



OACI

Doc 9157

Manuel de conception des aérodomes

Partie 3 — Chaussées
Troisième édition, 2022



Approuvé par le Secrétaire général et publié sous son autorité

ORGANISATION DE L'AVIATION CIVILE INTERNATIONALE



| OACI

Doc 9157

Manuel de conception des aérodromes

Partie 3 — Chaussées
Troisième édition, 2022

Approuvé par le Secrétaire général et publié sous son autorité

ORGANISATION DE L'AVIATION CIVILE INTERNATIONALE

Publié séparément en français, en anglais, en arabe, en chinois, en espagnol et en russe par l'ORGANISATION DE L'AVIATION CIVILE INTERNATIONALE
999, boul. Robert-Bourassa, Montréal (Québec) H3C 5H7 Canada

Les formalités de commande et la liste complète des distributeurs officiels et des librairies dépositaires sont affichées sur le site web de l'OACI (www.icao.int).

Troisième édition, 2022

Doc 9157, Manuel de conception des aérodromes
Partie 3 — Chaussées

Commande n° : 9157P3
ISBN 978-92-9265-997-4 (version imprimée)

© OACI 2023

Tous droits réservés. Il est interdit de reproduire, de stocker dans un système de recherche de données ou de transmettre sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, un passage quelconque de la présente publication, sans avoir obtenu au préalable l'autorisation écrite de l'Organisation de l'aviation civile internationale.

AVANT-PROPOS

Le présent *Manuel de conception des aérodromes*, Partie 3 — *Chaussées* (Doc 9157) donne des orientations sur la conception et les caractéristiques des chaussées, ainsi que sur les méthodes d'évaluation et de compte rendu de la force portante. Les éléments qui figurent dans le présent manuel sont étroitement liés aux spécifications de l'Annexe 14 — *Aérodromes*, Volume I — *Conception et exploitation technique des aérodromes*. L'objet de ce manuel est de promouvoir l'application uniforme de ces spécifications et de fournir des renseignements et des éléments d'orientation aux États. Le présent manuel a été considérablement réécrit, les évolutions majeures par rapport à la deuxième édition (1983) sont les suivantes :

- a) des renseignements à jour sur la méthode ACR-PCR pour rendre compte de la force portante des chaussées (chapitre 1) ;
- b) des éléments à jour sur la réglementation de l'exploitation en surcharge, conformément à l'utilisation de la méthode ACR-PCR (chapitre 2) ;
- c) des éléments à jour sur l'évaluation des chaussées (chapitre 3) ;
- d) des éléments à jour sur les pratiques des États en matière de conception et d'évaluation des chaussées fournis par les États-Unis, la France et le Royaume-Uni (chapitre 4), sous réserve de modifications lorsque la méthode ACR-PCR deviendra applicable (2024) ;
- e) des éléments à jour sur la texture de la surface de piste et les caractéristiques de drainage (chapitre 5 déplacé à l'appendice 6-B) ;
- f) des orientations à jour sur la protection des chaussées à revêtement d'asphalte (chapitre 6 déplacé à l'appendice 6-C) ;
- g) des éléments à jour sur la conception structurale des ponts et ponceaux (chapitre 7) ;
- h) des éléments à jour sur la construction de revêtements de chaussée pendant les fermetures d'exploitation (chapitre 8 déplacé à l'appendice 6-D) ;
- i) de nouveaux éléments sur la force portante des surfaces naturelles (chapitre 9) ;
- j) un nouveau système de désignation des trains d'atterrissage et la mise à jour des principales caractéristiques des avions ayant une incidence sur la force portante des chaussées (appendice 1) ;
- k) des informations à l'intention des utilisateurs du programme informatique ICAO-ACR (appendice 2) ;
- l) des précisions sur le modèle d'endommagement pour ACR souple (appendice 3) ;
- m) la suppression de l'appendice 4 (informations nécessaires fournies au chapitre 4) ;
- n) la suppression de l'appendice 5, les ACR sont disponibles pour n'importe quelle masse, centre de gravité (CG) et pression des pneus par le biais du programme informatique ICAO-ACR ;
- o) des orientations axées sur l'exploitation et la maintenance des chaussées (nouvel appendice 6).

Le chapitre 4 du présent manuel est fondé sur les données fournies par les États en matière de conception et d'évaluation des chaussées ; elles peuvent donc être considérées comme actuelles. Tout État qui estimerait que les éléments figurant dans le manuel sont dépassés devrait en informer le Secrétaire général en lui communiquant autant que possible un texte révisé de ces éléments.

Les chapitres 5, 6 et 8 de la deuxième édition, qui couvrent des sujets autres que la conception, ont été mis à jour et déplacés au nouvel appendice 6, qui comprend les éléments actualisés relatifs à l'exploitation et à l'entretien, complétés par des orientations sur l'atténuation des distorsions du champ magnétique. L'appendice 6 devrait contenir les éléments définis comme ne relevant pas de la conception jusqu'à ce qu'ils puissent être déplacés dans des documents plus appropriés, tels que le *Manuel des services d'aéroport* (Doc 9137) et les *Procédures pour les services de navigation aérienne — Aérodromes* (PANS — Aérodromes, Doc 9981).

Afin de maintenir la cohérence des éventuelles références faites à la deuxième édition dans d'autres orientations et documents, tous les chapitres et appendices supprimés (p. ex. les chapitres supprimés qui ont été déplacés au nouvel appendice 6) ont été remplacés par des pages « laissées en blanc intentionnellement ».

