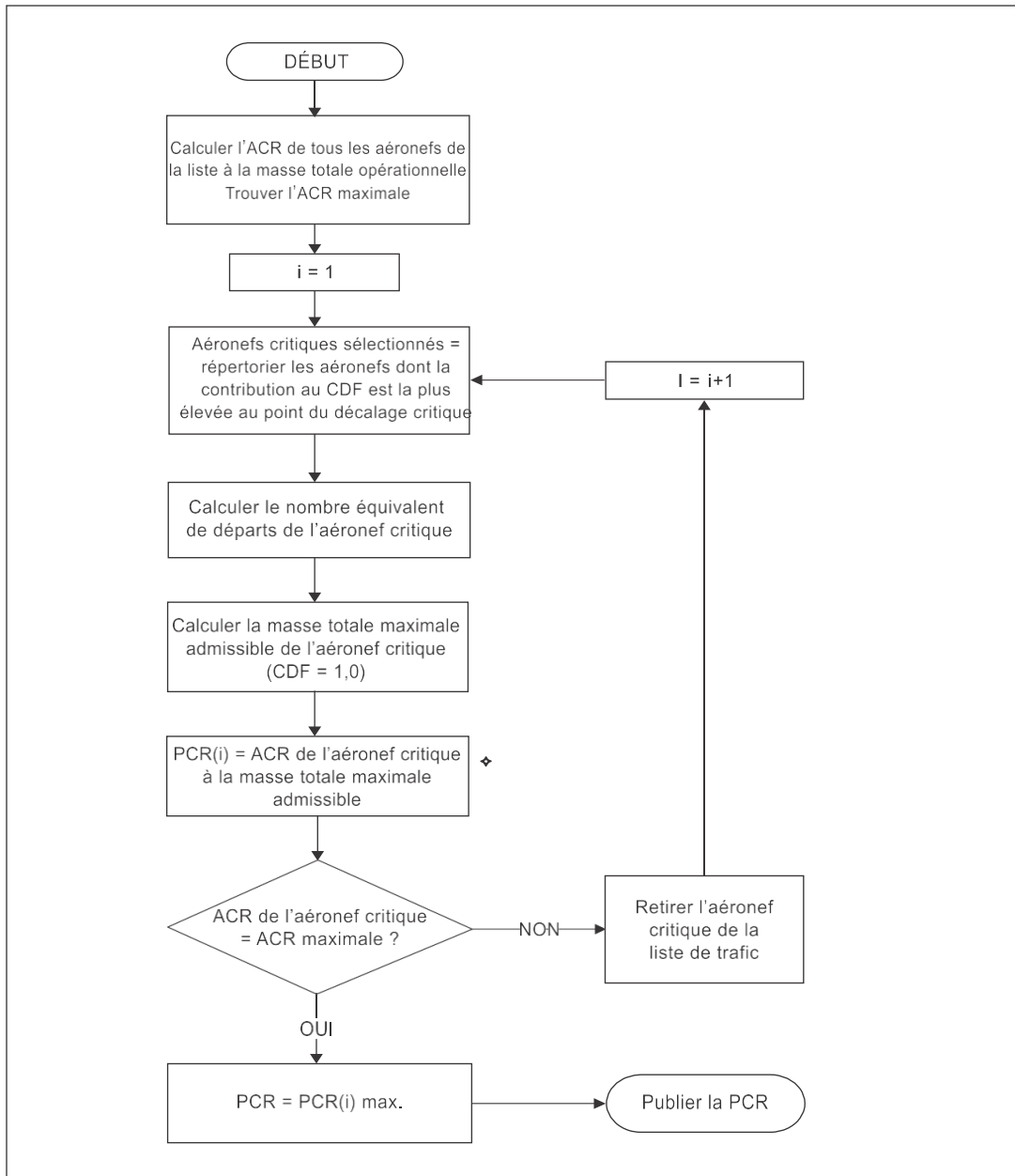


Tableau II-8 Tableau schématique de la procédure recommandée de calcul de la PCR [6]

Exemple 8 [6] :

Cet exemple sera présenté en plusieurs étapes. Supposons que nous ayons une chaussée souple à considérer.

Étapes 1 et 2 [6] :

Collecte de données :

Caractéristiques de la chaussée sont définie dans le tableau suivant :

CARACTÉRISTIQUES DE LA CHAUSSÉE				
Couches	Désignation	Module E (MPa)	Coefficient de Poisson	Épaisseur (cm)
Couche de roulement	EB-BBSG3	$E=f(\theta, \text{fréq.})$	0,35	6
Couche de	EB-GB3	$E=f \text{ base }(\theta, \text{fréq.})$	0,35	18
Couche de fondation (1)	GNT1	600	0,35	12
Couche de fondation (2)	GNT1	240	0,35	25
Terrain de fondation		80	0,35	∞

Tableau II-9 caractéristiques de la chaussée [6]

1. Données sur les différents types d'aéronefs [6]

- La liste des types d'aéronefs utilisée pour la détermination de la Performance de Classification de la Résistance (PCR) est la même que celle utilisée lors de la conception de la chaussée pour une nouvelle construction.
- Pour les chaussées en service, l'analyse PCR prend en compte l'utilisation des aéronefs pendant la durée de vie restante de la chaussée.
- Si la liste des types d'aéronefs utilisant la chaussée a évolué par rapport aux prévisions de conception, une liste actualisée d'aéronefs doit être utilisée.
- L'exemple donne une liste spécifique d'aéronefs avec leurs masses opérationnelles maximales et les départs annuels.

ANALYSE DES DIFFÉRENTS TYPES D'AÉRONEFS			
N°	Modèle d'aéronef	Masse maximale au roulage (t)	Départs annuels
1	A321-200	93,9	14 600
2	A350-900	268,9	5 475
3	A380-800	571	1 825
4	B737-900	79,2	10 950
5	B787-8	228,4	3 650
6	B777-300ER	352,4	4 380

Tableau II-10 analyse des différents types d'aéronefs [6]

Note [6] :

La chaussée évaluée est une piste ; chaque aéronef se voit attribuer une déviation latérale de 1,5 m (écart type de 0,75 m). Chaque aéronef est centré sur l'axe de la chaussée et modélisé avec les coordonnées réelles de son train d'atterrissage principal.

Étape 3 : ACR de l'aéronef à la masse opérationnelle :

	B777-300ER	A321-200	A350-900	B787-8	B737-9	A380-800
Masse opérationnelle (t)	352,4	93,9	268,9	228,4	79,2	571
ACR	790	550	720	680	450	650

Tableau II-11 ACR et masses opérationnelles des aéronefs [6]

Étape 4 : CDF de l'ensemble des différents types d'aéronefs [6] :

- Le CDF (Cumulative Damage Factor) est calculé en ajoutant les contributions de chaque aéronef le long d'un axe transversal perpendiculaire à l'axe de la piste.
- La figure 1-10 montre les contributions de chaque aéronef au CDF et le CDF total résultant de la composition. La valeur maximale du CDF est de 1,153, située à un décalage de 4,9 m de l'axe de la piste.

- Le CDF maximal dépasse 1,0, ce qui indique que la chaussée est sous-dimensionnée pour le trafic analysé.
- Il y a une distinction entre les contributions CDF de chaque aéronef au CDF maximal au point de décalage critique et l'endommagement maximal imputable à chaque aéronef.
- Par exemple, l'A321-200 a une contribution au CDF maximal de 0,153 et un endommagement maximal de 0,341. L'A350-900 a un endommagement maximal de 0,306, inférieur à celui de l'A321, mais sa contribution au CDF maximal est de 0,302, supérieure à celle de l'A321.
- L'aéronef ayant la plus grande contribution au CDF (par rapport au CDF maximal) devient l'aéronef le plus exigeant de l'ensemble.
- Dans cet exemple, le B777-300ER a la contribution la plus élevée au CDF maximal, évaluée à 0,399.

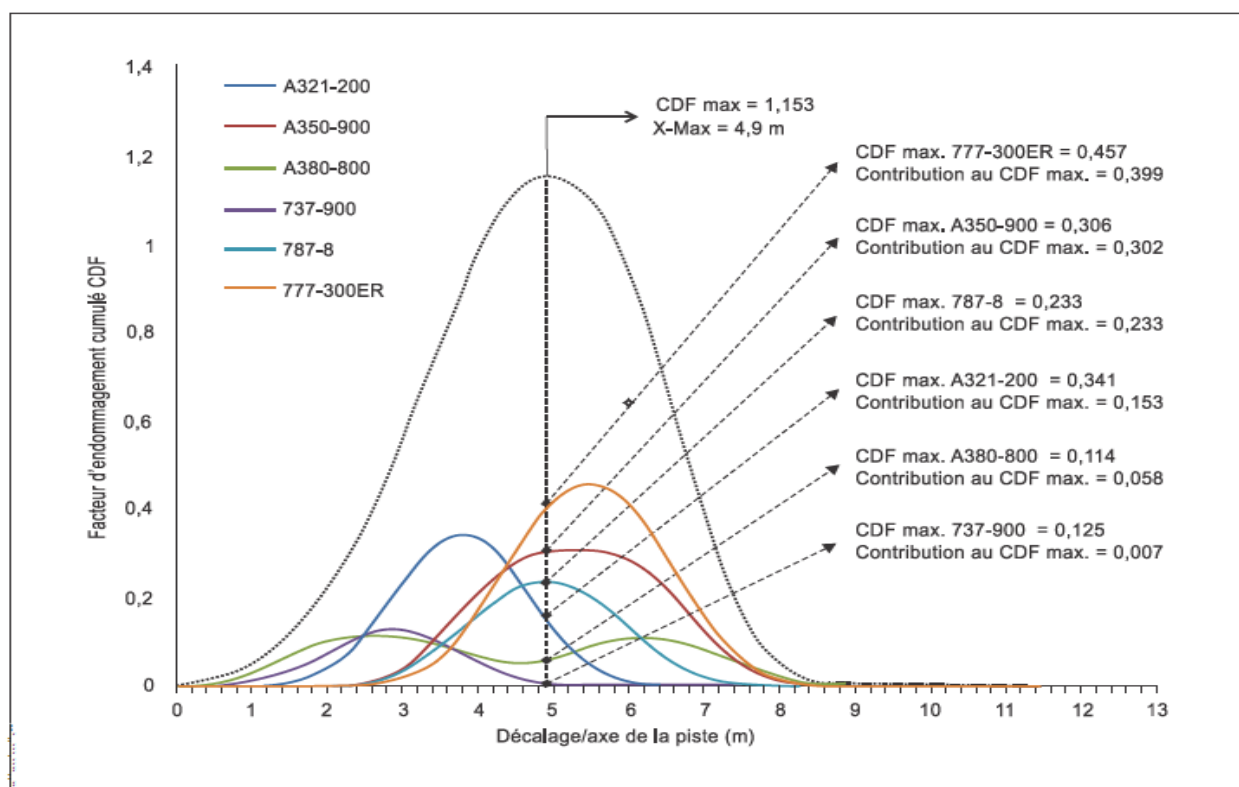


Figure II.7 CDF de l'aéronef, CDF total et contribution de l'aéronef au CDF maximal [6]

Étape 5 : Le B777-300ER est sélectionné comme l'aéronef qui contribue le plus au CDF maximal. Tous les autres aéronefs sont retirés [6].

Étape 6 : La contribution du B777-300ER au CDF maximal à son niveau initial de départs annuels est de 0,457. Le nombre de départs annuels est ajusté jusqu'à ce que le CDF soit égal à 1,153. Cette étape est réalisée par simple extrapolation linéaire, soit 11 050 départs annuels équivalents du B777-300ER (total de 110 500 départs) [6].

Étape 7 : La masse totale du B777-300ER est ajustée pour obtenir un CDF maximal de 1,0. En d'autres termes, la chaussée est maintenant correctement conçue pour accueillir le seul aéronef équivalent à sa masse ajustée et à son niveau équivalent de départs annuels. La masse totale maximale admissible est de 341,3 t [6].

Étape 8 : L'ACR du B777-300ER à sa masse totale maximale admissible est 740 F/C [6].

Étape 9 : Si l'on compare avec la liste de l'étape 3, le B777-300ER est l'aéronef dont l'ACR est maximale. Par conséquent, la procédure prend fin. La PCR à publier est égale à l'ACR du B777-300ER à sa masse [6].

Totale maximale admissible :

PCR =740 F/C/W/T.

Pour le code de pression des pneus, la lettre W est choisie puisque la chaussée évaluée est une nouvelle construction et que la composition de l'asphalte de surface a été conçue pour résister aux pressions des pneus imposés [6].

II.4 Conclusion :

Ce chapitre nous a introduits à la Méthode ACR/PCR, soulignant son importance cruciale pour l'industrie aéroportuaire moderne. Cette transition vers la Méthode ACR/PCR représente un pivot majeur dans l'optimisation de la gestion des chaussées aéroportuaires, impliquant les aéroports, les compagnies aériennes et les fabricants d'aéronefs. Des défis spécifiques, tels que la calibration des PCN et PCR pour différents types d'aéroports et la catégorisation des sous-sols en fonction du CBR, ont été mis en évidence. Ce chapitre prépare le terrain pour l'exploration plus approfondie des implications pratiques de cette transition dans le chapitre suivant.

Chapitre III :

Analyse Comparative des Méthodes
ACN-PCN et ACR-PCR pour
l'Évaluation des Chaussées d'Aéroport :
Mise en Œuvre, Avantages, et
Conclusions

III. Introduction :

Ce chapitre a pour dessein de confronter la méthode ACR-PCR à son homologue ACN-PCN et d'exposer la procédure élaborée par la Federal Aviation Administration (FAA) pour le calcul du PCR. Nous procéderons à une étude méthodique et structurée des éléments clés de l'étude, offrant ainsi une analyse approfondie.

III.1 Bilan des Systèmes ACR-PCR pour les Chaussées d'Aéroport :

III.1.1 Comparaison entre PCN et PCR pour les Chaussées Aéroportuaires :

Dans cette section, nous procéderons à une analyse approfondie des distinctions notables entre ces deux méthodes d'évaluation.

a) Définition basée sur la résistance de la sous-fondation :

PCN : Le PCN est déterminé en fonction de la résistance de la sous-fondation, évaluée en utilisant le CBR (California Bearing Ratio) pour les chaussées flexibles ou le module de réaction (k) pour les chaussées rigides [7].

PCR : En revanche, le PCR est basé sur la résistance de la sous-fondation, mais utilise le module d'élasticité (E) de la sous-fondation comme paramètre clé [7].

b) Différentes : Catégories de résistance

PCN : Pour les chaussées flexibles, les catégories de sous-fondation sont définies comme A (élevée), B (moyenne), C (faible) et D (très faible), en fonction des valeurs de CBR de la sous-fondation [7].

PCR : Les chaussées flexibles sont également classées en catégories A, B, C et D, mais cette classification dépend des valeurs du module d'élasticité (E) de la sous-fondation [7].

c) Évaluation des dommages de la sous-fondation :

PCN : Le PCN est déterminé en ajustant l'épaisseur de la chaussée pour obtenir un CDF (couche de fondation) de 1,0 pour un nombre spécifique de passages d'avion. Ensuite, l'ACR est calculé en fonction de l'intensité de charge résultante [7].

PCR : Le PCR est calculé en ajustant le poids de l'avion critique jusqu'à ce qu'il corresponde à l'ACR de l'avion critique, qui produit un CDF (couche de fondation) maximal de 1,0 [7].

d) Différentes méthodes de calcul

PCN : Les valeurs PCN sont déterminées à l'aide de méthodes d'évaluation techniques (T) ou d'utilisation des avions (U) [7].

PCR : Le PCR est déterminé en utilisant un format à cinq codes, principalement basé sur la catégorie de résistance des chaussées. Les catégories de couche de fondation sont définies en fonction du module d'élasticité (E) ou des valeurs CBR pour les chaussées flexibles [7].

III.1.2 Méthode de la FAA pour la détermination du PCR [7] :

- **Méthodologie** : La méthode de la FAA est utilisée pour estimer le PCR en convertissant le mélange de trafic des avions en un avion équivalent au poids brut maximal autorisé.
- **Avion critique** : L'avion qui contribue le plus au CDF (couche de fondation) maximum est considéré comme l'avion critique.
- **Poids brut maximal autorisé (MAGW)** : Le poids auquel l'ACR de l'avion critique est déterminé devient le PCR.
- **Outil FAARFIELD** : L'outil analytique FAARFIELD 2.0 intègre cette procédure.

III.1.3 Indice CDF et couvertures :

- **Calcul du CDF** : Le CDF est calculé à l'aide de la formule CDF **voir chapitre 2**.
- **Couvertures jusqu'à la rupture** : Deux modes de rupture, impliquant la contrainte de traction horizontale et la contrainte de compression verticale, sont pris en compte pour les chaussées flexibles [7].
- **Modèle de rupture Bleasdale** : Des équations sont fournies pour estimer les couvertures jusqu'à la rupture en fonction de la contrainte verticale en haut de couche de fondation (ϵz) [7].
- **CDF des couches d'asphalte (ac)** : Le CDF_{ac} pour les couches d'asphalte est pris en compte, et un modèle basé sur le concept du Ratio de Changement d'Énergie Dissipée (RDEC) est introduit [7].