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
Glossaire	IX
Chapitre 1. Procédures relatives à la publication de la résistance des chaussées d'aérodrome	1-1
1.1 Procédure pour les chaussées destinées aux avions lourds [méthode ACR-PCR (cote de classification d'aéronef — cote de classification de chaussée)]	1-1
Chapitre 2. Orientations relatives à l'exploitation en surcharge	
2.1 Critères proposés dans l'Annexe 14, volume I, supplément A	2-1
Chapitre 3. Évaluation structurelle des chaussées	3-1
3.1 Généralités	3-1
3.2 Éléments de l'évaluation des chaussées	3-1
3.3 Éléments de la méthode ACR-PCR	3-3
3.4 Estimation de l'ampleur et de la composition du trafic	3-5
3.5 Techniques d'évaluation par la méthode des « aéronefs utilisateurs »	3-7
3.6 Techniques et matériel nécessaires pour une évaluation « technique »	3-10
Chapitre 4. Méthodes utilisées par les États pour le calcul et l'évaluation des chaussées	4-1
4.1 Objet	4-1
4.2 Usage de la France	4-1
4.3 Usage du Royaume-Uni	4-2
4.4 Usage des États-Unis	4-3
Chapitre 5. Page laissée intentionnellement en blanc	5-1
Chapitre 6. Page laissée intentionnellement en blanc	6-1
Chapitre 7. Considérations relatives aux ponts, aux ponceaux et aux autres structures	7-1
7.1 Objet	7-1
7.2 Généralités	7-1
7.3 Considérations relatives à la conception	7-1
Chapitre 8. Page laissée intentionnellement en blanc	8-1

Chapitre 9. Critères structurels relatifs aux surfaces naturelles.....	9-1
9.1 Introduction.....	9-1
9.2 Contexte de la conception.....	9-1
9.3 Détails de la conception.....	9-2
9.4 Orientations relatives à la force portante des surfaces naturelles préparées.....	9-3
Appendice 1. Caractéristiques des aéronefs influençant la force portante des chaussées.....	A1-1
Appendice 2. Informations à l'intention des utilisateurs du programme informatique ICAO-ACR.....	A2-1
Appendice 3. Modèle d'endommagement pour ACR souple.....	A3-1
Appendice 4. Page laissée intentionnellement en blanc.....	A4-1
Appendice 5. Page laissée intentionnellement en blanc.....	A5-1
Appendice 6. Orientations relatives à l'exploitation et à l'entretien des chaussées.....	A6-1

GLOSSAIRE

DÉFINITIONS

Asphalte. Liant très visqueux se présentant sous une forme liquide ou semi-solide du pétrole, également appelé bitume. Il peut se trouver dans des dépôts naturels ou être un produit raffiné.

Béton au ciment Portland (PCC). Mélange de granulats minéraux gradués, de ciment Portland et d'eau.

Béton d'asphalte. Mélange de granulats minéraux gradués et de mastic d'asphalte ou d'asphalte, placé à chaud ou à froid et cylindré, également appelé béton asphaltique ou béton bitumineux.

Chaussée mixte. Chaussée se composant de couches souples et rigides, avec ou sans couches granulaires de séparation.

Chaussée rigide. Structure de chaussée qui distribue les charges dans le terrain de fondation et dont la couche de roulement est composée d'une dalle de béton Portland à résistance à la flexion relativement élevée, également appelée chaussée en béton.

Chaussée souple. Chaussée restant en contact intime avec le terrain de fondation, répartissant les charges sur ce terrain, et dont la stabilité est fonction de l'interpénétration du granulats pierreux, du frottement des particules et de la cohésion.

Coefficient de Poisson. Rapport entre les variations linéaires transversale et longitudinale d'un solide sous l'action d'une contrainte.

Corde aérodynamique moyenne (MAC). La MAC est une représentation bidimensionnelle de l'ensemble de l'aile. La répartition de la pression sur l'ensemble de l'aile peut être réduite à une seule force portante sur le centre aérodynamique de la MAC et à un moment autour de ce centre. La position du centre de gravité est exprimée en pourcentage de la MAC.

Cote de classification d'aéronef (ACR). Nombre qui exprime l'effet relatif d'un aéronef sur une chaussée pour une résistance type spécifiée du terrain de fondation.

Cote de classification de chaussée (PCR). Nombre qui exprime la force portante d'une chaussée pour une exploitation sans restriction.

Couche de base (ou base). La ou les couches de matériau spécifié ou sélectionné, d'épaisseur calculée, placée(s) sur une couche ou sur terrain de fondation pour supporter une couche de roulement.

Couche de fondation. La ou les couches de matériau spécifié ou sélectionné, d'épaisseur calculée, placée(s) sur un terrain de fondation pour supporter une couche de base.

Couche de roulement. Couche supérieure dans la structure d'une chaussée, également appelée couche d'usure.

Déviations latérales. La trajectoire d'un aéronef donné s'écartera de la trajectoire centrée sur l'axe longitudinal de la chaussée en question selon un modèle statistiquement prévisible. Ce phénomène est appelé « déviation latérale ».

Force portante. Mesure de l'aptitude d'une chaussée à supporter la charge qui s'y exerce, également appelée capacité portante ou résistance d'une chaussée.

Granulat. Terme général désignant l'ensemble des matières solides qui, mélangées à des liants, forment une composition pour le revêtement des chaussées.

Indice portant californien (CBR). Indice représentant la force portante d'un sol, et correspondant au rapport entre la charge de pénétration de ce sol et celle d'un matériau standard. Cette méthode est destinée à évaluer la qualité relative des sols de fondation, mais elle s'applique aussi aux matériaux utilisés pour les couches de fondation et pour certaines couches de base.

Note.— La méthode d'essai standard pour le CBR des sols compactés en laboratoire est une norme ASTM (ASTM D1883).

Masse totale au décollage. Masse maximale de l'aéronef sur l'aire de trafic ou au roulage, également appelée poids total.

Module d'élasticité (E). Le module d'élasticité d'un matériau est une mesure de sa rigidité. Il est égal à la contrainte qui lui est appliquée rapportée à la déformation élastique qui en résulte.

Numéro de classification d'aéronef (ACN). Nombre qui exprime l'effet relatif d'un aéronef sur une chaussée pour une résistance type spécifique du terrain de fondation.

Numéro de classification de chaussée (PCN). Nombre qui exprime la force portante d'une chaussée.

Revêtement. Couche de roulement supplémentaire placée sur une chaussée existante, avec ou sans couche intermédiaire ou couche de fondation, habituellement pour renforcer la chaussée ou reprofiler sa surface.

Structure de chaussée (ou chaussée). Combinaison de la couche de fondation, de la couche de base et de la couche de roulement placées sur un terrain de fondation pour supporter la charge exercée par les véhicules et la répartir dans le terrain de fondation.

Terrain de fondation. Couche supérieure du sol, naturelle ou artificielle, qui supporte les charges transmises par la chaussée, également appelée forme ou sol de fondation.

ABRÉVIATIONS ET SIGLES

2D	Atterrisseur à bogie
ACN	Numéro de classification d'aéronef
ACR	Cote de classification d'aéronef
AIP	Publication d'information aéronautique
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBR	Indice portant californien
CDF	Facteur d'endommagement cumulé
CG	Centre de gravité
cm	Centimètre
CND	Contrôle non destructif
D	Atterrisseur à roues jumelées
DSWL	Charge calculée sur roue simple
FAA	Federal Aviation Administration

FOD	Objet intrus
FWD	Défectomètre à masse tombante
HFWD	Défectomètre lourd à masse tombante
HWD	Défectomètre lourd
kN	Kilonewton
LRFD	Conception des facteurs de charge et de résistance
MPa	Mégapascal
PCA	Portland Cement Association
PCC	Béton au ciment Portland
PCN	Numéro de classification de chaussée
PCR	Cote de classification de chaussée
PMP	Programme de gestion des chaussées
RESA	Aire de sécurité d'extrémité de piste
S	Voie du train des roues jumelées
SARP	Normes et pratiques recommandées
SD	Distance entre les centres des aires de contact des roues diagonales
ST	Empattement d'un bogie
STAC	Service technique de l'aviation civile
TSD	Défectomètre de vitesse de circulation

Chapitre 1

PROCÉDURES RELATIVES À LA PUBLICATION DE LA RÉSISTANCE DES CHAUSSÉES D'AÉRODROME

1.1 PROCÉDURES POUR LES CHAUSSÉES DESTINÉES AUX AÉRONEFS LOURDS [MÉTHODE ACR-PCR (COTE DE CLASSIFICATION D'AÉRONEF — COTE DE CLASSIFICATION DE CHAUSSÉE)]

1.1.1 L'Annexe 14 — *Aérodromes, Volume I — Conception et exploitation technique des aérodromes*, stipule que la force portante d'une chaussée réservée à des aéronefs d'une masse supérieure à 5 700 kg devrait être indiquée au moyen de la méthode ACR-PCR (cote de classification d'aéronef — cote de classification de chaussée). Afin de faciliter la compréhension et l'application de la méthode ACR-PCR, les éléments explicatifs suivants sont présentés :

- a) les principes de la méthode ;
- b) la façon dont on détermine les cotes de classification d'aéronef (ACR) d'un aéronef ;
- c) la façon dont on détermine les cotes de classification de chaussée (PCR) d'une chaussée en utilisant la notion de facteur d'endommagement cumulé (CDF).

Les paramètres essentiels de la détermination de la cote de classification de chaussée (PCR) sont résumés dans la figure 1-1.