III.1.3.1 Comparaison ACN-ACR

a) Résultats et discussions

Dans le but d'explorer une éventuelle relation entre l'ACN et l'ACR d'un aéronef, environ 170 aéronefs avec différentes configurations de trains d'atterrissage ont été sélectionnés dans la base de données de la FAA. Les valeurs d'ACN de chaque aéronef ont été estimées pour quatre catégories de couche de fondation (A, B, C et D) à l'aide de l'outil analytique COMFAA 3.0 développé par la FAA. Ensuite, pour les mêmes aéronefs, la valeur d'ACR a été estimée à l'aide de l'outil ICAO-ACR 1.32. Ces valeurs sont présentées graphiquement dans la (Figure III.1) Le coefficient de détermination R^2 a ensuite été estimé pour chaque catégorie de couche de fondation. Les résultats de l'analyse ont montré qu'il existe une forte corrélation entre les valeurs d'ACN et d'ACR pour toutes les catégories de couche de fondation, car le R^2 varie de 0,97 à 0,99 [7].

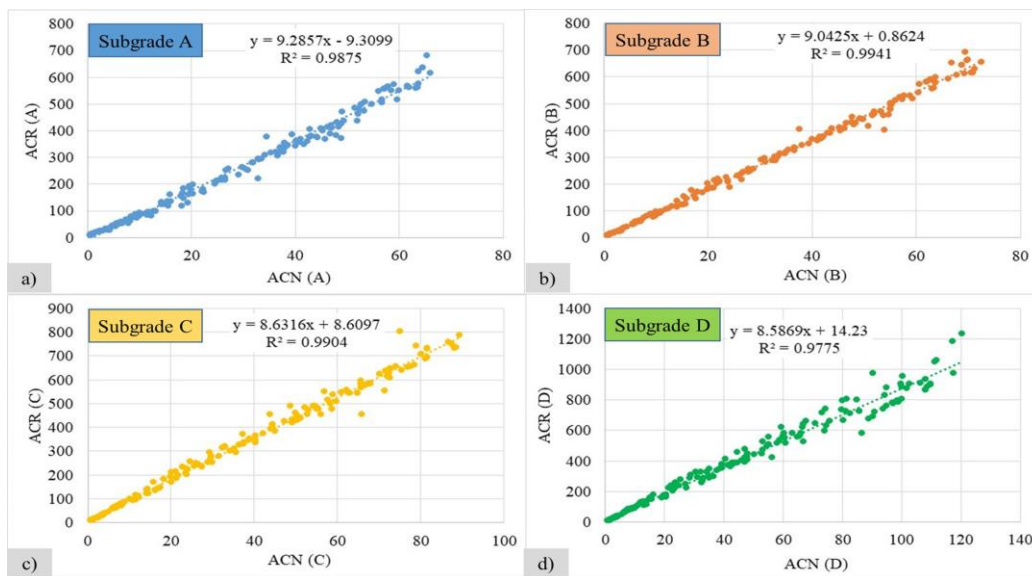


Figure III.2 Corrélation entre ACN et ACR pour la catégorie de couche de fondation : (a) A, (b) B, (c) C et (d) D

- ✓ Il convient de noter que la valeur numérique d'ACR est exprimée en centaines de kilogrammes, tandis que la valeur d'ACN est exprimée en tonnes, de sorte qu'ACR est plus élevée qu'ACN d'environ un ordre de grandeur. Cela a été délibérément défini afin d'éviter toute confusion entre les deux systèmes pendant la période de transition [7].

b) Seconde Etude:

Dans le cadre de la présente étude, le rapport ACR/ACN a également été étudié. Sur cette base, pour le même ensemble de données de 170 aéronefs, le rapport ACR/ACN a été estimé pour chaque catégorie de couche de fondation. [7]

- ✓ La distribution du rapport ACR/ACN pour chaque catégorie de couche de fondation est présentée dans la (Figure III.2) sous forme de boîtes à moustaches, où la ligne interne des boîtes à moustaches fait référence aux valeurs moyennes [7].

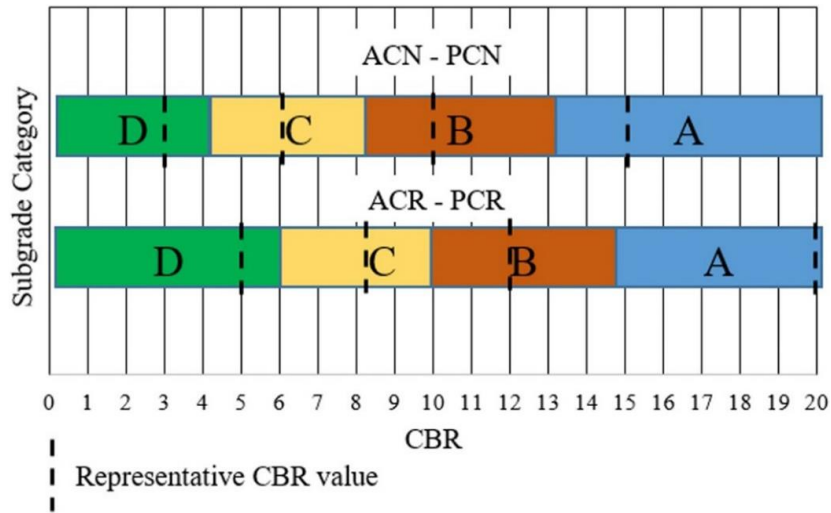


Figure III.3 Ratio de ACR/ACN.

Les résultats montrent que le rapport entre les deux indices n'est pas constant pour chaque catégorie de couche de fondation et dans la plupart des cas, il est inférieur à 10. Cependant, il existe des cas où l'ACR peut être jusqu'à vingt fois supérieure à l'ACN, comme observé dans le cas de la catégorie de couche de fondation A [7].

Afin d'approfondir l'analyse de la relation entre les indices ACN et ACR, 32 aéronefs de la bibliothèque d'aéronefs de la FAA ont été sélectionnés, ayant la même configuration de train d'atterrissage.

Les valeurs d'ACN et d'ACR pour chaque catégorie de couche de fondation sont présentées dans les (Figures Figure III. 5/.6/.7/.8), où les aéronefs sont classés par ordre croissant d'ACN pour toutes les catégories de couche de fondation [7].

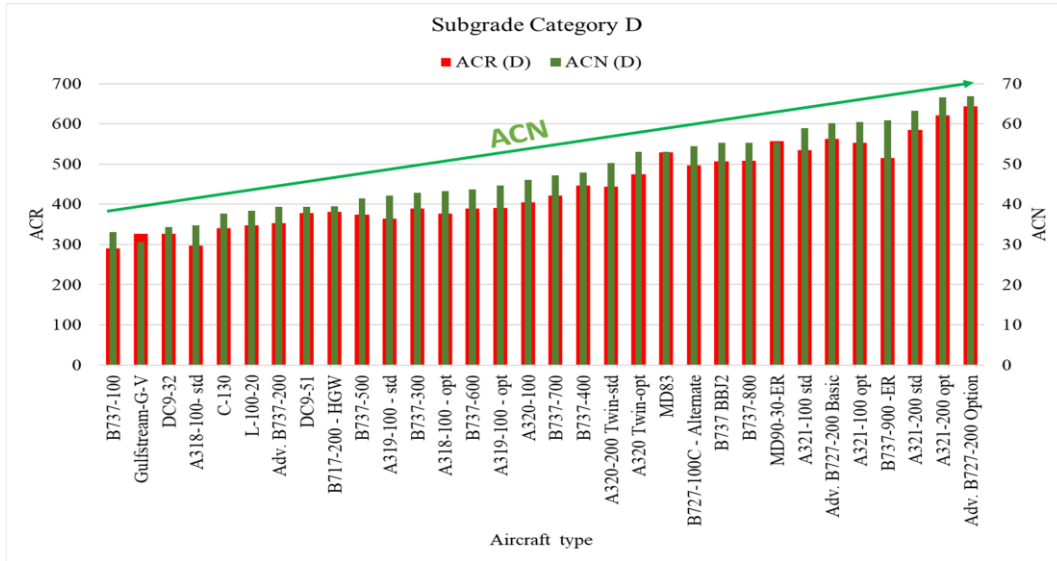


Figure III.4 Comparaison des valeurs de ACN et de ACR des aéronefs avec une configuration à double roue pour la catégorie de couche de fondation D. [7]

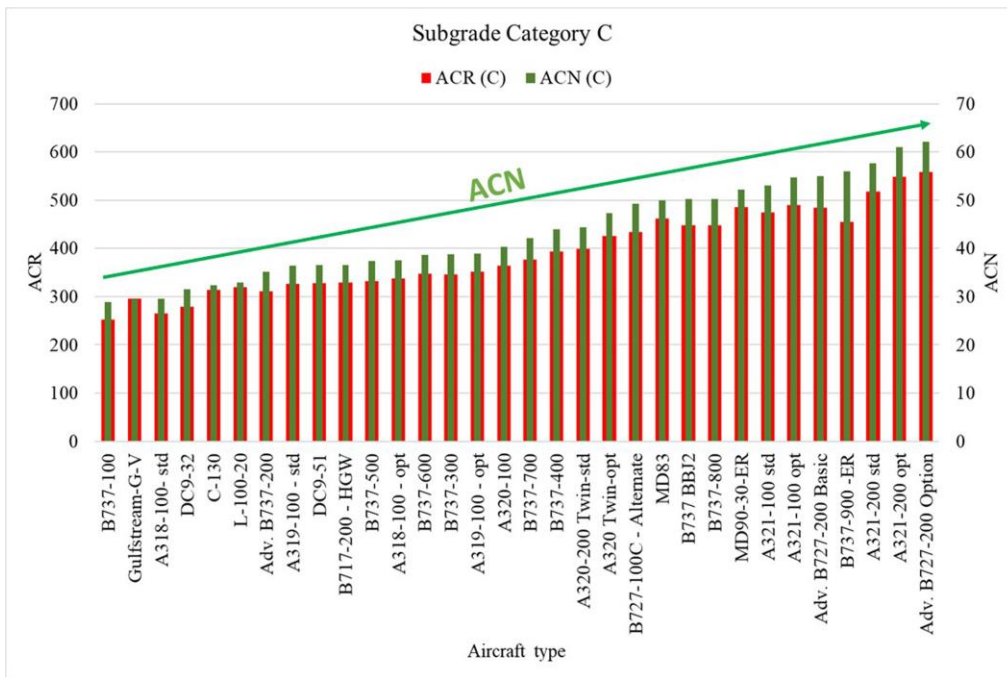


Figure III.5 Comparaison des valeurs de ACN et de ACR des aéronefs avec une configuration à double roue pour la catégorie de couche de fondation C. [7]

Chapitre III : Analyse Comparative des Méthodes ACN-PCN et ACR-PCR pour l'Évaluation des Chaussées d'Aéroport : Mise en Œuvre, Avantages, et Conclusions

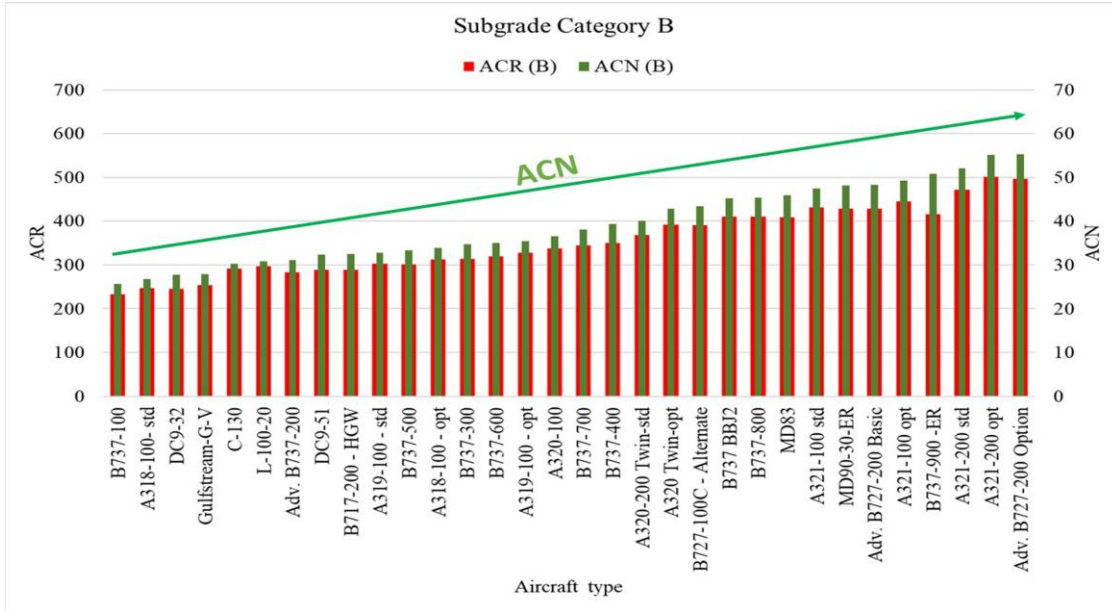


Figure III.6 Comparaison des valeurs de ACN et de ACR des aéronefs avec une configuration à double roue pour la catégorie de couche de fondation B. [7]

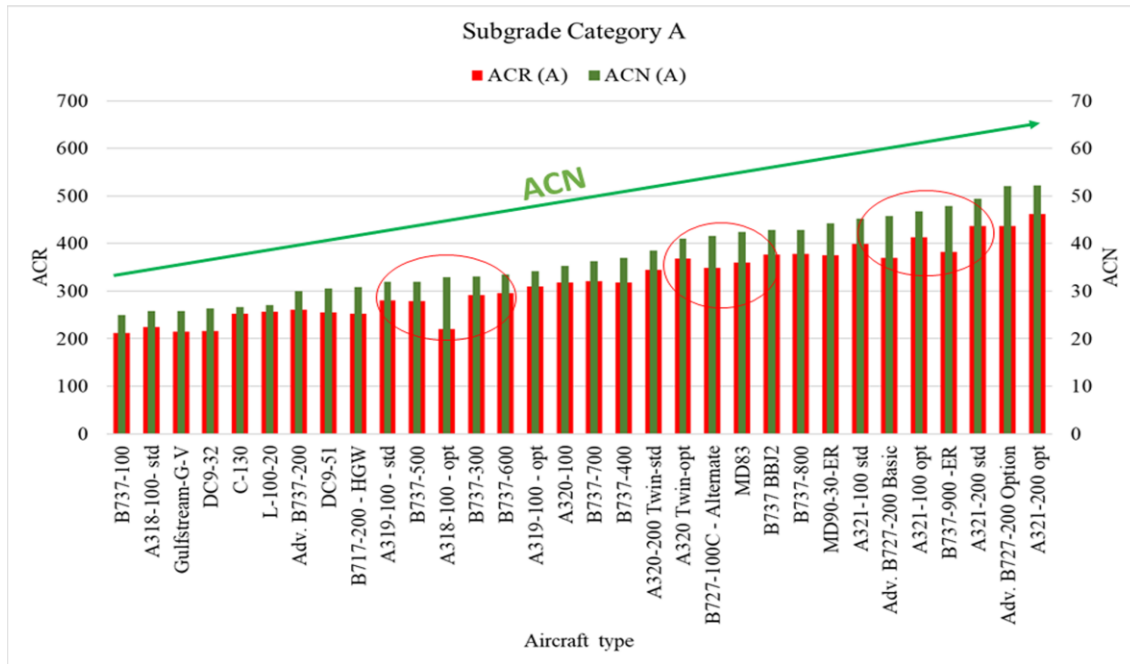


Figure III.7 Comparaison des valeurs de ACN et de ACR des aéronefs avec une configuration à double roue pour la catégorie de couche de fondation A. [7]

- Les quatre figures montrent que la variation des valeurs d'ACN ne suit pas la variation d'ACR, car il est observé qu'à mesure qu'ACN augmente, ACR présente plusieurs fluctuations [7].

Résultat : Les résultats de l'analyse montrent une forte corrélation entre les valeurs d'ACN et d'ACR pour toutes les catégories de couche de fondation, avec des coefficients de détermination (R^2) élevés, allant de 0,97 à 0,99. Cependant, il est important de noter que l'ACR est généralement plus élevée que l'ACN d'environ un ordre de grandeur. De plus, l'analyse révèle que le rapport ACR/ACN n'est pas constant pour chaque catégorie de couche de fondation et peut varier considérablement, parfois même jusqu'à vingt fois plus élevé pour la catégorie de A. Cette variabilité suggère que la mise en œuvre du système ACR-PCR peut entraîner des fluctuations dans les dommages relatifs des avions, ce qui doit être pris en compte lors de l'évaluation des chaussées. [7]

c) Analyse et Discussion :

Contexte de l'Étude : L'étude mentionne que la valeur ACN de l'avion A321-100 est inférieure à celle du B737-900, tandis que la valeur ACR de l'A321-100 est plus élevée que celle du B737-900 voir (Figure III.6). Ces observations ont incité les auteurs à examiner les fluctuations d'ACN et d'ACR en termes de dommages relatifs de ces avions et de la réponse des chaussées associées [7].

III.1.3.1 Méthodologie de l'Étude :

- Une section transversale hypothétique de chaussée flexible a été utilisée, avec les mêmes caractéristiques de couches et mécaniques que la section de référence utilisée pour le calcul de l'ACR (Figure III. 7).