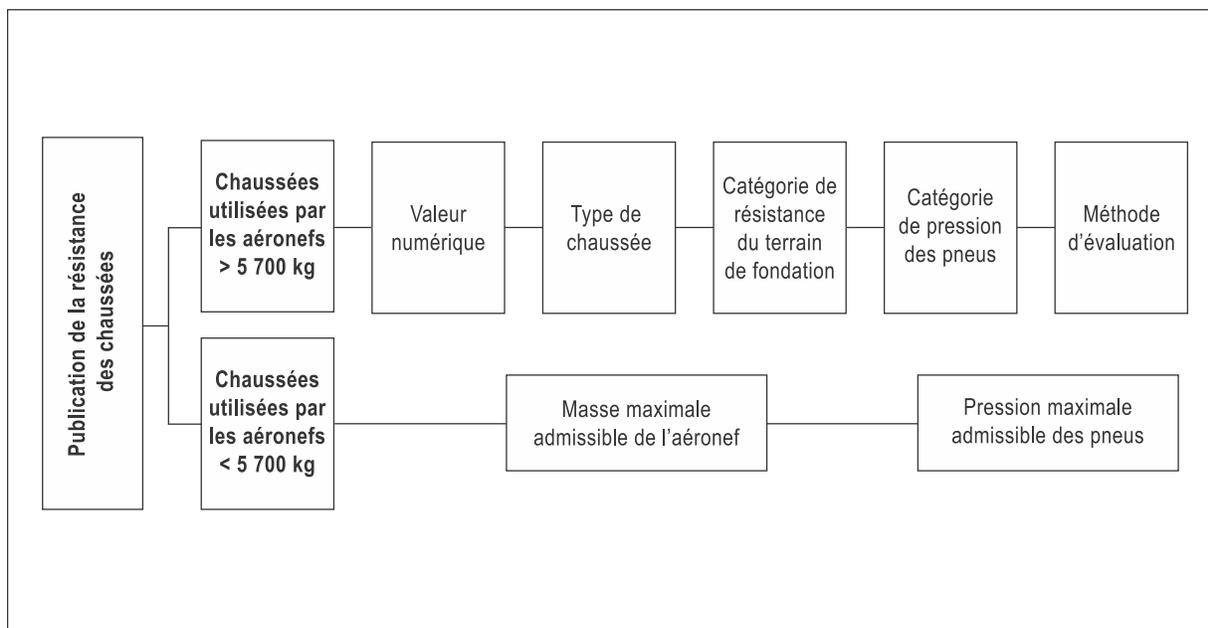


Figure 1-1. Détermination de la PCR

1.1.2 Principe de la méthode ACR-PCR

1.1.2.1 La méthode ACR-PCR ne vise qu'à la diffusion des données sur la résistance des chaussées dans les publications d'information aéronautique (AIP). Elle n'est conçue ni pour le calcul ni pour l'évaluation d'une chaussée, et elle ne prévoit pas non plus l'utilisation d'une méthode particulière par l'exploitant d'aérodrome pour le calcul ou l'évaluation d'une chaussée. En fait, elle permet aux États d'utiliser n'importe quelle méthode de calcul ou d'évaluation. À cette fin, la méthode accorde plus d'importance à la classification de charge des aéronefs (ACR) qu'à celle des chaussées et elle comprend une procédure normalisée pour l'évaluation de la classification de charge des aéronefs. Elle permet d'indiquer la résistance d'une chaussée en fonction de la classification de charge de l'aéronef, par exemple, celle que la chaussée peut accepter sans restriction. L'exploitation sans restriction ne signifie pas une exploitation illimitée, mais fait référence à la relation entre la PCR et l'ACR de l'aéronef. Il est permis à un aéronef d'être exploité sans restriction de poids (sous réserve des limites de pression des pneus) lorsque la PCR est supérieure ou égale à l'ACR. Le terme « exploitation illimitée » ne tient pas compte de la durée de vie de la chaussée. La PCR à déclarer est telle que la résistance de la chaussée est suffisante pour le trafic actuel et futur analysé et devrait être réévaluée en cas d'évolution significative du trafic. Une évolution significative du trafic serait indiquée par l'introduction d'un nouveau type d'aéronef ou une augmentation des niveaux actuels de trafic d'aéronefs non pris en compte dans l'analyse initiale de la PCR. L'autorité aéroportuaire peut utiliser la méthode de son choix pour déterminer la classification de charge de sa chaussée, à condition qu'elle utilise le concept CDF. La PCR ainsi publiée indiquera qu'un aéronef dont l'ACR est inférieure ou égale à cette classification de charge peut utiliser la chaussée sous réserve d'une restriction éventuelle en ce qui concerne la pression des pneus.

1.1.2.2 La méthode ACR-PCR facilite la publication de renseignements sur la résistance des chaussées selon une échelle continue. L'échelle a comme limite inférieure zéro et n'a pas de limite supérieure. En outre, la même échelle est utilisée pour indiquer la classification de charge des aéronefs et des chaussées.

1.1.2.3 Pour faciliter l'application de la méthode, les avionneurs publieront, dans les documents qui indiquent les caractéristiques de leurs aéronefs, les ACR calculées pour deux masses différentes (soit la masse maximale sur l'aire de trafic et une valeur représentative de la masse à vide en ordre d'exploitation) sur chaussée rigide et sur chaussée souple, et pour les quatre catégories types de résistance du terrain de fondation. Le programme informatique ICAO-ACR, qui est à la disposition de toutes les parties prenantes, fournit les ACR de n'importe quel aéronef à n'importe quelle masse et position du centre de gravité (CG) pour les chaussées souples et rigides et pour les quatre catégories standard de résistance du terrain de fondation. Il est à noter que la masse utilisée pour le calcul de l'ACR est une masse « statique » et qu'aucune marge n'est prévue pour tenir compte d'une augmentation de la charge due à des effets dynamiques.

1.1.2.4 La méthode ACR-PCR prévoit également la communication des renseignements ci-après pour chaque chaussée :

- a) type de chaussée ;
- b) catégorie de résistance du terrain de fondation ;
- c) pression maximale admissible des pneus ;
- d) méthode utilisée pour l'évaluation de la chaussée.

Les données obtenues à partir des caractéristiques énumérées ci-dessus ont principalement pour objet de permettre aux exploitants de déterminer les types d'aéronef et les masses admissibles en ordre d'exploitation, et aux avionneurs d'assurer la compatibilité entre les chaussées d'aéroport et les aéronefs à l'étude. Il n'est cependant pas nécessaire d'indiquer la résistance réelle du terrain de fondation ni la pression maximale admissible des pneus. Par conséquent, les valeurs types de la résistance du terrain de fondation et de la pression des pneus qui sont normalement rencontrées ont été réparties en plusieurs catégories comme l'indique le paragraphe 1.1.3.2. Il suffit que l'autorité aéroportuaire identifie les catégories qui l'intéressent (voir aussi les exemples qui figurent à l'Annexe 14, volume I, section 2.6). L'autorité

aéroportuaire devrait, dans la mesure du possible, publier la résistance de la chaussée sur la base d'une évaluation technique de celle-ci. Les détails du processus d'évaluation technique figurent à la section 3.6. Si, en raison de contraintes financières ou techniques, une évaluation technique n'est pas réalisable, il faut alors utiliser la méthode relative aux aéronefs pour rendre compte de la résistance de la chaussée. La méthode d'évaluation des aéronefs est présentée en détail à la section 3.5.

1.1.2.5 La méthode ACR-PCR permet aux États d'utiliser la procédure de calcul/d'évaluation de leur choix pour déterminer la PCR de leurs chaussées. Cependant, dans de nombreux cas, l'État peut manquer d'expertise dans ce domaine ou souhaiter intégrer une méthode normalisée pour réaliser l'évaluation technique de ses chaussées. Voir le chapitre 4 pour les pratiques des États.

1.1.2.6 Dans certains cas, les ponts, ponceaux et autres structures de surface et souterraines peuvent constituer l'élément critique ou limitatif nécessitant la communication d'une PCR inférieure pour la chaussée. Les considérations qui permettent l'utilisation de la méthode ACR-PCR pour limiter la surcharge des chaussées ne sont pas nécessairement suffisantes pour protéger ces structures. L'évaluation et la prise en compte de ces structures sont traitées au chapitre 7.

1.1.3 Méthode de détermination des ACR

1.1.3.1 Les ACR des aéronefs sont calculées selon la méthode ACR-PCR, comme il est indiqué à la figure 1-2.

Les documents et logiciels pertinents sont les suivants :

- 1) Caractéristiques d'aéronef pour la planification des aéroports (publiées par les avionneurs).
- 2) Programme informatique ICAO-ACR (version actuelle).

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

Catégorie du terrain de fondation

1.1.3.2.1 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.

1.1.3.2.2 Les catégories du terrain de fondation sont définies comme suit : résistance élevée, moyenne, faible et ultra-faible, avec les valeurs numériques ci-après :

Code A — Résistance élevée : caractérisée par $E = 200$ MPa et représentant toutes les valeurs de E égales ou supérieures à 150 MPa pour les chaussées rigides et les chaussées souples.

Code B — Résistance moyenne : caractérisée par $E = 120$ MPa et représentant une gamme de valeurs de E égales ou supérieures à 100 MPa et strictement inférieures à 150 MPa pour les chaussées rigides et les chaussées souples.

Code C — Résistance faible : caractérisée par $E = 80$ MPa et représentant une gamme de valeurs de E égales ou supérieures à 60 MPa et strictement inférieures à 100 MPa pour les chaussées rigides et les chaussées souples.

Code D — Résistance ultra-faible : caractérisée par $E = 50$ MPa et représentant toutes les valeurs de E strictement inférieures à 60 MPa pour les chaussées rigides et les chaussées souples.

Contrainte de travail du béton pour chaussées rigides

1.1.3.2.3 Pour les chaussées rigides, une contrainte standard est spécifiée aux fins de la publication des données ($\sigma = 2,75$ MPa), et ce uniquement comme moyen d'assurer une communication uniforme. La contrainte de travail à utiliser pour la conception et/ou l'évaluation des chaussées n'a aucun rapport avec la contrainte standard destinée à la publication des données.