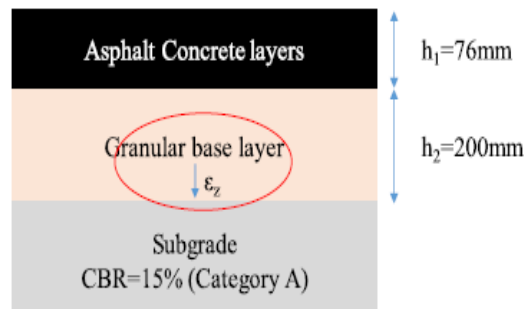


Figure III.8 Coupe transversale de chaussée pour l'analyse de la réponse de la chaussée et l'analyse de la couche de fondation (CDF) [7].

Chapitre III : Analyse Comparative des Méthodes ACN-PCN et ACR-PCR pour l'Évaluation des Chaussées d'Aéroport : Mise en Œuvre, Avantages, et Conclusions

- L'épaisseur de la couche de base granulaire, qui varie lors du calcul de l'ACR, a été considérée constante à 200 mm pour que l'analyse de la réponse soit significative [7].
- Pour chaque avion, la déformation verticale en haut de la couche de fondation et le CDF (couche de fondation) correspondant avec 1 départ annuel ont été estimés à l'aide de la procédure d'évaluation analytique la plus récente développée par la FAA [7].
- Le paramètre CDF (couche de fondation) a été fixé à 1 pour chaque avion afin d'investiguer les dommages relatifs de chaque avion.
- Les résultats sont présentés dans les Figure III.8 et Figure III.9 [7].

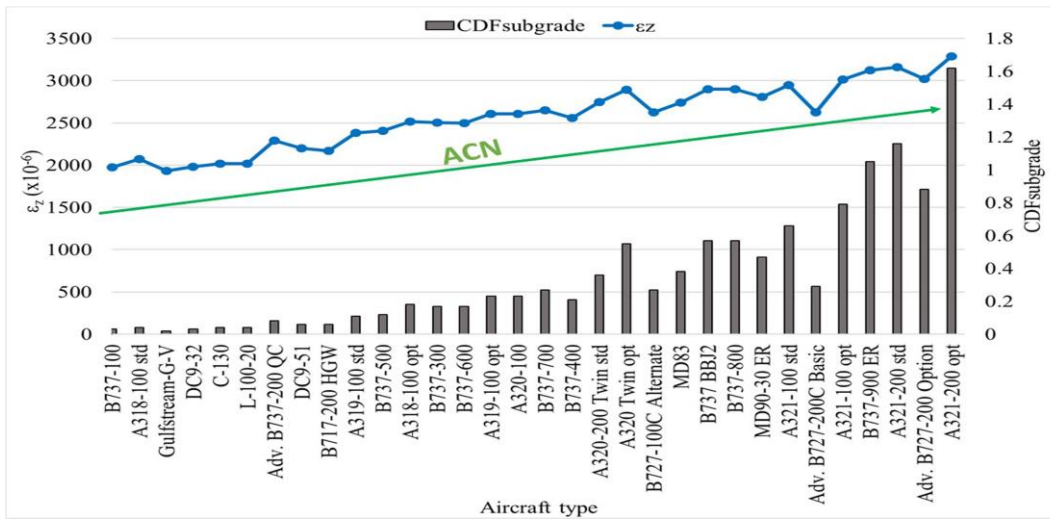


Figure III.9 Variation de la contrainte verticale et de la CDF couche de fondation avec l'augmentation de l'ACN [7].

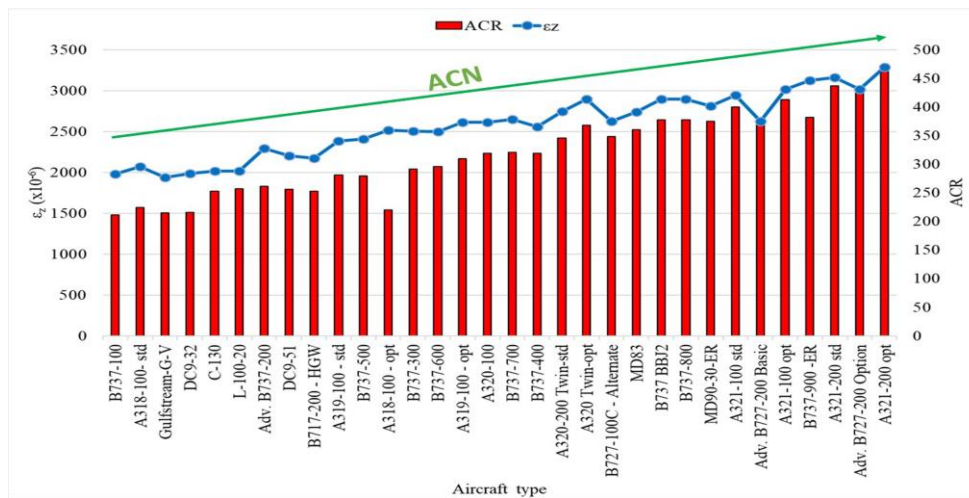


Figure III.10 Variation de la contrainte verticale et de l'ACR avec l'augmentation de l'ACN [7].

a) Analyse des Résultats:

- **Figure III.8 :** Montre que, à mesure que l'ACN de l'avion augmente pour la catégorie A, il y a une variation de la déformation verticale qui suit la variation du CDF couche de fondation [7].
- **Figure III.9:** Suggère que la variation de l'ACR suit généralement la variation des valeurs de CDF couche de fondation des avions [7].

b) Interprétation des Résultats:

- La variation de l'ACR suit la variation de la contrainte critique et donc du CDF couche de fondation, ce qui suggère que la modélisation utilisée pour la procédure de rapport ACR-PCR mise à jour est plus appropriée que celle utilisée pour l'ACN [7].
- Cependant, cette observation ne s'applique pas à tous les avions examinés, comme le montre la Figure III.10, où des avions avec des valeurs d'ACR plus élevées peuvent causer moins de dommages à la chaussée que ceux avec des valeurs d'ACR plus faibles [7].

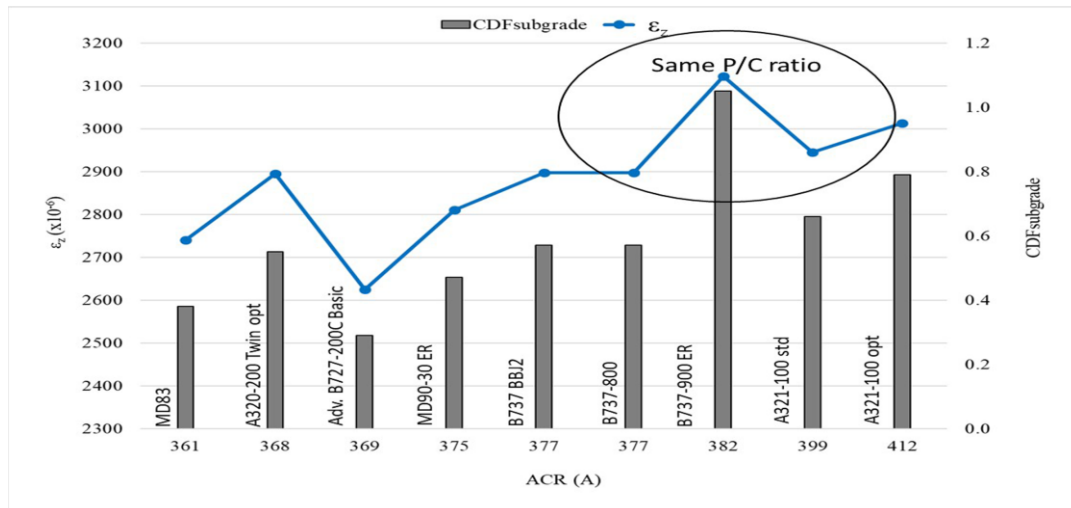


Figure III.11 Variation de la contrainte verticale et du CDF de la couche de fondation avec l'augmentation de l'ACR. [7]

c) Conclusion :

- Les résultats suggèrent que des investigations plus approfondies sont nécessaires pour améliorer la modélisation utilisée pour l'estimation de l'ACR. [7]

- Bien que la corrélation entre ACN et ACR soit forte (Figure III.3), la variation d'ACN ne suit pas toujours la variation d'ACR (Figure III. 5/8), ce qui soulève des questions sur la manière dont certains avions impactent les chaussées lorsqu'ils sont exprimés à travers l'ACR [7].

Résultat Final : Les résultats de cette analyse indiquent que la relation entre ACN et ACR est complexe et que la mise en œuvre du système ACR-PCR peut conduire à des résultats incohérents pour certains avions. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour affiner la modélisation de l'ACR et mieux comprendre la manière dont ces indices reflètent les dommages réels causés aux chaussées par différents avions [7].

III.1.3.2 Comparaison PCN-PCR :

a) Analyse et Discussion :

Après avoir examiné la comparaison ACN-ACR, l'étude se penche sur la relation entre le PCN et le PCR. À cet effet, 28 sections transversales de chaussée flexible ont été conçues à l'aide de la procédure de conception analytique la plus récente développée par la FAA et l'outil analytique correspondant (FAARFIELD 2.0). La section transversale typique de chaussée utilisée pour la conception comprenait des couches de béton bitumineux, une couche de base granulaire et une couche de fondation en utilisant des matériaux typiques de la FAA (béton bitumineux P-401 et couche de base granulaire P-209). Quatre valeurs de CBR de la couche de fondation ont été prises en compte pour la conception (CBR = 4 % (D), 8 % (C), 12 % (B), 15 % (A)) comme le montre la (Figure III.12). [7]

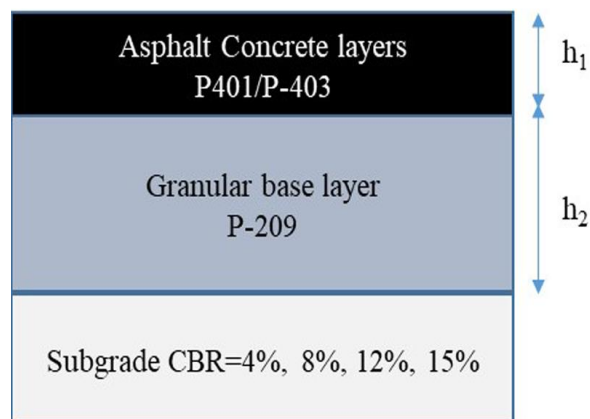


Figure III.13 Coupe transversale du revêtement utilisée pour l'analyse de sensibilité. [7]

b) Méthodologie de l'Étude :

- La sélection des valeurs de CBR a été effectuée de manière à ce que le CBR appartienne à la même catégorie de la couche de fondation, quel que soit le système de rapport utilisé.

Pour chaque catégorie de la couche de fondation, sept sections transversales ont été conçues, en supposant que l'épaisseur des couches de béton bitumineux est égale à $h_1=100$ mm, 120 mm, 150 mm, 180 mm, 200 mm, 250 mm, 280 mm, et en estimant l'épaisseur de la couche de base granulaire pour atteindre un $CDF=1$ pour un mélange de trafic indicatif présenté dans le Tableau III.1. [7]

Aircraft type	Annual departures	Gross Taxi weight (tns)	Tire pressure (MPa)
B717-200 HGW	275	55.338	1.131
B737-300	518	63.503	1.386
B737-700	498	70.307	1.358
B737-800	12739	79.243	1.407
A319-100std	1116	64.400	1.190
A321-100std	2068	83.400	1.360
A321-200std	532	89.400	1.462
A320-200 twin std	10238	73.900	1.380

Tableau III-1 Les caractéristiques de charge des avions . [7]

c) Analyses des Résultats :

- Les valeurs de PCR sont restées constantes pour les sections transversales avec la même catégorie de couche de fondation et CDF (couche de fondation) =1, tandis que les valeurs de PCN ont varié considérablement [7].
- Il n'y a pas de corrélation entre les deux indices [7].

Il est également observé que des sections transversales de chaussée avec différentes valeurs de PCN, et donc de résistance différente, rapportent la même capacité de charge en fonction du système de rapport ACR-PCR mis à jour

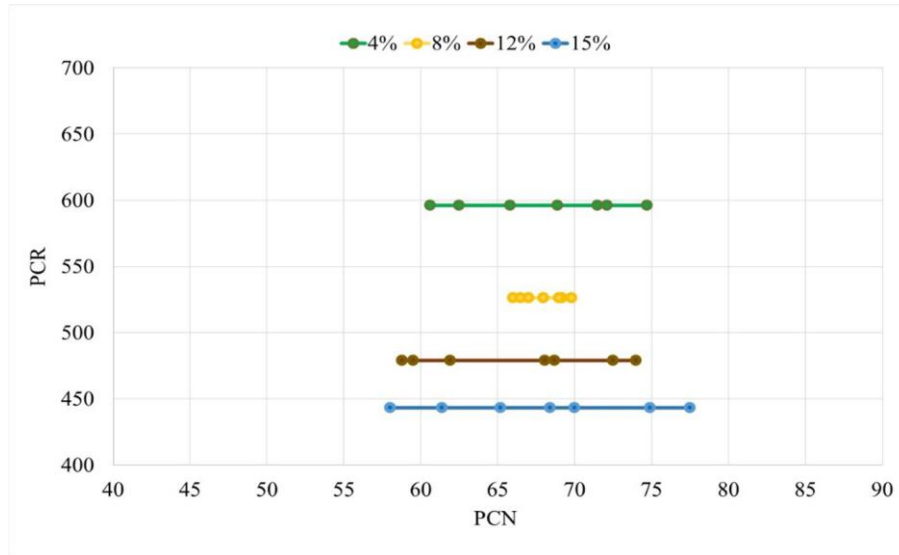


Figure III.14 résultats de comparaison entre PCN ET PCR [7]

d) Conclusion :

Les résultats montrent que le système de rapport ACR-PCR mis à jour a une incidence significative sur la capacité de charge rapportée par les sections transversales de chaussée par rapport au système de rapport PCN. [7]

- Il n'y a pas de corrélation entre PCN et PCR, ce qui suggère que les deux indices évaluent la capacité de charge de manière indépendante.
- Les résultats indiquent que le système de rapport ACR-PCR pourrait mieux refléter la capacité de charge réelle des chaussées par rapport au système de rapport PCN, qui peut varier considérablement en fonction de la résistance de la chaussée.
- De plus amples recherches sont nécessaires pour comprendre pleinement les implications de cette différence et pour affiner le système de rapport ACR-PCR en conséquence.

III.1.3.3 Impact de la PCR non restreinte:

a) Analyse et Discussion :

L'étude souligne que la présentation du PCR d'une chaussée sans restrictions de poids pourrait entraîner des dommages potentiels importants aux couches de béton bitumineux, ce qui peut être exprimé à travers le CDFac. Étant donné que l'indice CDF indique les besoins de maintenance ou de réhabilitation, on peut remarquer l'importance remarquable de l'évaluation détaillée des chaussées d'aéroport (Figure III.15). Cette question est considérée comme déterminante dans le cadre de la prise de décision en matière de gestion des chaussées d'aéroport. [7]

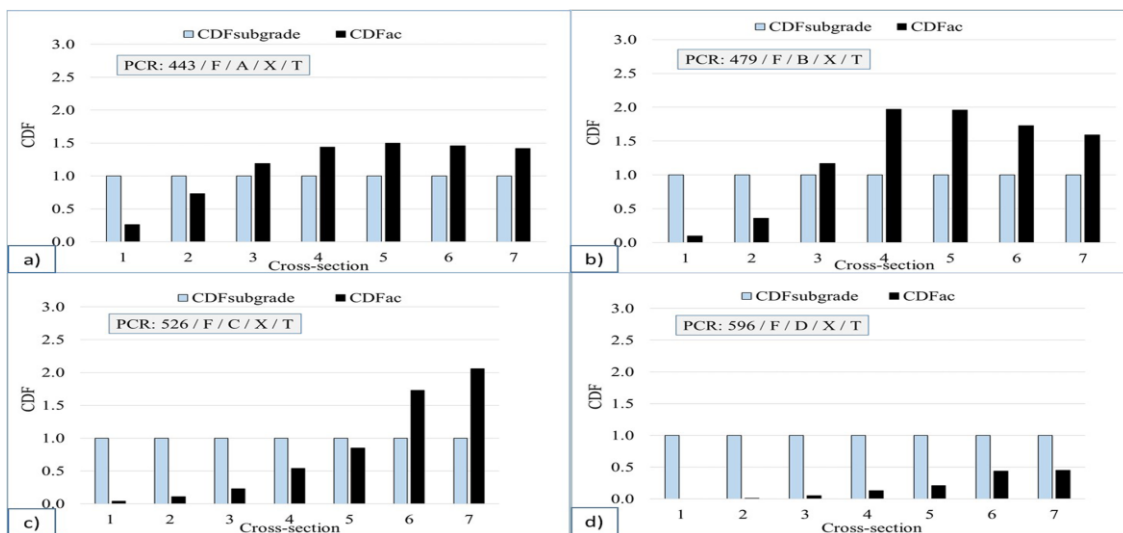


Figure III.13 CDF sous-couche, CDFac et PCR pour les sections transversales avec les catégories de couche de fondation : (a) A, (b) B, (c) C et (d) D. [7]

• Analyses:

- La dépendance de l'ACR-PCR vis-à-vis de la défaillance de la couche de fondation limite sa capacité à refléter les dommages potentiels des couches de béton bitumineux.
- L'indice PCR doit être utilisé en conjonction avec d'autres évaluations pour une gestion efficace des chaussées d'aéroport.
- L'entretien et la réhabilitation des couches de béton bitumineux doivent être pris en compte pour garantir la performance globale de la chaussée d'aéroport.
- La gestion des chaussées d'aéroport doit tenir compte de l'importance de l'évaluation détaillée pour prendre des décisions éclairées.