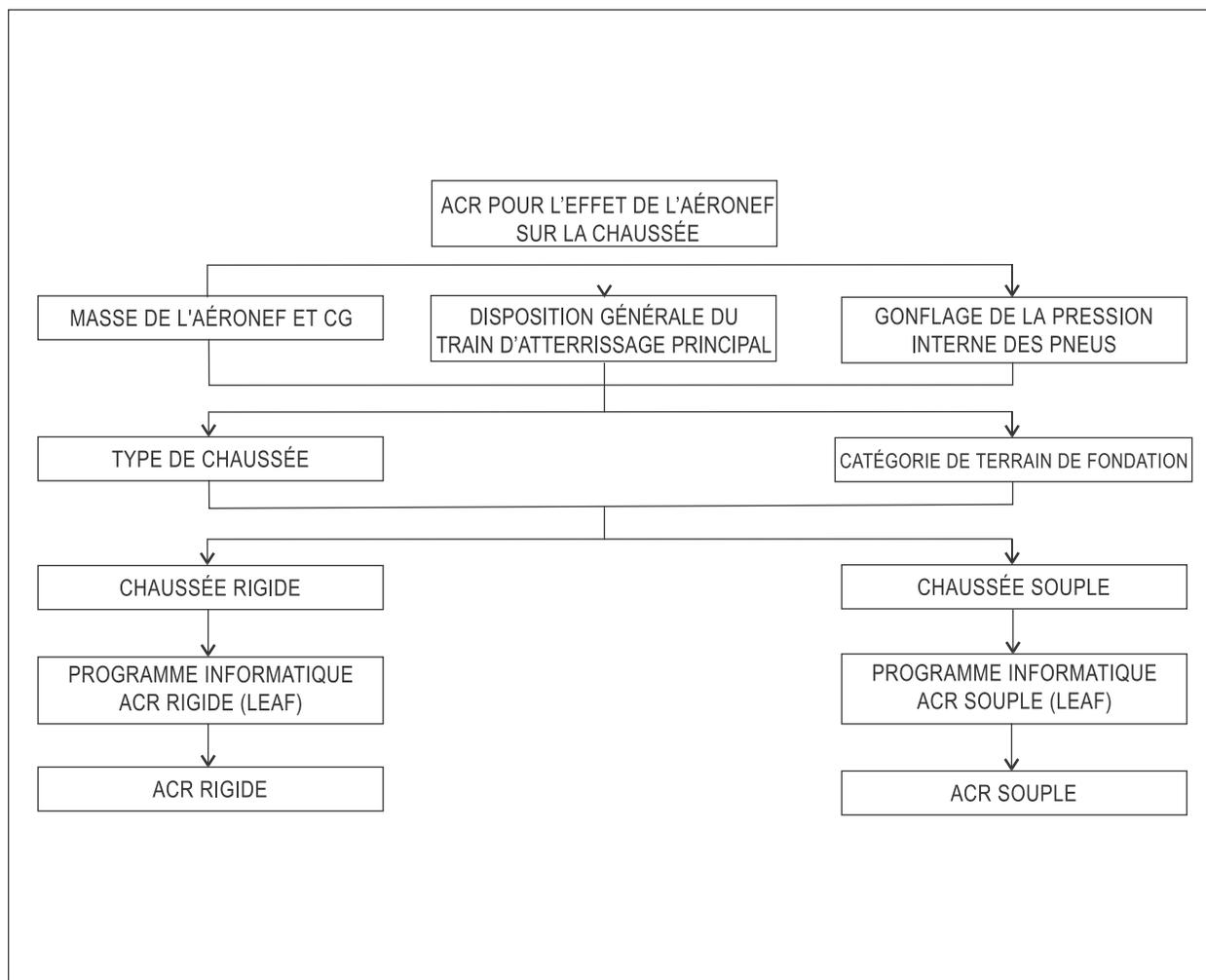


Figure 1-2. Calcul de l'ACR¹

1. Les programmes informatiques sont décrits au § 1.1.3.4.

Charge sur roue simple calculée mathématiquement

1.1.3.2.4 Le principe d'une charge sur roue simple calculée mathématiquement a été utilisé dans la méthode ACR-PCR comme moyen de définir l'interaction entre le train d'atterrissage de l'aéronef et la chaussée sans spécifier l'épaisseur de la chaussée en tant que paramètre ACR. Le principe consiste à déterminer, à partir de l'épaisseur fournie par le modèle mathématique pour un train d'atterrissage, une épaisseur équivalente correspondant à une roue simple et une pression standard de pneu de 1,50 MPa. La charge sur roue simple ainsi obtenue est alors utilisée sans autre référence à l'épaisseur ; il s'agit en effet, essentiellement, d'obtenir l'égalité des épaisseurs, c'est-à-dire « la même contrainte appliquée sur la chaussée », plutôt que la valeur de l'épaisseur de la chaussée. Les phénomènes qui précèdent sont conformes à l'objectif de la méthode ACR-PCR qui consiste à évaluer l'effet de charge relatif d'un aéronef sur une chaussée.

Cote de classification d'aéronef (ACR)

1.1.3.2.5 L'ACR d'un aéronef se définit numériquement comme étant égale à deux fois la charge calculée sur roue simple, lorsque celle-ci est exprimée en centaines de kilos. Comme indiqué plus haut, la pression du pneu d'une roue simple est normalisée à 1,50 MPa. En outre, la charge calculée sur roue simple est fonction du module du terrain de fondation. La cote de classification d'aéronef (ACR) n'est définie que pour les quatre catégories standard de terrain de fondation (élevée, moyenne, faible, ultra-faible). Le facteur de deux qui apparaît dans la définition numérique précédente de l'ACR est utilisé afin d'obtenir, en regard de l'échelle des masses totales, des valeurs ACR exprimées sous forme de nombres entiers et qui peuvent être utilisées avec une précision raisonnable.

1.1.3.2.6 Étant donné qu'un aéronef est exploité dans diverses conditions de masse et de CG, les conventions ci-après ont été utilisées dans les calculs de l'ACR (voir les figures 1-3 et 1-4) :

- a) l'ACR maximale d'un aéronef est calculée pour la masse et le CG qui produisent la charge la plus élevée du train principal sur la chaussée (il s'agit en général de la masse maximale sur l'aire de trafic et du CG arrière correspondant). Les pneus de l'aéronef sont considérés comme étant gonflés conformément aux recommandations du fabricant de pneus ;
- b) les abaques et tableaux correspondants indiquent l'ACR en fonction de la masse totale de l'aéronef, la position du CG étant constante par rapport à la valeur maximale de l'ACR (il s'agit en général du CG arrière correspondant à la masse maximale sur l'aire de trafic), et les pneus gonflés à la pression correspondant à la masse maximale de l'aéronef sur l'aire de trafic ;
- c) les valeurs ACR pour des conditions particulières sont ajustées en fonction des effets de la pression des pneus et/ou du CG, pour une masse totale spécifiée de l'aéronef.

Modèles mathématiques

1.1.3.3 Le seul modèle mathématique utilisé dans la méthode ACR-PCR est l'analyse des couches élastiques. Le modèle d'analyse des couches élastiques suppose que plusieurs couches homogènes, élastiques et isotropes disposées en pile, qu'elles soient souples ou rigides, peuvent représenter la structure de la chaussée. Chaque couche du système est caractérisée par un module d'élasticité E_i , un coefficient de Poisson ν_i , et une épaisseur de couche uniforme t_i . Les couches sont supposées avoir une étendue horizontale infinie, et la couche inférieure ou couche de fondation est supposée s'étendre verticalement à l'infini (c'est-à-dire que le terrain de fondation est modélisé comme un demi-espace élastique). En raison de la nature élastique linéaire du modèle, les charges exercées par chaque roue peuvent être additionnées pour obtenir les réponses combinées de contrainte et de déformation pour une charge complexe d'un train d'atterrissage d'aéronef à roues multiples. L'utilisation du modèle d'analyse des couches élastiques permet une corrélation maximale avec les méthodes de conception des chaussées dans le monde.