• **Résultats :**

1. L'ACR-PCR est basé sur la défaillance de la couche de fondation, ce qui peut conduire à des sections avec le même PCR mais des niveaux de dommages différents des couches de béton bitumineux ($CDFac < 1$ ou $CDFac > 1$).
2. L'indice PCR ne peut pas représenter de manière adéquate la variation des dommages des couches de béton bitumineux.
3. Le système ACR-PCR n'est pas destiné à remplacer les procédures d'évaluation détaillée des chaussées, mais à fournir une méthode pour évaluer les opérations acceptables des aéronefs.
4. L'acceptation d'aéronefs avec des valeurs ACR inférieures au PCR rapporté peut entraîner des dommages potentiels importants aux couches de béton bitumineux (exprimés par $CDFac$).

III.1.3.4 Mise en œuvre des procédures de rapport ACN-PCN et ACR-PCR [7]:

Pour quantifier l'impact des évolutions actuelles sur la capacité de charge rapportée des chaussées d'aéroport, une enquête supplémentaire a été menée, comprenant l'estimation des valeurs PCN et PCR pour deux chaussées d'aéroport de piste.

Les données collectées pour la recherche provenaient de la chaussée flexible de deux aéroports régionaux d'importance stratégique pour la région du sud-est de l'Europe.

a) Chaussées d'aéroport étudiées :

L'étude se penche sur deux pistes d'aéroport différentes avec des caractéristiques de chaussée variées [7].

A. Partie 01 :

1. Description de la section de chaussée aéroportuaire sous investigation N01 [7] :

- La (Figure III.16), présente Les chaussées étudiées étaient principalement composées de couches de béton bitumineux d'environ 140 mm d'épaisseur, d'une couche de base granulaire d'environ 400 mm et d'une couche de fondation en gravier naturel voire.

- Les matériaux typiques de la FAA (P-401 pour le béton bitumineux et P-154 pour la couche granulaire) ont été utilisés pour l'analyse.
- La chaussée était censée supporter annuellement la flotte d'aéronefs présentée dans le Tableau 2 pendant une période de 20 ans

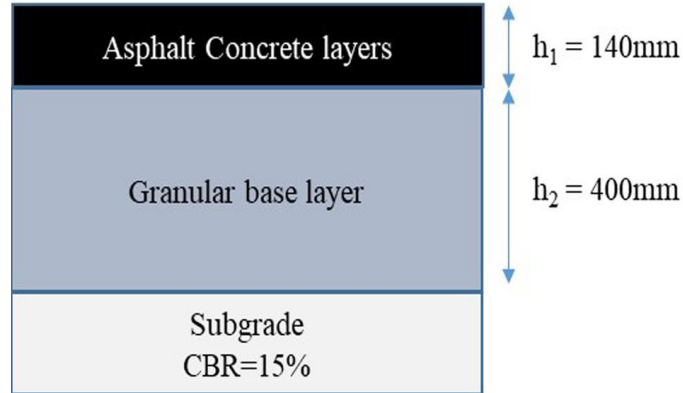


Figure III.17 Coupe transversale de la chaussée de la piste d'atterrissage. [7]

Aircraft type	Annual departures	Gross Taxi weight (tns)	Tire pressure (MPa)
B737-300	1522	63.503	1.386
B737-700	3520	70.307	1.358
B737-800	15232	79.243	1.407
A319-100std	5522	64.400	1.190
A321-200std	3251	89.400	1.462
A320-200 twin std	19583	73.900	1.380

Tableau III-2 la flotte d'aéronefs que La chaussée était censée supporter annuellement [7]

III.1.3.4.1 Estimation du PCN et du PCR

a) Analyse et Discussion :

- Initialement, étant donné que le CBR de couche de fondation de la chaussée était de 15 % (Figure III.18), la couche de fondation a été classé dans la catégorie A.
- En suivant la procédure d'évaluation technique présentée dans la littérature, le PCN de la chaussée a été estimé en convertissant l'épaisseur de la chaussée en une section de chaussée flexible standard, comme recommandé par la FAA [7].

Chapitre III : Analyse Comparative des Méthodes ACN-PCN et ACR-PCR pour l'Évaluation des Chaussées d'Aéroport : Mise en Œuvre, Avantages, et Conclusions

- En utilisant COMFAA 3.0, le PCN a été déterminé comme étant 58/F/A/X/T pour cette chaussée. Le calcul a été basé sur une épaisseur équivalente de 558 mm, voir (Figure III.19).
- La PCR a été estimé à l'aide de FAARFIELD 2.0 en utilisant une procédure technique spécifique. Pour cette chaussée, le PCR a été calculé à 383/F/A/X/T. voir (Figure III.20).

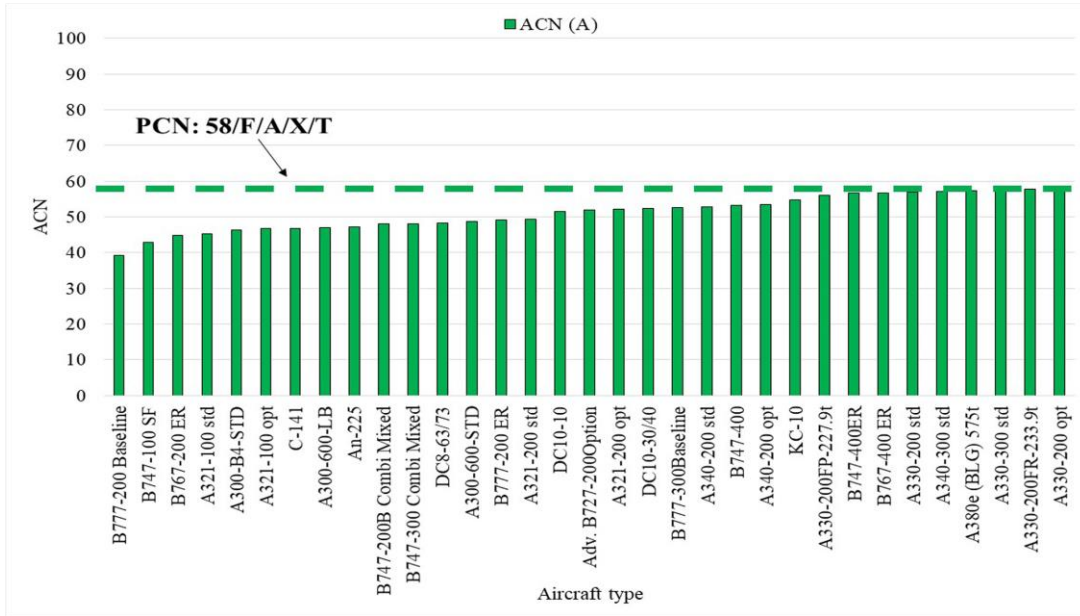


Figure III.21 Valeurs ACN des avions pour la catégorie couche A comparées au PCN [7]

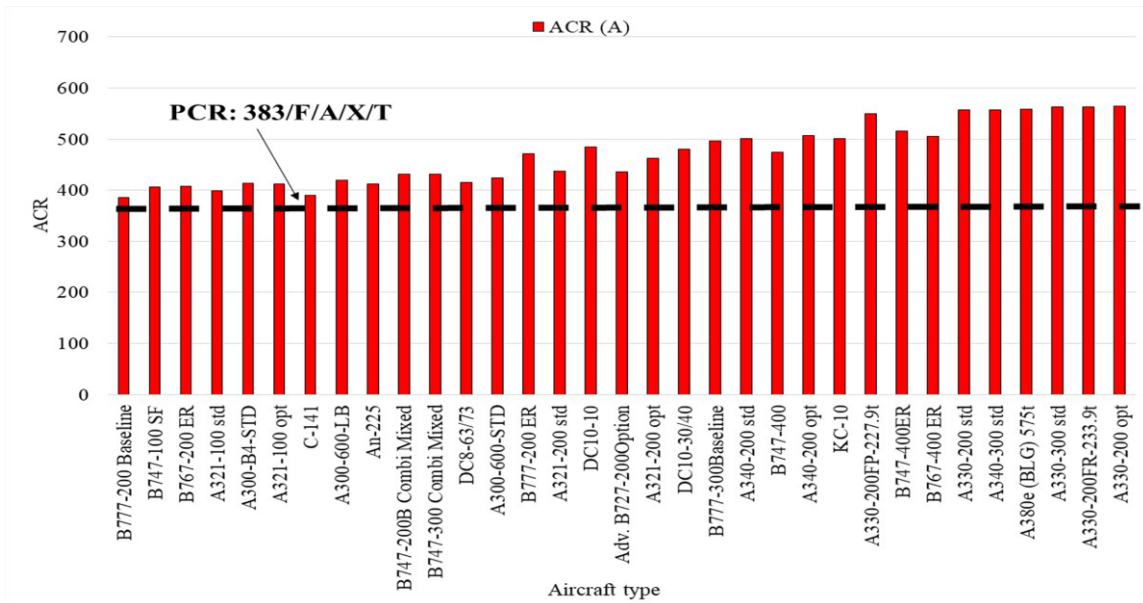


Figure III.22 Valeurs ACR des avions pour la catégorie A comparées au PCR [7].

b) Analyse et résultats :

Figure 15 - Types d'aéronefs avec des valeurs ACN inférieures au PCN

Dans cette figure, 33 types d'aéronefs avec des valeurs ACN inférieures au PCN ont été sélectionnés. Cela signifie que la chaussée pourrait supporter leur charge sans restrictions en fonction du PCN. [7]

Figure 16- Valeurs ACR pour les aéronefs

Cette figure présente les valeurs ACR estimées pour les aéronefs sélectionnés, en fonction du PCR de la chaussée. Les résultats montrent que les valeurs ACR dépassent le PCR, ce qui signifie que la chaussée ne peut pas accepter les opérations de ces aéronefs sans restriction selon le nouveau système. [7]

c) Conclusion pour la première chaussée N01 :

Dans cette première étude de cas, il est clair que le PCR est plus conservateur que le PCN, car il limite davantage les opérations d'aéronefs. Par conséquent, il est important de prendre en compte ces différences lors de la gestion des chaussées aéroportuaires et de la prise de décision concernant les opérations d'aéronefs. [7]

B. Partie 02 :

1. Description de la section de chaussée aéroportuaire sous investigation N02 :

- L'étude se concentre sur une autre chaussée flexible (Figure III.23) avec une structure différente et une catégorie de sous-fondation différente.
- La chaussée étudiée a été convertie en une épaisseur de chaussée d'évaluation équivalente de 992 mm
- En utilisant cette épaisseur, un CBR de couche de fondation de 5,5 %.
- La structure de la chaussée en question comprenait les éléments suivants :
 - Couches de béton bitumineux avec une épaisseur d'environ 200 mm.
 - Une couche de base granulaire d'environ 500 mm.
 - Une couche de sous-fondation constituée de gravier naturel.

- Les matériaux de la FAA, notamment le matériau P-401 pour les couches de béton bitumineux et le matériau P-209 pour la couche granulaire, ont été utilisés pour l'analyse.
- La couche granulaire présentait une valeur de module d'élasticité de 520 MPA.[7]

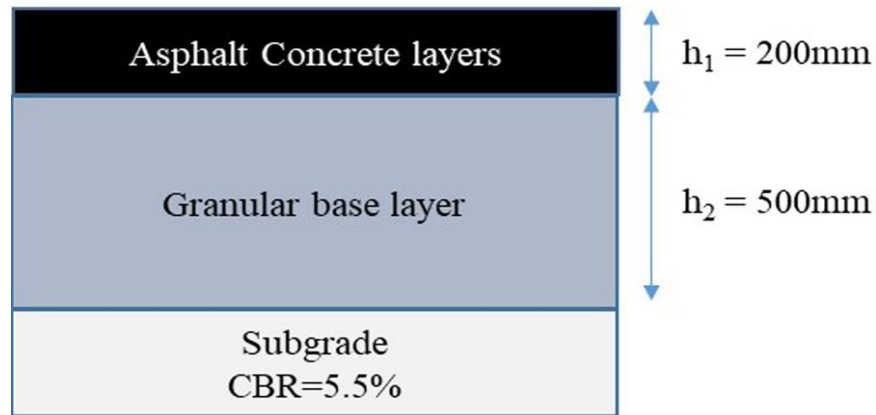


Figure III.24 Coupe transversale de la chaussée de la piste d'atterrissage. [7]

2. Analyse et discussions :

- Une analyse similaire a été entreprise pour évaluer une autre chaussée flexible d'une piste d'atterrissage distincte.
- Cette piste avait une configuration similaire à celle illustrée dans la (Figure III.25).
- L'objectif était de déterminer la capacité portante de cette chaussée pour une utilisation annuelle, en tenant compte d'un mélange de trafic spécifique indiqué dans le (Tableau III.1).
- La période de conception de la chaussée a été fixée à 20 ans.

III.1.3.4.2 Estimation du PCN et de PCR :

Le PCN a été estimé pour cette chaussée en utilisant une épaisseur déterminée précédemment, un CBR de couche de fondation de 5,5 %, le mélange de trafic du (Tableau III.1) et COMFAA 3.0, pour le PCN voir (Figure III.18) et le PCR voir (Figure III.19) en utilisant FAARFIELD 2.0 de la chaussée a été déterminé :

a) PCN :

- Le PCN a été déterminé comme étant 57/F/C/X/T pour cette chaussée, basé sur une épaisseur équivalente de 992 mm. [7]

Chapitre III : Analyse Comparative des Méthodes ACN-PCN et ACR-PCR pour l'Évaluation des Chaussées d'Aéroport : Mise en Œuvre, Avantages, et Conclusions

- En utilisant cette 57/F/C/X/T. L'aéronef critique pour le calcul était l'A321-200std avec un ACN(C) de 57,6.

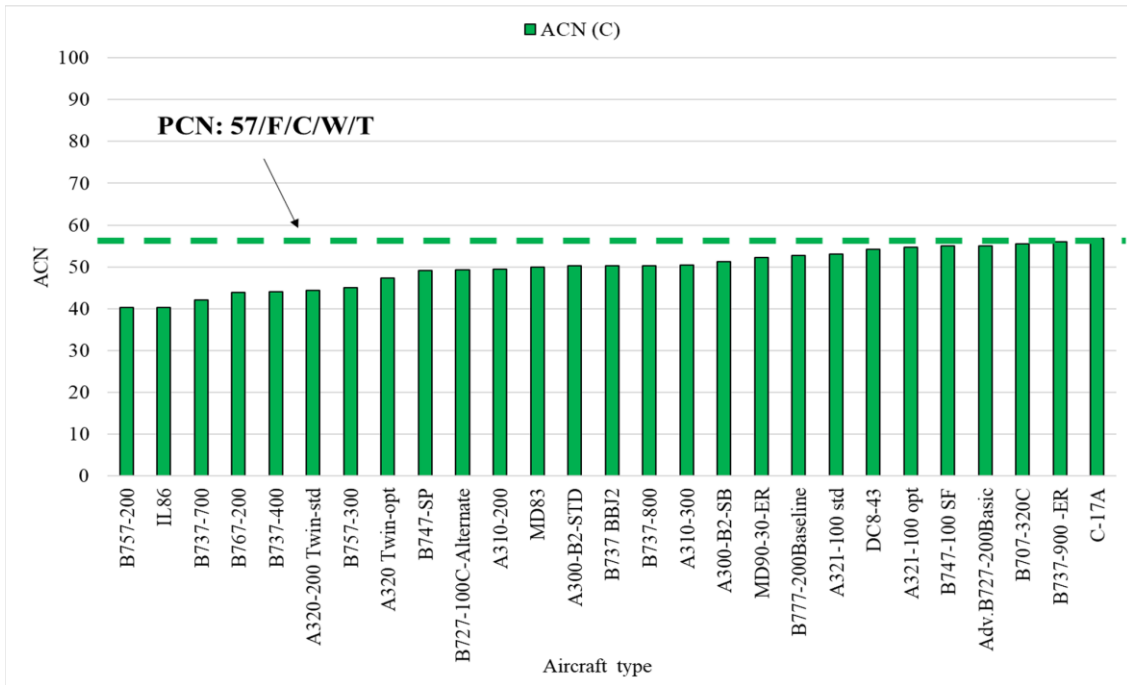


Figure III.26 Valeurs ACN des avions pour la catégorie C comparées au PCN [7]

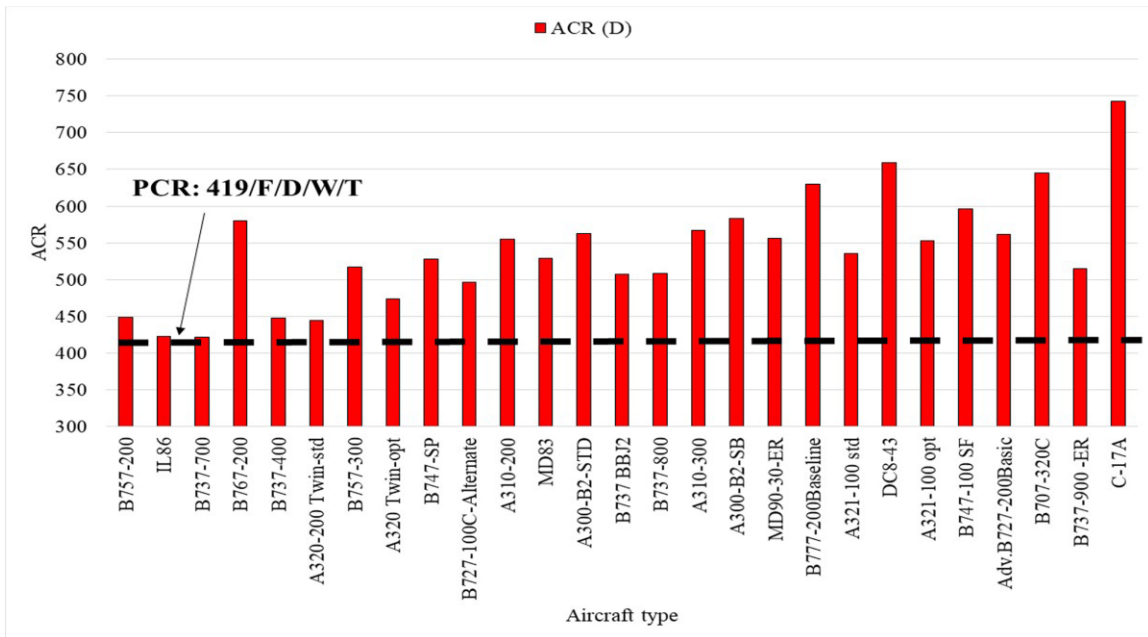


Figure III.27 Valeurs ACR des avions pour la catégorie D comparées au PCR. [7]

b) PCR :

- La PCR a été estimée en utilisant la procédure d'évaluation technique présentée dans la littérature. En appliquant les mêmes hypothèses concernant les types de matériaux et le mélange de trafic du Tableau III.1, le PCR a été calculé à 419/F/D/X/T. [7]

c) Analyse des Figures :

- **Figure III.20 - Types d'aéronefs avec des valeurs ACN inférieures au PCN pour la deuxième chaussée :** Cette figure présente 27 types d'aéronefs avec des valeurs ACN inférieures au PCN pour cette chaussée. Ce qui signifie que la chaussée pourrait supporter leur charge sans restriction. [7]
- **Figure III.21 - Valeurs ACR pour les aéronefs pour la deuxième chaussée :** Cette figure présente les valeurs ACR estimées pour les mêmes types d'aéronefs, mais en fonction du PCR de la chaussée. Les résultats montrent que les valeurs ACR dépassent également le PCR pour cette chaussée. [7]

Résultats: [7]

- L'analyse a montré que les valeurs ACR de ces aéronefs dépassaient le PCR rapporté, ce qui signifie que selon le nouveau système, la chaussée de la piste ne peut pas accepter les opérations de ces aéronefs sans restriction.
- De plus, les valeurs ACR de la catégorie de couche de fondation D pour ces aéronefs présentaient des fluctuations significatives par rapport à la tendance croissante des valeurs ACN des mêmes aéronefs pour la catégorie de couche de fondation C.

d) Conclusion générale de l'étude :

- Les résultats de cette investigation mettent en lumière l'impact potentiel des évolutions actuelles dans la présentation de la capacité de charge des chaussées d'aéroport. Plusieurs points clés émergent de cette étude :
- L'importance de l'évaluation détaillée des chaussées d'aéroport est soulignée, car elle peut avoir un impact significatif sur les besoins de maintenance ou de réhabilitation.

- Il est crucial de comprendre les implications des nouvelles méthodes de rapport, telles que l'ACR-PCR, pour prendre des décisions éclairées en matière de gestion des chaussées d'aéroport.
- Les observations de cette analyse suggèrent que l'ACR-PCR peut avoir un impact significatif sur la manière dont la capacité de charge des chaussées d'aéroport est rapportée et gérée.
- La PCR peut être plus conservateur que le PCN en termes de charge d'aéronefs que la chaussée peut supporter, soulignant ainsi la nécessité de prendre en compte les différences entre ces systèmes.
- L'analyse souligne également l'importance de prendre en compte le mode de défaillance du béton bitumineux, car il peut être crucial pour les performances des chaussées d'aéroport.
- Enfin, cette investigation pourrait servir de base pour des études futures, en tenant compte de différentes caractéristiques de chaussées, de flottes d'aéronefs et de matériaux, afin de renforcer ces conclusions et d'affiner les méthodes d'évaluation.
- Concernant les avantages de l'ACR-PCR, l'étude indique que ce système semble plus cohérent avec les dernières techniques d'évaluation des chaussées d'aéroport en raison de ses procédures analytiques détaillées. Cependant, il est essentiel de noter que l'ACR doit être estimé indépendamment de l'ACN pour éviter toute confusion.
- De plus, il est important de noter qu'il n'y a pas de corrélation entre les indices PCN et PCR, ce qui signifie que ces systèmes évaluent la capacité portante de manière différente. Cette comparaison détaillée met en évidence les différences clés entre les systèmes ACN-ACR et PCN-PCR, ainsi que les implications de ces différences pour l'évaluation de la capacité portante des chaussées d'aéroport. En résumé, cette étude souligne l'importance de choisir le système d'évaluation le plus approprié en fonction des besoins spécifiques de gestion des chaussées d'aéroport.

III.2 Avantages, Modifications et Objectifs de la Méthode ACR/PCR :

III.2.1 Avantages de la méthode ACR-PCR :

- La méthode ACR/PCR renouvelée surmonte les limitations identifiées du système actuel et permet de prendre pleinement en compte les dernières évolutions dans le domaine.
- Elle élimine le besoin de facteurs d'équivalence ou de facteurs alpha existants, dont la définition peut être controversée.

- Cette méthode offrira plusieurs avantages aux propriétaires d'aéroports [13] :
- Utilisation optimisée de leurs revêtements.
- Cohérence entre la conception des revêtements et les paramètres d'admissibilité des aéronefs.
- Disponibilité d'une procédure de calcul générique du PCR.
- Amélioration de la prévisibilité de la durée de vie des revêtements.
- Méthode de caractérisation unifiée des sols pour les revêtements flexibles et rigides.
- Cela bénéficiera également aux compagnies aériennes et, en fin de compte, à l'ensemble de la communauté du transport aérien en permettant des poids et des fréquences d'exploitation optimisés, par opposition au système actuel basé sur le CBR, qui est souvent trop conservateur.
- La nouvelle méthode pourrait être utilisée par les aéroports pour soutenir leur système de gestion des revêtements et le régime subséquent d'inspection et de maintenance.

III.2.2 Modifications à Apporter :

- En conservant la même apparence et simplicité du système actuel, les changements ne seront pas aussi substantiels qu'ils pourraient sembler à ceux qui ne sont pas familiers avec les revêtements d'aéroport. La comparaison directe de deux nombres restera le principe fondamental du système.
- Seule la méthode de détermination des deux composantes (méthode de calcul de l'ACR et procédure du PCR) sera modifiée en remplaçant définitivement la procédure de conception basée sur le CBR par le LEA en tant que base du nouveau système ACR/PCR.
- En adoptant le LEA pour les revêtements flexibles et rigides, le module de réaction du sous-grade pour les revêtements rigides (valeur k) et le CBR sur le sous-grade pour les revêtements flexibles seront remplacés par une méthode de caractérisation des sols unique (module d'élasticité E) déclinée en quatre catégories (élevé, moyen, faible et très faible).
- Le LEA permettra de connaître la contribution de chaque aéronef composant un mélange au dommage maximal causé par l'ensemble du trafic, grâce au concept de "Facteur de Dommage Cumulatif (CDF)". Cela facilitera les critères de surcharge de la chaussée en exploitant pleinement le comportement de l'aéronef en surcharge lorsqu'il est mélangé dans un trafic existant.

III.2.3 Les objectifs généraux de la méthode ACR-PCR :

- Les changements mentionnés précédemment visent à atteindre les objectifs suivants en améliorant la précision de la méthode et en la rendant plus adaptée aux besoins actuels de l'industrie de l'aviation ;
- Déterminer de manière précise la notation des chaussées aéroportuaires pour refléter leur capacité à accueillir différents types d'aéronefs.
- Fournir un système de notation cohérent et précis qui tient compte des dernières évolutions technologiques dans le domaine de l'aviation.
- Établir des critères de surcharge de la chaussée qui garantissent la sécurité des opérations aéroportuaires tout en optimisant l'utilisation des chaussées.
- Permettre aux aéroports et aux compagnies aériennes de prendre des décisions éclairées concernant les poids et les fréquences d'exploitation des aéronefs.
- Faciliter la gestion des revêtements aéroportuaires en fournissant des informations précises sur leur capacité structurelle et leur durée de vie prévue.

III.3 Conclusion :

La méthode ACR/PCR représente une avancée significative dans l'évaluation de la capacité portante des chaussées aéroportuaires. Cette méthode s'adapte mieux à la complexité de l'aviation moderne, offre une flexibilité accrue et favorise l'harmonisation internationale. Les résultats de cette étude montrent que la méthode ACR-PCR peut avoir un impact significatif sur la manière dont la capacité de charge des chaussées d'aéroport est évaluée et gérée, avec une tendance à être plus conservatrice que le système PCN.

Chapitre IV:
Développement de l'Application
ACR ProTrack

IV. Introduction :

L'informatique, en satisfaisant la quête d'efficacité de l'homme, est omniprésente dans notre quotidien, de la résolution de problèmes mathématiques à l'imagerie médicale. Sa rapidité et son optimisation de l'espace de stockage en font un allié essentiel dans l'aéronautique. En l'exploitant adroitement, elle peut alléger la charge pesant sur les acteurs humains, comme les pilotes et les contrôleurs aériens, améliorant ainsi la gestion de l'espace aérien international et renforçant la sécurité des vols. Ce chapitre présente notre application, illustrant ces concepts.

IV.1 Descriptions de l'algorithme d'admissibilité intégré à l'application :

Dans cette section, nous souhaitons souligner que, jusqu'à présent, l'OACI n'a pas encore publié de directives officielles concernant les conditions d'admissibilité des aéronefs sur les chaussées aéroportuaires pour la méthode ACR/PCR. Cependant, il convient de noter que lors de la collaboration entre (DGAC) et (EASA), lors de la conférence (webinaire EASA, jeudi 6 octobre 2022), des changements significatifs ont été évoqués.

Ce qui demeure constant, c'est la comparaison fondamentale entre l'ACR et le PCR, qui reste le pivot de cette méthode. Si l'ACR est inférieur ou égal au PCR, l'aéronef peut opérer sur la chaussée sans aucune restriction. En revanche, si l'ACR dépasse le PCR, l'aéronef peut être soit exclu, soit autorisé à opérer sous certaines limitations, telles que des restrictions de poids et/ou de fréquence.

En concluant, nous pouvons raisonnablement déduire, à partir des discussions tenues lors de la conférence mentionnée précédemment, que les conditions d'admissibilité des aéronefs pour la méthode ACR/PCR suivront les mêmes principes que ceux de la méthode ACN-PCN, jusqu'à ce que l'OACI publie officiellement ses propres directives spécifiques à la méthode ACR [15].

Les conditions d'admissibilité d'un aéronef sur une chaussée aéronautique selon la méthode ACR/PCR partent du même principe que celles expliquées au chapitre 1 pour la méthode ACN/PCN. Le PCR de la chaussée aéroportuaire est déterminé conformément à ce qui a été exposé dans le chapitre 2, section PCR.

IV.1.1 Conditions d'admissibilité d'un aéronef sur les chaussées aéronautiques :

1) Pressions limites :

Lorsque le PCR comporte une lettre de code indiquant une limitation de pression de gonflage des pneumatiques (code X, Y, Z), les avions dont la pression effective (q') > (q_0) ne peuvent être admis sur la chaussée, quelle que soit leur charge.

2) Charge admissible des avions :

La méthode ACR/PCR est utilisée pour évaluer les conditions de recevabilité sur une plateforme en fonction de sa charge réelle. Elle repose sur la comparaison de l'ACR de l'avion avec le PCR de la chaussée.

3) ACRmax/PCR :

Tout d'abord, nous effectuons une comparaison entre l'ACR maximum et le PCR comme suit :

- Si $ACR_{max} \leq PCR$, l'aéronef est admissible.
- Si $ACR_{max} > PCR$, on calcul ACR.

(Note : ACRmax représente l'Aircraft Classification Rating donné par le constructeur pour la Maximum Ramp Weight - MRW).

4) Dépassement du PCR :

Dans ce cas, nous calculons l'ACR équivalent à la masse réelle (M_t). Par la relation suivante :

$$ACR = ACR_{min} - (ACR_{max} - ACR_{min}) \times \frac{(M_{max} - M_t)}{(M_{max} - M_{min})}$$

(Note : M_{min} et M_{max} représentent respectivement la masse à vide opérationnelle DOW et la masse maximale MRW, ACR_{min} et ACR_{max} représentant les ACR correspondants).

Nous nous retrouvons avec deux cas à traiter :

Cas 1:

- ✓ $PCR < ACR \leq 1,1PCR$ pour les chaussées souples
- ✓ $PCR < ACR < 1,05PCR$ pour les chaussées rigides

Chapitre IV : Développement de l'Application ACR ProTrack

Cas 1 : L'avion peut être autorisé à condition que le nombre annuel (n) de mouvements réels en surcharge n'excède pas 5 % du total annuel des mouvements réels contenus dans le trafic de référence Nr.

- Nr = nombre total des mouvements réels des avions pris en compte dans le trafic de référence.

$$n \leq 0,05 \text{ Nr}$$

- Si d'autres avions ont précédemment subi la même procédure, leur nombre de mouvements réels doit être inclus dans n.
- Si la règle des 5 % n'est plus respectée, nous devons calculer le trafic équivalent total et suivre la procédure du cas 2.

Cas 2:

- ✓ ACR > 1,1 PCR pour les chaussées souples
- ✓ ACR > 1,05 PCR pour les chaussées rigides

- Si le PCR est affecté du code **U**, la méconnaissance des caractéristiques de la chaussée devrait, sauf atterrissage d'urgence, **inciter à refuser** l'avion.
- Si le PCR est affecté du code **T**, il convient de se ramener à la charge admissible Po du type d'avion considéré pour la chaussée, **charge admissible donne la relation :**

$$P_o = M_{\min} + (M_{\max} - M_{\min}) \times \frac{PCR - ACR_{\min}}{ACR_{\max} - ACR_{\min}}$$

- Si $P' \leq 1,1 \cdot P_o$ l'avion peut, toujours sur l'aire concernée, être accepté sous réserve de Respecter la règle des 5%,
- Si enfin $P' > 1,5 \cdot P_o$: l'autorisation d'atterrissage doit être **impérativement refusée** sauf urgence.
- Si $1,1 \cdot P_o < P' < 1,5 \cdot P_o$ dans ce cas, il convient de calculer le trafic équivalent total journalier **T'** que supporte la chaussée :
Si $T' > 10$ mouvements équivalents par jour, l'atterrissage **doit être refusé** à moins d'admettre une usure rapide des chaussées.

Chapitre IV : Développement de l'Application ACR ProTrack

Si $T' \leq 10$ mouvements équivalents par jour, l'avion **peut être autorisé à sa charge réelle P_0** mais en limitant sa fréquence aux valeurs indiquées dans le tableau 1.1 du chapitre 1.