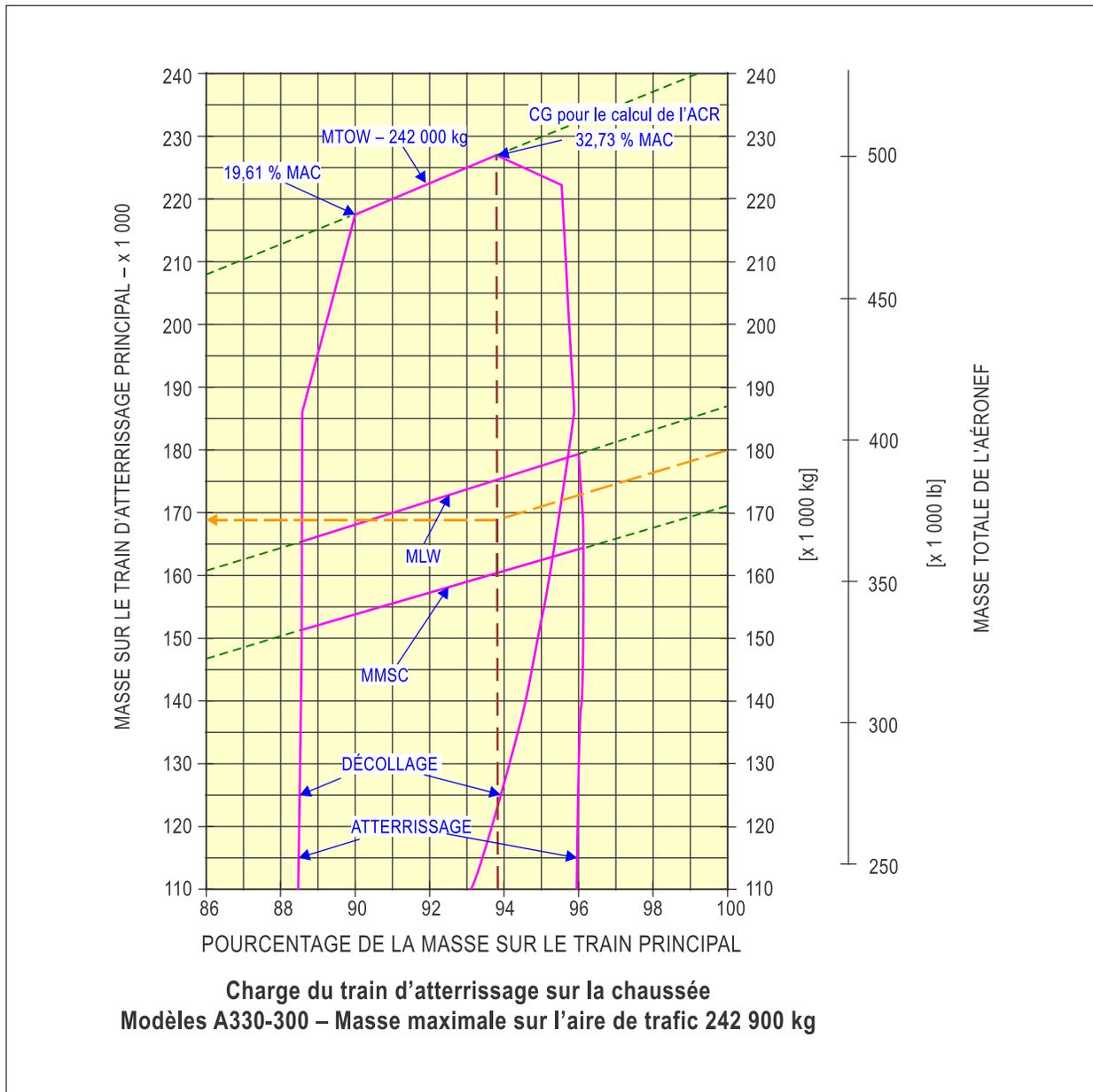


Figure 1-3. Chargement du train d'atterrissage sur la chaussée — Airbus A330-300

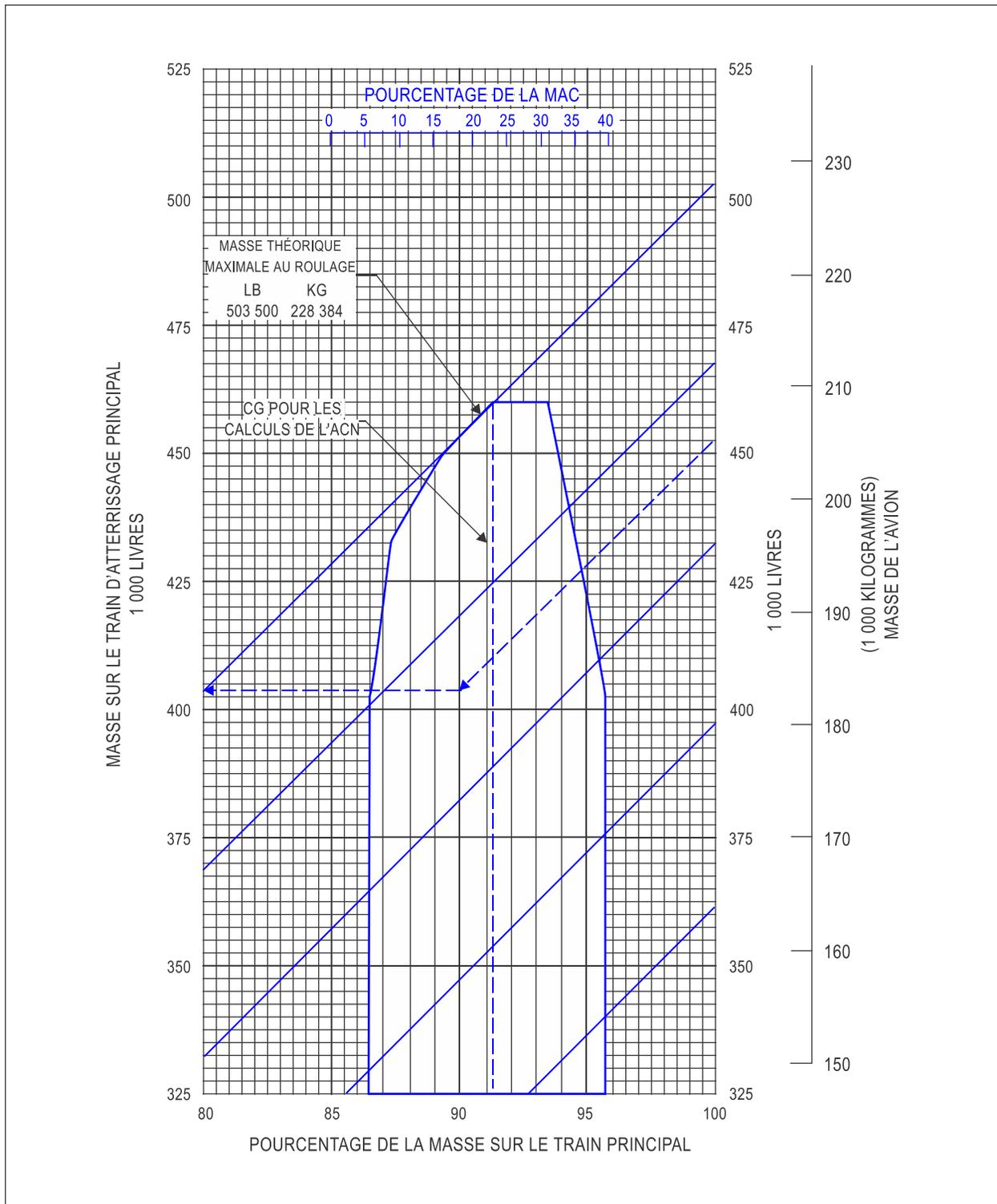


Figure 1-4. Chargement du train d'atterrissage sur la chaussée — Boeing 787-8

Programmes informatiques

1.1.3.4 Le programme informatique LEAF a été développé à partir du modèle mathématique d'analyse des couches élastiques susmentionné de la Federal Aviation Administration (FAA) des États-Unis. Le programme LEAF est un logiciel ouvert dont le code source est disponible auprès de la FAA, Airport Technology Research and Development Branch, William J. Hughes Technical Center (États-Unis). Un deuxième programme informatique d'analyse des couches élastiques, Alizé-Aéronautique, a par ailleurs été développé par l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) en partenariat avec AIRBUS SAS. Il s'est avéré qu'il donne des résultats presque identiques pour les mêmes entrées. Le programme informatique ICAO-ACR intègre le programme LEAF et a été développé pour mettre en œuvre les procédures de calcul de l'ACR pour chaussées rigides et chaussées souples. Le programme ICAO-ACR est distribué sous forme compilée comme bibliothèque de liens dynamiques (DLL) Visual Basic.NET et peut être relié à d'autres programmes qui calculent directement l'ACR ou qui utilisent le calcul de l'ACR pour évaluer la PCR. Par défaut, le programme ICAO-ACR prend comme entrées : la masse maximale sur l'aire de trafic pour les calculs de l'ACR ; le pourcentage de la masse maximale sur l'aire de trafic agissant sur le train principal (équivalent à cet effet au CG arrière correspondant à la masse maximale sur l'aire de trafic) ; le nombre de roues ; les coordonnées géométriques de toutes les roues ; le type de chaussée (rigide ou souple). Le résultat est l'ACR de chaque catégorie de terrain de fondation et l'épaisseur de référence de la chaussée (t) correspondant à l'ACR de chaque catégorie de terrain de fondation. L'appendice 2 du présent manuel donne des informations sur la liaison avec la bibliothèque ICAO-ACR.

Méthodes graphiques

1.1.3.5 Les méthodes graphiques ne devraient pas être utilisées pour déterminer l'ACR. Il faut plutôt utiliser les programmes informatiques décrits ci-dessus.