IV.1.2 Algorithme d'admissibilité intégré à l'application :

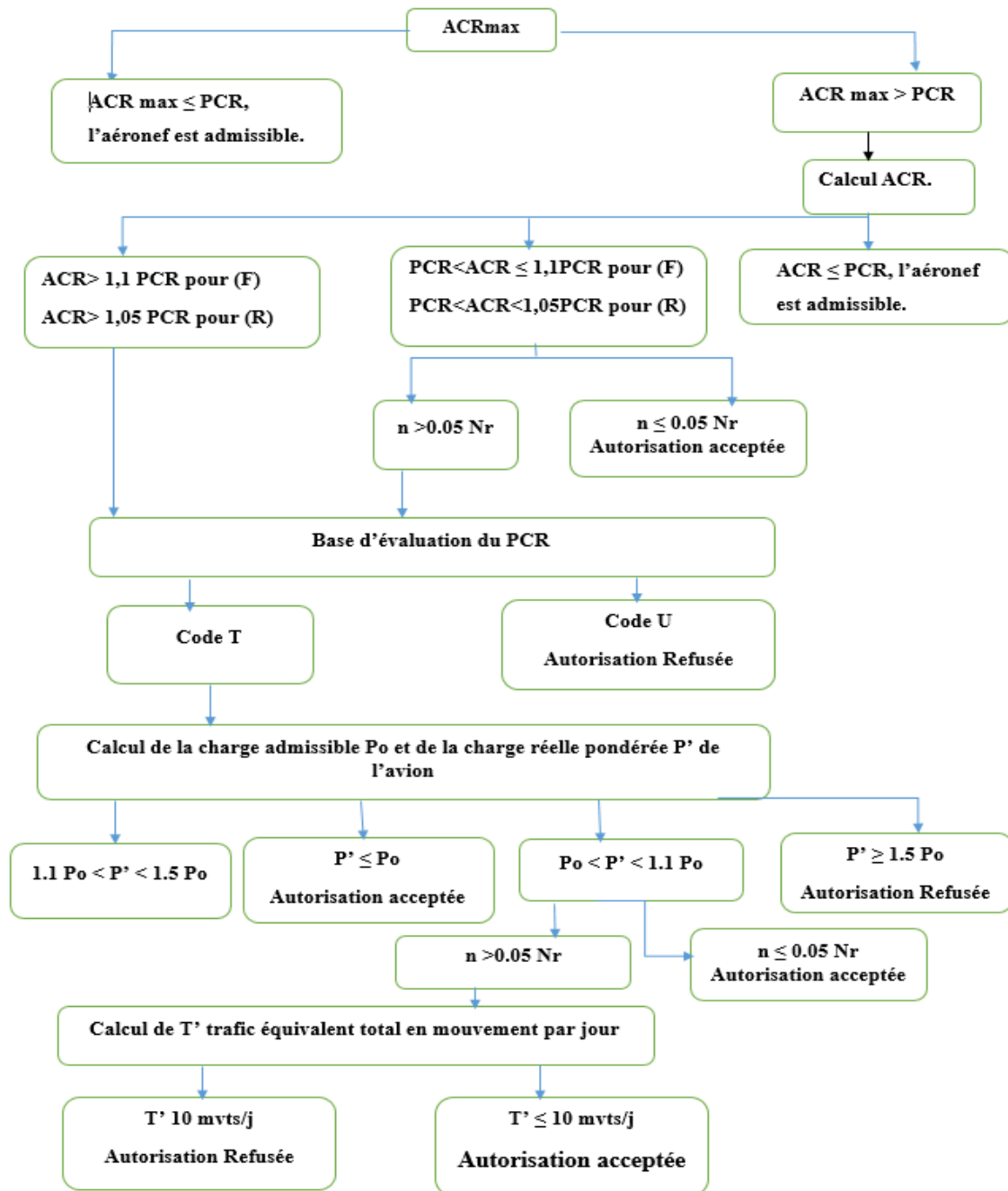


Figure IV.1 : Algorithme d'Admissibilité

IV.2 Outils de développement web utilisé :

IV.2.1 MySQL :

MySQL est un système de gestion de bases de données relationnelles (SGBDR) largement utilisé à travers le monde. Il est distribué sous une double licence, à savoir la GPL (General Public License) pour sa version open source et une licence propriétaire pour des versions commerciales. MySQL joue un rôle essentiel dans le domaine de la gestion de données, tant pour le grand public, notamment dans les applications web, que pour les professionnels. Il se positionne en concurrence avec d'autres systèmes de gestion de base de données tels qu'Oracle, PostgreSQL et Microsoft SQL Server.

Le nom "MySQL" trouve son origine dans le prénom de la fille du co-créateur de la technologie, Michael Widenius, qui s'appelle My. "SQL" dans MySQL fait référence au Structured Query Language, le langage de requête largement utilisé pour interagir avec les bases de données relationnelles.

Un fait important à noter est qu'en mai 2009, Michael Widenius a créé un fork de MySQL appelé MariaDB, nommé en l'honneur de sa deuxième fille, Maria. Cette décision a été prise pour garantir la continuité du développement de MySQL en tant que projet open source, indépendant de toute influence commerciale. Ainsi, MariaDB est devenu une alternative populaire à MySQL, conservant la compatibilité avec les applications et les compétences acquises avec MySQL tout en évoluant avec de nouvelles fonctionnalités et mises à jour de sécurité. Cette scission a été saluée par la communauté open source et a permis de garantir la pérennité de la technologie MySQL sous une forme ouverte et libre.

IV.2.2 Python 3 : Un Langage de Programmation Puissant pour Windows et iPad

Python 3 est la troisième itération majeure du langage de programmation Python. Conçu pour être simple à lire et à écrire, Python 3 se distingue par sa clarté de syntaxe et sa polyvalence. Il est devenu l'un des langages de programmation les plus utilisés au monde, aussi bien pour les débutants que pour les développeurs expérimentés, et il est disponible sur différentes plateformes, notamment Windows et iPad.

IV.2.2.1 Caractéristiques Principales :

1. **Syntaxe Lisible :** Python 3 favorise une syntaxe propre et lisible, ce qui en fait un choix idéal pour l'apprentissage de la programmation et la création de code maintenable.
2. **Polyvalence :** Python 3 est utilisé dans une variété d'applications, notamment le développement web, la science des données, l'automatisation de tâches, l'intelligence artificielle, et bien plus encore, aussi bien sur Windows que sur iPad.
3. **Bibliothèques Riches :** Il dispose d'une vaste bibliothèque standard qui facilite le développement en fournissant des modules prêts à l'emploi pour des tâches courantes.
4. **Open Source :** Python 3 est un logiciel open source, ce qui signifie qu'il est librement accessible et modifiable par quiconque.

IV.2.3 Qt Designer : Créez des Interfaces Utilisateur Visuellement

Qt Designer est un composant essentiel du framework de développement Qt, reconnu pour sa flexibilité et sa convivialité. Cet outil permet de concevoir des interfaces utilisateur graphiques en utilisant une approche de type glisser-déposer, réduisant ainsi la complexité du développement d'applications.

IV.2.3.1 Caractéristiques Principales :

1. **Conception Visuelle :** Qt Designer offre une interface graphique conviviale qui permet aux développeurs de concevoir des interfaces utilisateur en plaçant simplement des composants graphiques tels que des boutons, des fenêtres, des champs de texte, etc., sur une fenêtre de conception.
2. **Composants Personnalisés :** Il prend en charge la création de composants personnalisés, ce qui signifie que vous pouvez concevoir des éléments d'interface utilisateur réutilisables adaptés aux besoins spécifiques de votre application.
3. **Éditeur de Signaux et de Slots :** Qt Designer permet de connecter visuellement les signaux (événements) et les slots (fonctions) de vos composants, simplifiant ainsi la gestion des interactions utilisateur.

4. **Génération de Code** : Une fois la conception terminée, Qt Designer génère automatiquement le code source correspondant à l'interface utilisateur, que vous pouvez ensuite intégrer dans votre application.

IV.3 Présentation de l'application ACR ProTrack et de son objectif

ACR ProTrack est une application conçue pour faciliter la transition vers la nouvelle réglementation ACR/PCR de l'OACI, qui prendra effet le 28 novembre 2024, en remplacement de la méthode ACN-PCN. Cette application a été développée dans le but d'optimiser les opérations aéroportuaires en mettant l'accent sur la sécurité.

IV.3.1 La Polyvalence d'ACR ProTrack

ACR ProTrack a été développé en utilisant plusieurs langages informatiques, dont Python 3, MySQL et QtDesigner. Cette approche garantit des performances optimales et une facilité d'utilisation. L'application est compatible avec différentes plateformes, notamment Windows et iPad, pour s'adapter à vos besoins et à votre environnement de travail.

Les fondements de l'application ACR ProTrack reposent sur des formules de calcul établies conformément à la référence [12], étayées par des données collectées à partir de sources crédibles telles que le "MANUEL DE PLANIFICATION DES CARACTÉRISTIQUES DES AÉRONEFS ET DES AÉROPORTS" [16], [20] et les ressources fournies par Air Algérie, notamment le manuel "MANEX C".

Pour ce qui est de la maîtrise des outils qui ont été utilisés dans le processus de création de cette application, nous nous sommes appuyés sur des références professionnelles spécifiques, telles que les sources [17], [18], [29], ainsi que [19] pour la conception du logo associé.

Cette approche rigoureuse garantit la robustesse et la fiabilité de notre application ACR ProTrack.

IV.4 Modélisation, conception et la mise en forme de l'application ACR

ProTrack :

IV.4.1 Workflow :

Représentation visuelle des étapes et des activités d'un utilisateur de ACR ProTrack

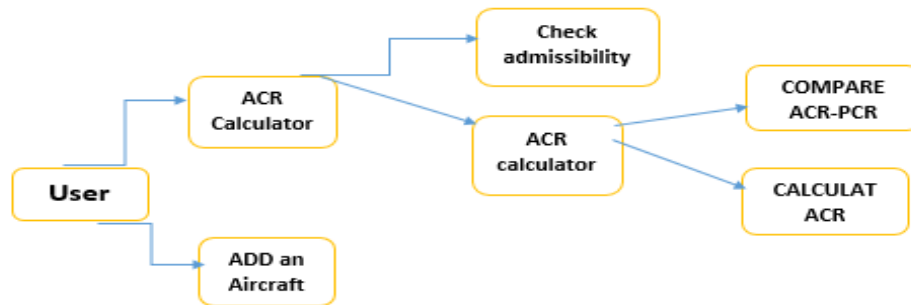


Figure IV.2 diagramme d'activité de l'application

IV.4.1.1 Présentation d'une partie de base de données MySQL :

La base de données en question est une structure tabulaire caractérisée par des critères conformes au langage de programmation Python 3. Elle est constituée de plusieurs colonnes variées, telles qu'on peut l'observer (Figure IV.2), et elle est alimentée par des données extraites des manuels d'aéronefs tels que 'Airplane Characteristics for Airport Planning,' version 2022 ou 2023.

1 • SELECT * FROM programme.airc;

id	Fabricant	Aircraft-type	Vs	Tire-Pressure-q	M-MAX	M-MIN	ACR-MAX	ACR-MIN	Pavement-type	Category-Resistance
112	boeing	737-BBJ2	46.73	1.41	79242	45360	560	290	R	D
113	boeing	737-BBJ2	46.73	1.41	79242	45360	380	210	F	A
114	boeing	737-BBJ2	46.73	1.41	79242	45360	410	220	F	B
115	boeing	737-BBJ2	46.73	1.41	79242	45360	450	230	F	C
116	boeing	737-BBJ2	46.73	1.41	79242	45360	510	250	F	D
117	boeing	777-9	47.15	1.54	352442	158757	820	250	R	A
118	boeing	777-9	47.15	1.54	352442	158757	1040	280	R	B
119	boeing	777-9	47.15	1.54	352442	158757	1220	330	R	C
120	boeing	777-9	47.15	1.54	352442	158757	1400	400	R	D
121	boeing	777-9	47.15	1.54	352442	158757	590	260	F	A
122	boeing	777-9	47.15	1.54	352442	158757	650	260	F	B
124	boeing	777-9	47.15	1.54	352442	158757	820	270	F	C
125	boeing	777-9	47.15	1.54	352442	158757	1280	300	F	D
126	boeing	787-8	45.64	1.57	228383	113398	670	270	R	A
127	boeing	787-8	45.64	1.57	228383	113398	790	290	R	B
128	boeing	787-8	45.64	1.57	228383	113398	870	320	R	C
129	boeing	787-8	45.64	1.57	228383	113398	970	360	R	D
130	boeing	787-8	45.64	1.57	228383	113398	550	270	F	A
131	boeing	787-8	45.64	1.57	228383	113398	590	270	F	B
132	boeing	787-8	45.64	1.57	228383	113398	690	280	F	C
133	boeing	787-8	45.64	1.57	228383	113398	910	310	F	D
134	boeing	787-9	46.11	1.58	225373	113398	740	260	R	A
135	boeing	787-9	46.11	1.58	225373	113398	860	280	R	B
136	boeing	787-9	46.11	1.58	225373	113398	960	310	R	C
137	boeing	787-9	46.11	1.58	225373	113398	1070	340	R	D
138	boeing	787-9	46.11	1.58	225373	113398	620	270	F	A
139	boeing	787-9	46.11	1.58	225373	113398	660	270	F	B
140	boeing	787-9	46.11	1.58	225373	113398	750	280	F	C

Figure IV.3 base de données de ACR ProTrack

IV.4.2 ACR ProTrack :

Après avoir discuté de la présentation de l'application, de son algorithme et des outils informatiques qui ont motivé sa création, nous avons ensuite présenté un aperçu succinct de l'application dans la section "workflow". Cette section offre un aperçu général des fonctionnalités d'ACR ProTrack, permettant ainsi aux utilisateurs de se familiariser avec les principales entrées et processus de l'application.

1) L'interface principale :

L'interface utilisateur a été soigneusement conçue avec un logo (Figure IV.3) spécialement créé pour l'application, ajoutant une touche de professionnalisme. Ce logo est positionné sur un bouton d'accès qui permet d'ouvrir la fenêtre de connexion. L'interface utilisateur arbore également un slogan : 'Your Flight, Our Safety Priority' (Votre Vol, Notre Priorité Sécurité).

Voir (Figure IV.4)



Figure IV.4 logo de l'application ACR ProTrack



Figure IV.5 interface utilisateur d'ACR ProTrack

2) Interface de connexion :

Cette interface est réservée à l'accès des utilisateurs autorisés uniquement, dans le but de prévenir toute manipulation incorrecte, notamment dans la section 'Ajouter un Avion'. Voir la Figure IV.5 Des informations incorrectes dans cette section pourraient avoir un impact significatif sur la base de données. Pour garantir la sécurité des données, cette interface a été sécurisée. Vous pouvez vous référer à la Figure IV.6 pour une illustration visuelle de cette sécurité



Figure IV.6 interface de connexion d'ACR ProTrack



Figure IV.7 la notification de l'interface de connexion.

Lorsque les champs utilisateur ne sont pas remplis, une notification 'Please input all fields' est affichée. En cas de saisie incorrecte du nom d'utilisateur ou du mot de passe, une autre notification 'Invalid username or password' est affichée, comme illustré dans la (Figure IV.6).

3) Interface ACR ProTrack :

Une fois que l'utilisateur a réussi sa connexion, l'interface de l'application s'ouvre, lui permettant de choisir une commande. Soit d'ajouter un avion à la base de données ou d'accéder à l'ACR Calculator, comme illustré dans la Figure IV.7.

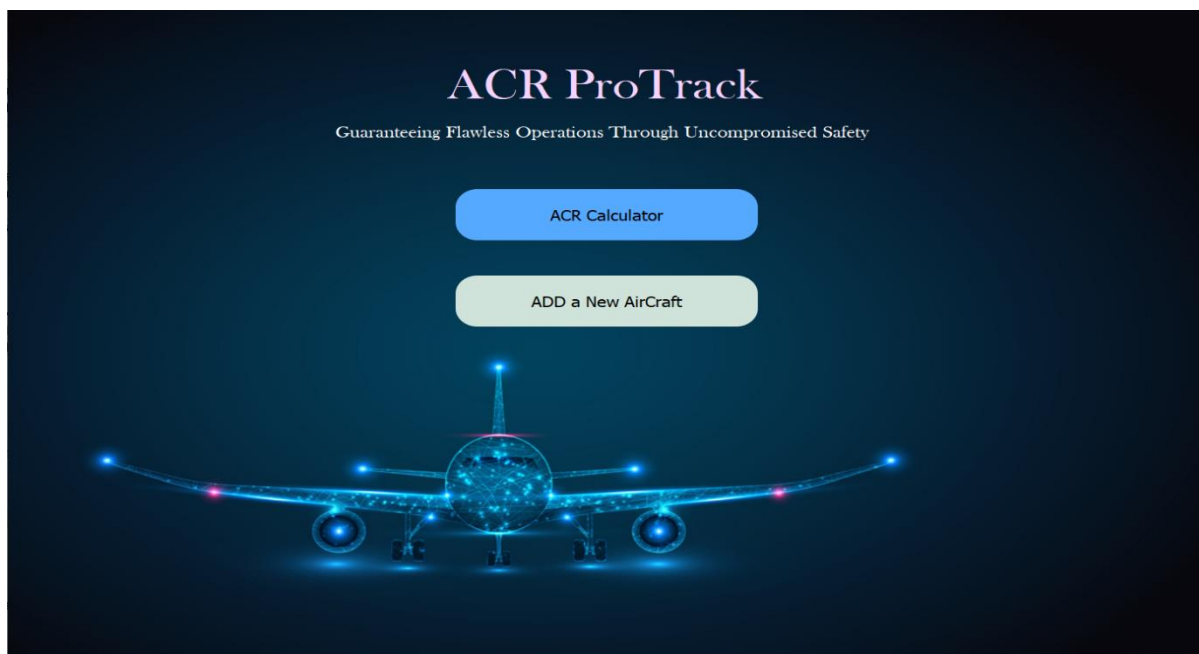


Figure IV.8 interface ACR ProTrack

4) Interface ADD a New Aircraft:

À partir de l'interface de sélection, l'utilisateur peut cliquer sur le bouton 'ADD a New Aircraft' pour accéder à l'interface d'ajout, comme illustré dans la (Figure IV.8et Figure IV.9).

The screenshot shows the 'ADD AN AIRCRAFT' form with the following data: Manufacturer: Boeing, Aircraft Type: 777F, Type of Pavement: R, Maximum Weight (KG): 768800, Minimum Weight(KG): 318300, Vs %: 45.58, Tire pressure-q (MPA): 1.50. A success message dialog box is displayed in the center: 'ACR ProTrack Management System.Success Aircraft added successfully to the database.' Below the form is a green 'Save' button.

Figure IV.9 Interface 'ADD a New Aircraft' affichant un message de réussite de l'enregistrement des données

The screenshot shows the 'ADD AN AIRCRAFT' form with the same data as Figure IV.9. However, the Maximum Weight (KG) field contains '768,800' with a comma as a thousands separator. An error message dialog box is displayed in the center: 'ACR ProTrack Management System... Please enter valid numeric values.' Below the form is a green 'Save' button.

Figure IV.10 Interface 'ADD a New Aircraft' affichant un message de l'échec de l'enregistrement des données à cause de la saisie de la masse.

5) Interface Principale de l'ACR Calculateur :

Cette interface est connectée à la base de données afin de comparer l'ACRmax de l'aéronef sélectionné avec le PCR saisi. Elle affiche également la forme complète du PCR. Il est essentiel de noter la comparaison entre les pressions maximales et celles de l'aéronef. De plus, un bouton 'Go Back' est prévu pour revenir à l'interface précédente. Voir (Figure IV.10)

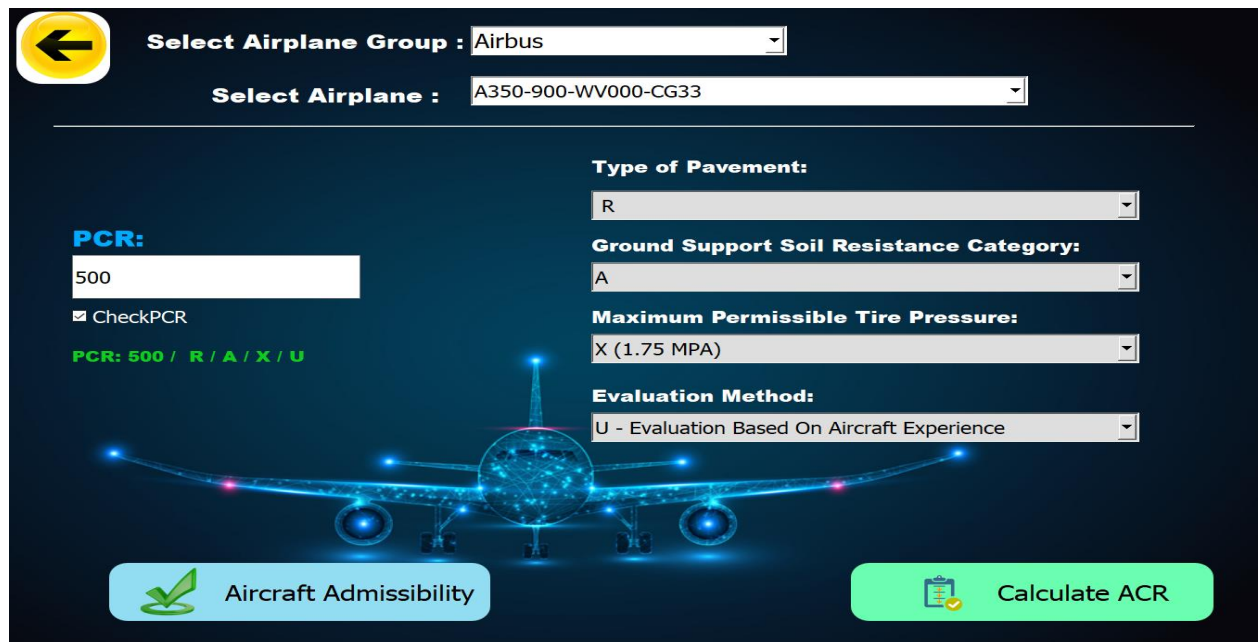


Figure IV.11 Interface Principale de l'ACR Calculator

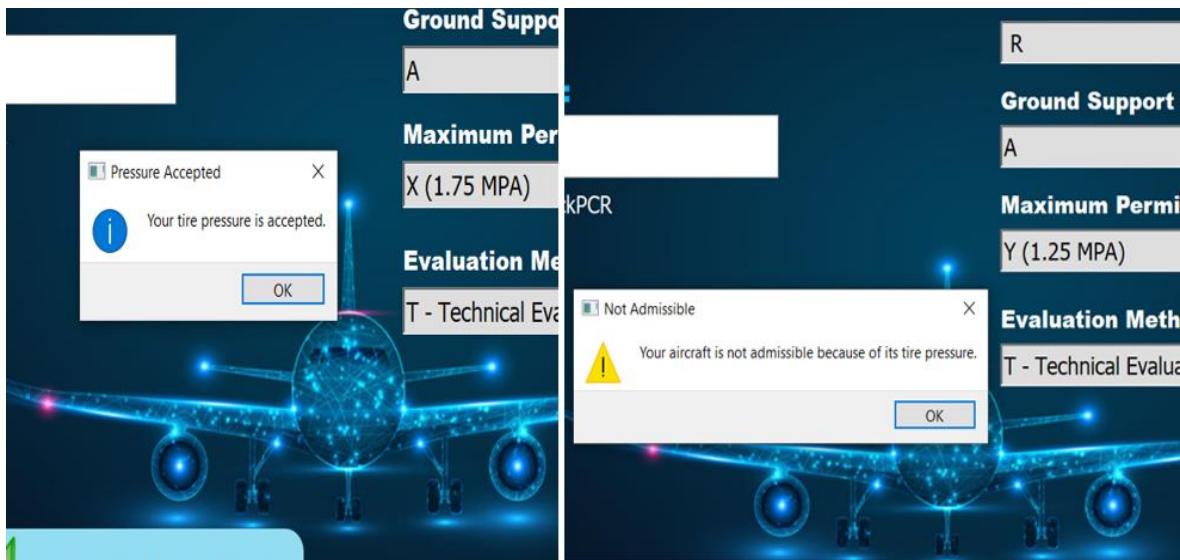


Figure IV.12 Notification résultant de la comparaison des pressions dans l'interface.

Chapitre IV : Développement de l'Application ACR ProTrack

Select Airplane Group : Airbus
Select Airplane : A321-100-w000

Type of Pavement: R
Ground Support Soil Resistance Category: A
Maximum Permissible Tire Pressure: X (1.75 MPA)
Evaluation Method: U - Evaluation Based On Aircraft Experience

PCR: 940
Check PCR
PCR: 940 / R / A / X / U

Your aircraft is admissible.
OK

Aircraft Admissibility
Calculate ACR

Select Airplane Group : Airbus
Select Airplane : A321-100-w000

Type of Pavement: R
Ground Support Soil Resistance Category: A
Maximum Permissible Tire Pressure: W (No Limitation)
Evaluation Method: T - Technical Evaluation

PCR: 500
Check PCR
PCR: 500 / R / A / W / T

Your aircraft is not admissible. Click on Calculate ACR.
OK

Aircraft Admissibility
Calculate ACR

Figure IV.13 A321-100 déclaré comme aéronef admis pour un PCR de chaussée de 940, mais refusé pour un PCR de chaussée de 500.

6) Interface Principale pour Comparer ACR/PCR et Calcul d'ACR :

Cette interface calcule la valeur de l'ACR (conformément à la loi mentionnée précédemment) dans le cas où ACR_{max} est supérieur à PCR (calculé dans la Figure IV.10). Ensuite, elle compare cette valeur avec le PCR de la chaussée, en prenant également en compte la comparaison des pressions. Veuillez-vous référer à la Figure IV.11 pour une illustration visuelle de cette interface.

Select Airplane Group : Antonov
Select Airplane : An-124

PCR: 950

Type of Pavement: R
Ground Support Soil Resistance Category: D
Maximum Permissible Tire Pressure: W (No Limitation)
Evaluation Method: U - Evaluation Based On Aircraft Experience

Compare ACR-PCR

Current Aircraft Weight (Kg): 89000
Tire Pressure (MPA): 1.50
n: 145
Nr: 4567
Mvt: Mvt
Cw: Taxiways and Runways
Weighting coefficient based on the nature of the area
Total Equivalent Traffic: 3459
Mvt/Day

Calculate ACR

Figure IV.14 Interface Principale pour Comparer ACR/PCR et Calcul d'ACR

Chapitre IV : Développement de l'Application ACR ProTrack

7) Calcul de l'ACR :

L'insertion de la valeur numérique mise à jour de la masse de l'aéronef en question, ainsi que le choix du type de chaussée et de la catégorie de résistance du sol de support, permettent un calcul rapide de l'ACR. En conséquence, l'ACN est affiché pour fournir une indication de l'impact potentiel de cet aéronef sur la chaussée en présence du PCR. Cette démarche fournit une estimation de l'agressivité de l'aéronef vis-à-vis de la chaussée avec le PCR spécifié.

a) Partie du code de calcul :

```
(fabricant, type_avion, pav, categorie)

# Fetch one row of data
row = cursor.fetchone()

if row:
    mmax_value, mmin_value, acrmax_value, acrmin_value, vs = row
    ACR = acrmax_value - (acrmax_value - acrmin_value) * ((mmax_value - valeur_l3) / (mmax_value - mmin_value))

    MSG= "Aircraft is authorized"
    P1=0
    P=0
    T=0

if self.c3.currentText() == "F":
    if valeur_l1 < ACR < 1.1 * valeur_l1 and valeur_l5 <= 0.05 * valeur_l6:
        MSG = "Aircraft authorized"
elif self.c3.currentText() == "R":
    if valeur_l1 < ACR < 1.05 * valeur_l1 and valeur_l5 <= 0.05 * valeur_l6:
```

Figure IV.15 Extrait du Code Source Implémentant le Programme de Calcul ACR

b) Résultat de calcul :

The screenshot displays the ACR ProTrack application interface. It features a blue background with a white airplane icon in the top right corner. The interface is divided into several sections:

- Select Airplane Group :** A dropdown menu with "boeing" selected.
- Select Airplane :** A dropdown menu with "b737-7" selected.
- PCR:** A text input field containing "560".
- Type of Pavement:** A dropdown menu with "R" selected.
- Ground Support Soil Resistance Category:** A dropdown menu with "C" selected.
- Maximum Permissible Tire Pressure:** A text input field containing "Y (1.25 MPA)".
- Evaluation Method:** A dropdown menu with "T - Technical Evaluation" selected.
- Current Aircraft Weight (Kg):** A text input field containing "76400".
- Tire Pressure (MPA):** A text input field containing "1.42".
- n:** A text input field containing "300".
- Nr:** A text input field containing "4500".
- Mvt:** A text input field containing "Mvt".
- Total Equivalent Traffic:** A text input field containing "7653".
- Mvt/Day:** A text input field containing "Mvt/Day".

A green pop-up window in the center of the screen displays the calculated ACR value: "ACR: 480.28". Below the pop-up window, there are two buttons: "Compare ACR-PCR" (yellow) and "Calculate ACR" (blue).

Figure IV.16 Résultat du Calcul de l'ACR.

Chapitre IV : Développement de l'Application ACR ProTrack

c) Validation des résultats :

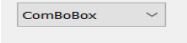
Dans les Figure IV.16 et Figure IV.17, nous avons effectué la saisie et la sélection des données, comme vous pouvez le voir sur les figures. Les résultats obtenus indiquent que le B737-7 est autorisé à circuler sur une chaussée aéronautique, tandis que l'A321-100 ne l'est pas. Ces résultats confirment l'autorisation et l'accessibilité à une chaussée en fonction de l'aéronef exploité.

The screenshot displays the application's input form for a B737-7 aircraft. The 'Select Airplane' dropdown is set to 'b737-7'. The 'PCR' field contains the value '560'. The 'Current Aircraft Weight (Kg)' is '76400', and the 'Tire Pressure (MPA)' is '1.42'. The 'Type of Pavement' is 'R', and the 'Ground Support Soil Resistance Category' is 'C'. The 'Maximum Permissible Tire Pressure' is set to 'Y (1.25 MPA)'. The 'Evaluation Method' is 'T - Technical Evaluation'. The 'Total Equivalent Traffic' is '7653 Mvt/Day'. A green dialog box with the text 'Aircraft is authorized' and an 'OK' button is overlaid on the form. The 'Calculate ACR' button is visible at the bottom right.

Figure IV.17 Conformément à l'algorithme d'admissibilité, une admission pour le B737-7 pour un PCR :560.

The screenshot displays the application's input form for an Airbus A321-100 aircraft. The 'Select Airplane Group' dropdown is set to 'Airbus', and the 'Select Airplane' dropdown is set to 'A321-100-wv000'. The 'PCR' field contains the value '350'. The 'Current Aircraft Weight (Kg)' is '63000', and the 'Tire Pressure (MPA)' is '1.28'. The 'Type of Pavement' is 'R', and the 'Ground Support Soil Resistance Category' is 'D'. The 'Maximum Permissible Tire Pressure' is set to 'W (No Limitation)'. The 'Evaluation Method' is 'U - Evaluation Based On Aircraft Experience'. The 'Total Equivalent Traffic' is '3546 Mvt/Day'. A red dialog box with the text 'Aircraft is NOT Authorized' and an 'OK' button is overlaid on the form. The 'Calculate ACR' button is visible at the bottom right.

Figure IV.18 Conformément à l'algorithme d'admissibilité, les résultats affichent un refus pour l'A321-100 pour un PCR :350.

➤ À noter que les **ComBoBox**  présents sur les interfaces de calcul ont pour objectif de permettre la sélection parmi les options suivantes :

- **Type de revêtement de piste :**
 - R = Rigid (Rigide)
 - F = Flexible (Flexible)
- **Catégorie de Résistance du Sol de Support au Sol :**
 - A = Catégorie A
 - B = Catégorie B
 - C = Catégorie C
 - D = Catégorie D
- **Pression de Pneu Maximale Autorisée :**
 - W (Pas de Limitation)
 - X (1,75 MPA)
 - Y (1,25 MPA)
 - Z (0,5 MPA)
- **Méthode d'Évaluation :**
 - T - Évaluation Technique
 - U - Évaluation Basée sur l'Expérience des Avions
- **Cw (Coefficient de Poids = CP voir annexe 2) :**
 - Voies de circulation et Pistes
 - Aires de Stationnement

IV.5 Conclusion :

Ce chapitre met en lumière le rôle fondamental de l'informatique dans l'optimisation de la gestion de l'espace aérien et dans le renforcement de la sécurité des vols, en présentant notre application. Toutefois, il est important de noter que l'évolution de la réglementation et des directives futures de l'OACI peut entraîner des modifications et des ajustements nécessaires dans cette application. Sa flexibilité permettra de répondre avec précision aux exigences changeantes de la gestion aéroportuaire, en tenant compte des éventuelles mises à jour ou directives futures. Ainsi, cette application reste adaptable et prête à évoluer pour garantir une gestion aéroportuaire efficace et conforme aux normes internationales

Conclusion Générale

L'aviation, domaine en perpétuelle évolution, repose sur des éléments fondamentaux tels que les chaussées aéroportuaires pour garantir la sécurité et l'efficacité de ses opérations. Au fil des décennies, le système ACN-PCN de l'OACI a joué un rôle crucial en facilitant la communication et la gestion des infrastructures aéroportuaires. Toutefois, il a également mis en lumière des limitations et des incohérences qui nécessitent une révision approfondie.

L'avènement de la méthode ACR/PCR marque une étape importante dans cette quête d'efficacité et de sécurité accrues. Cette nouvelle réglementation, conçue avec minutie, intègre les avancées les plus récentes en matière de conception et d'évaluation des chaussées d'aérodromes. Elle offre une approche plus nuancée et précise pour déterminer l'admissibilité des aéronefs, réduisant ainsi les risques potentiels liés à une capacité portante insuffisante.

La comparaison détaillée entre l'ACN-PCN et l'ACR/PCR met en lumière les avantages indéniables de cette transition. Les normes harmonisées qu'offre l'ACR/PCR simplifient les échanges internationaux et renforcent la sécurité des opérations aériennes à l'échelle mondiale. Cependant, il convient de noter que cette transition nécessitera des efforts de mise en conformité tant de la part des aéroports que des compagnies aériennes, ce qui implique un investissement en temps et en ressources.

L'application ACR ProTrack, que nous avons développée, se présente comme un outil précieux pour faciliter cette transition. En combinant une interface conviviale avec un algorithme sophistiqué, elle simplifie l'évaluation de l'admissibilité des aéronefs sur les pistes, tout en fournissant des données précises aux acteurs de l'industrie aéroportuaire.

Mais l'avenir de cette application s'annonce encore plus prometteur. Dans les prochaines étapes de son développement, nous envisageons d'intégrer le service de lutte contre l'incendie SSLIA, ce qui renforcera davantage la gestion globale des opérations aéroportuaires. De plus, l'ajout d'une base de données pour le PCR des chaussées aéroportuaires constituera une ressource inestimable. L'élargissement futur de l'application pourrait inclure la gestion de l'admissibilité des

aéronefs sur les chaussées aéroportuaires, ainsi qu'une lecture automatique des messages NOTAM et des informations météorologiques.

En somme, notre travail ne se limite pas à une simple transition, il se veut une avancée vers une gestion des opérations aéroportuaires plus efficace, plus complète et plus sécurisée. C'est dans cette perspective que nous invitons l'industrie aéroportuaire à embrasser la transition vers l'ACR-PCR et à explorer les promesses de l'application ACR ProTrack, une étape incontournable vers un avenir de l'aviation plus innovant et sécurisé.

Références bibliographiques

- [1]: <https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/>
- [2] <https://www.transportation.gov/aviation>
- [3] Transport Canada Technical Evaluation Engineering « Aircraft Classification Number (ACN'S) ».
- [4] Calcul de l'ACN d'un avion : Guide pratique d'utilisation de la méthode ACN-PCN. Éditeur STBA. Edition 1988.
- [5] <https://blog.aci.aero/acr-pcr-what-does-it-mean-for-airports/>
- [6] Annexe 14, Section 19, Appendice A. Edition 2022.
- [7] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666691X2200015X>
- [8] Guide Technique de la Méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées aéronautiques souples
- [9] Doc OACI 9157 P3
- [10] <https://www.libelaero.fr/notice/dgacstac-la-methode-acnpcn-comme-outil-de-gestion-des-chaussees-aeronautiques>
- [11] Annexe 14, Section 19, Appendice A. Edition 2018.
- [12] Instruction N° :1398 du 21 Avril 2011 relatives aux conditions d'admissibilité d'un aéronef sur les chaussées aéronautiques.
- [13] <https://www.alacpa.org/ACR-PCR%20ALACPA-2018%20Cyril%20Fabre.pdf>
- [14] <https://www.casa.gov.au/strength-rating-aerodrome-pavements>
- [15] <https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/events/new-method-report-pavement-strength-acr-pcr-webinar>
- [16] MANUEL DE PLANIFICATION DES CARACTÉRISTIQUES DES AÉRONEFS ET DES AÉROPORTS (Airbus, Boeing, Antonov, McDonnell Douglas)

[17] <http://livre21.com/LIVREF/F6/F006088.pdf>

[18] https://www.doc-developpement-durable.org/file/Projets-informatiques/cours-&-manuels-informatiques/Python/apprenez_a_programmer_en_python.pdf

[19] http://tvaira.free.fr/lp_sil/cours-qt/qt-bases.pdf QT designer

[20] AIR ALGERIE MANEX C EDI03 REV09 TR20

[21] <https://www.canva.com/fr>

Les ANNEXES

Annexe I: DEFINITIONS

1. **ACN (Aircraft Classification Number)** : Nombre exprimant l'effet relatif d'un avion sur une chaussée pour une catégorie spécifiée de sol support.
2. **PCN (Pavement Classification Number)** : Nombre exprimant la force portante de la chaussée pour une exploitation sans restriction.
3. **Portance** : La portance d'une chaussée représente son aptitude à supporter les charges dues aux avions en garantissant l'intégrité de sa structure pendant sa durée de vie.
4. **Durée de vie** : La période à la fin de laquelle la portance de la chaussée devient insuffisante pour que la chaussée puisse continuer à supporter sans risque le trafic.

5. **Charges** :
 - **Charge réelle P** : Charge effectivement appliquée par un mouvement d'avion à n mouvements par jour pendant 10 ans.
 - **Charge réelle pondérée P'** : Charge réelle P pondérée selon la fonction de la chaussée étudiée.
 - **Charge normale de calcul P''** : Charge à 10 mouvements par jour pendant 10 ans utilisée dans les formules et abaques pour le calcul de dimensionnement des chaussées.
 - **Charge admissible Po** : Charge admissible associée à un atterrisseur donné pour une chaussée donnée selon les règles de dimensionnement pour le trafic normal.
 - **Charge admissible déduite des publications Pa** : Charge maximale admissible à laquelle un atterrisseur peut être reçu sur une chaussée à 10 mouvements par jour pendant 10 ans.
 - **Masses** : Les masses des avions nécessaires à l'application de la méthode ACN-PCN résident dans la masse maximale au roulage M et la masse à vide en ordre d'exploitation m.

6. **Mouvements** :
 - **Mouvement réel** : Un passage d'avion sur une chaussée par l'intermédiaire d'un atterrisseur réel lors d'une manœuvre.
 - **Mouvements équivalents** : Le nombre de mouvements réels de la charge réelle pondérée P' qui peuvent être convertis en mouvements de la charge admissible Po de l'atterrisseur.

7. **Trafics** :

- **Trafic pris en compte dans le dimensionnement** : Le trafic ayant servi de base au dimensionnement de la chaussée.
- **Trafic de référence** : Le trafic admissible vis-à-vis de la chaussée à la date où est établi le PCN.
- **Trafic équivalent total T'**: La somme des mouvements équivalents des avions qui fréquentent la chaussée.

8. Pression de gonflage des pneumatiques :

- **q** : Pression standard de gonflage des pneumatiques des atterrisseurs de l'avion considéré.
- **q'**: Pression réelle de gonflage des pneumatiques de l'avion.
- **q₀**: Pression limite de gonflage des pneumatiques publiée pour la chaussée.

9. **RSE** : Charge sur une roue simple qui produit les mêmes contraintes que l'atterrisseur considéré.

10. **RSI** : Caractéristique de la portance de la chaussée considérée.

11. **CBR** : Essai de portance des remblais et des couches de formes compactées des ouvrages routiers.

12. **CBR du sol** : Indice portant immédiat après immersion d'un sol ou d'un matériau granulaire utilisé dans la construction des ouvrages en terre ou des assises de chaussées.

13. **K** : Utilisé pour les chaussées rigides comme l'épaisseur équivalente totale.

14. **ACR (Aircraft Classification Rating)** : Le taux de classification des aéronefs est une valeur attribuée à un type d'aéronef pour indiquer sa compatibilité avec une chaussée d'aéroport spécifique. Il est basé sur l'ACN de l'aéronef et le PCN de la chaussée.

15. **PCR (Pavement Classification Rating)** : Le taux de classification des chaussées est une valeur attribuée à une chaussée d'aéroport pour indiquer sa capacité à supporter un type spécifique d'aéronef. Il est basé sur l'ACR de l'aéronef et le PCN de la chaussée.

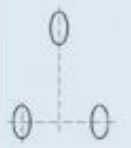
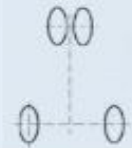
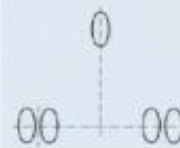
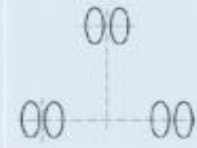



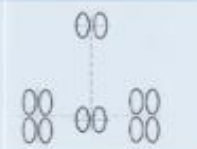


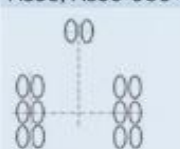
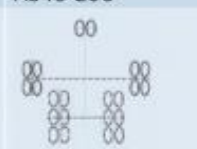
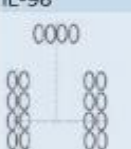
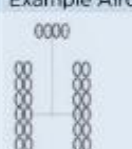
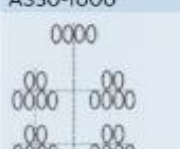
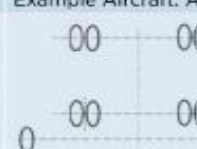

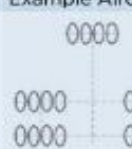

16. **Bogie** : Un bogie est un ensemble de roues montées sur un châssis qui peut se déplacer indépendamment du reste de l'aéronef. Il est utilisé pour supporter et diriger les trains d'atterrissage des avions.

17. **Tandem** : Un tandem est un arrangement de deux essieux montés en tandem sous un véhicule, généralement pour répartir la charge de manière équilibrée et améliorer la stabilité.

18. **Essieu** : Un essieu est un élément de structure qui supporte une charge et permet à une roue ou à un ensemble de roues de tourner. Il est monté sous un véhicule pour soutenir son poids.
19. **Contrainte** : Une contrainte est une force interne qui agit à l'intérieur d'un matériau ou d'une structure. Elle résulte de la répartition des charges et peut causer des déformations ou des contraintes dans le matériau.
20. **Contrainte de traction horizontale** : Il s'agit de la force de traction qui agit horizontalement sur une structure ou un matériau, généralement dans le sens de la longueur.
21. **Contrainte de traction verticale** : Il s'agit de la force de traction qui agit verticalement vers le haut ou vers le bas sur une structure ou un matériau.
22. **Outil COMFAA 3.0** : COMFAA 3.0 est un logiciel développé par la FAA (Federal Aviation Administration) des États-Unis pour effectuer des analyses de conception et d'évaluation des chaussées aéroportuaires. Il est utilisé pour calculer l'impact des charges d'aéronefs sur les chaussées et évaluer leur résistance.
23. **ICAO-ACR 1.32** : Il s'agit d'une norme ou d'une spécification de l'ICAO (Organisation de l'aviation civile internationale) concernant la classification des aéronefs et la notation des chaussées aéroportuaires. La référence "1.32" peut se référer à une version ou à une révision spécifique de cette spécification.
24. **Fluctuation** : Les fluctuations se réfèrent généralement aux variations ou aux changements irréguliers d'une quantité, d'une valeur ou d'une condition au fil du temps. Elles peuvent être positives (augmentation) ou négatives (diminution) et sont souvent observées dans divers contextes, notamment économiques, financiers, scientifiques, météorologiques, etc. Les fluctuations peuvent être causées par divers facteurs et peuvent être mesurées statistiquement pour comprendre les tendances ou les schémas.
25. **Corrélation** : La corrélation fait référence à la relation ou à l'association statistique entre deux ou plusieurs variables. Elle indique dans quelle mesure les variations d'une variable sont liées aux variations d'une autre variable. La corrélation peut être positive, indiquant que les variables évoluent dans la même direction, ou négative, indiquant qu'elles évoluent dans des directions opposées. Une corrélation forte signifie que les variables sont étroitement liées, tandis qu'une corrélation faible indique une relation moins étroite. La corrélation est couramment utilisée

dans la recherche, l'analyse des données et d'autres domaines pour étudier les relations entre des phénomènes différents.

26. Définitions des types de train d'atterrissages principales :

 <p>FAA Code: S Common Name: Single Example Aircraft: Cessna 150, PA28, F-15</p>	 <p>FAA Code: S Common Name: Single Example Aircraft: F/A-18</p>	 <p>FAA Code: D Common Name: Dual or Twin Example Aircraft: Dassault F10</p>	 <p>FAA Code: D Common Name: Dual or Twin Example Aircraft: B737, A320</p>
 <p>FAA Code: 2S Common Name: Single Tandem Example Aircraft: C-130</p>	 <p>FAA Code: 2T Common Name: Tri-Tandem Example Aircraft: C-17</p>	 <p>FAA Code: 2D Common Name: Twin Tandem Example Aircraft: B767, B787, A330, A350-900</p>	 <p>FAA Code: 2D/D1 Common Name: Twin Tandem with dual wheel centerline gear Example Aircraft: DC-10, MD-11, A340-200</p>
 <p>FAA Code: 2D/2D1 Common Name: Twin Tandem with twin tandem centerline gear Example Aircraft: A340-600, IL-96</p>	 <p>FAA Code: 2D/2D2 Common Name: Twin Tandem with twin tandem body gears Example Aircraft: B747</p>	 <p>FAA Code: 3D Common Name: Triple Twin Tandem Example Aircraft: B777, A350-1000</p>	 <p>FAA Code: 2D/3D2 Common Name: Twin Tandem with triple twin tandem body gears Example Aircraft: A380</p>
 <p>FAA Code: 5D Common Name: Five Duals Example Aircraft: AN-124</p>	 <p>FAA Code: 7D Common Name: Seven Duals Example Aircraft: AN-225</p>	 <p>FAA Code: C5 (naming convention does not apply) Example Aircraft: Lockheed C-5</p>	 <p>FAA Code: D2 Common Name: Twin-Twin Bicycle Example Aircraft: B-52</p>
 <p>FAA Code: Q Common Name: Quad Example Aircraft: HS Trident</p>	 <p>FAA Code: Q2 Example Aircraft: Ilyushin IL-76</p>	 <p>FAA Code: T Common Name: Triple Example Aircraft: SR-71</p>	

Annexe 2 : CALCUL DE TRAFIC EQUIVALENT

1) Tous les modèles d'avions sont recensés :

- Deux modèles du même avion sont considérés comme différents si les caractéristiques de leurs atterrisseurs sont différentes (nombre de roues, dimensions, pression...).
- Pour chaque avion (i) sont pris en compte sa charge totale P_{ti} et son nombre de mouvements réels n_i (en mouvements par jour).
- Les charges réelles totales P_{ti} par application du pourcentage de répartition V_s sur l'atterrisseur principal.
- Les charges réelles P_i sont transformées en charges réelles pondérées P'_i pour tenir compte de la fonction de l'aire (en général, $P'_i = P_i$ pour les pistes, bretelles et voies de circulation et $P'_i = 1,2P_i$ pour les aires de stationnement.).

2) Pour chaque modèle d'avion (i), la charge admissible P_{oi} est déterminée à partir abaque chaussées souples ou chaussées rigides en fonction des caractéristiques de la chaussée :

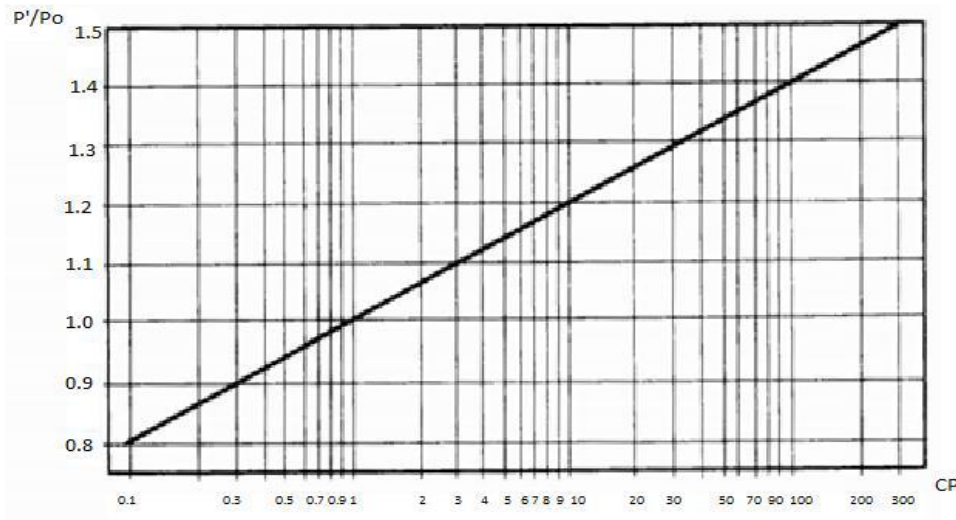
- . E, CBR pour les chaussées souples,
- . H, a, K pour les chaussées rigides.

3) Pour chaque modèle d'avion (i) les n_i mouvements réels de chaque charge réelle pondérée P'_i sont convertis en n'_i mouvements équivalents à la charge admissible P_{oi} . Pour cela, pour chaque modèle d'avion (i) et chaque charge P'_i :

- Le rapport $R_i = P'_i/P_{oi}$ est calculé (ce rapport ne doit pas dépasser 1,2 pour les aires de stationnement et 1,5 pour les autres aires).
- Le coefficient de pondération C_{Pi} des mouvements réels est calculé soit par relation :

$$C_{Pi} = 10^{5(R_i-1)}$$

Soit à l'aide de l'abaque ci-après :



Abaque pour la pondération des mouvements réels.

Calcul du trafic équivalent :

Le trafic équivalent **T'** est alors obtenu en multipliant le trafic réel, c'est-à-dire le nombre d'avions réellement passés sur la chaussée **N**, par ce coefficient de pondération **CP**. Cela permet d'estimer l'effet cumulatif de l'avion de masse **Pi** en termes de passages équivalents d'avions plus légers de masse **Po**. est déterminé par la relation suivante :

$$T' = \sum^n N \times CP$$

4) Le trafic équivalent total (noté T) est calculé par la somme des mouvements équivalents individuels (notés n'i) de chaque modèle d'avion. Comme le montre le tableau suivant :

Type avion	Circuit	Masse maxi	CP	Nbre mouvement réel	Des mouvements équivalents	
A	Décollage	M(A)	Cp(A)	Nmbr mvt (A)	Cp(A)× Nmbr mvt (A)	
B	Atterrissage	M(B)	Cp(B)	Nmbr mvt (B)	Cp(B) × Nmbr mvt (B)	
C	Décollage	M(C)	Cp(C)	Nmbr mvt (C)	Cp(C) × Nmbr mvt (C)	
D	Atterrissage	M(D)	Cp(D)	Nmbr mvt (D)	Cp(D)× Nmbr mvt (D)	
					Trafic équivalent T' :	T'
					Totale : $\sum_{i=1}^n cpi \times ni$	

Remarque : Attention à la notion de mouvement. 1 mouvement correspond au passage d'un appareil en un point de la chaussée. Ceci signifie que, dans Une configuration de plate-forme sans taxiway parallèle, comme dans le cas de la figure ci-contre, le nombre de mouvements peut être de 3 pour une seule rotation d'appareil. (1 mouvement = 1 atterrissage ou 1 décollage.)

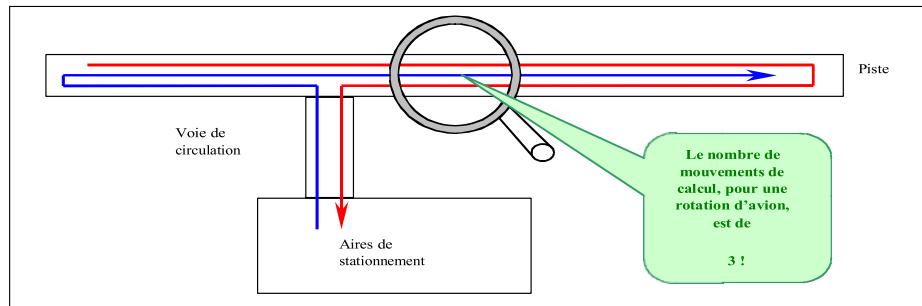


Figure : Nombre de mouvement par rapport à la rotation de l'avion