Chaussées rigides

1.1.3.6 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 § 1.1.3.2.2, ainsi que d'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. Les étapes ci-dessous sont utilisées pour déterminer l'ACR rigide d'un aéronef.

Structure de chaussée de référence

1.1.3.6.1 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 1-1) :

Tableau 1-1. Structure de chaussée de référence pour l'ACR rigide

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 § 1.1.3.2.2	0,40

L'épaisseur minimale admissible de la couche 1 dans le modèle d'analyse des couches élastiques est de 50,8 mm. Les calculs de l'analyse des couches élastiques supposent en outre que l'interface horizontale entre la couche 1 et la couche 2 n'est pas liaisonnée (glissement total) et que l'interface horizontale entre la couche 2 et la couche 3 est en adhérence totale. Dans le modèle d'analyse des couches élastiques, la contrainte σ est la contrainte horizontale maximale calculée sur le fond de la couche 1 (la couche de béton au ciment Portland).

Train d'évaluation

1.1.3.6.2 La valeur ACR est calculée pour un seul bogie dans l'ensemble du train d'atterrissage principal [c'est-à-dire pour deux roues dans un atterrisseur à roues jumelées (D), quatre roues dans un atterrisseur à bogie (2D), etc.]. Pour les types de trains d'atterrissage plus complexes comportant plus de deux bogies (c'est-à-dire dont la désignation dans l'ordonnance 5300.7 de la FAA, « Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations », comporte plus de deux caractères), le bogie individuel de l'ensemble du train principal ayant l'ACR rigide le plus grand détermine l'ACR rigide de l'aéronef. Tous les bogies sont évalués à la masse et au CG qui produisent la plus grande charge totale du train principal sur la chaussée.

Points d'évaluation des contraintes

1.1.3.6.3 Le nombre de points d'évaluation de l'analyse des couches élastiques est égal au nombre de roues du train d'évaluation. Les points d'évaluation sont situés au fond de la couche 1, sous le point central de chaque roue. L'épaisseur (t) de la couche 1 est ajustée jusqu'à ce que la contrainte maximale évaluée sur tous les points d'évaluation soit égale à 2,75 MPa. La valeur (t) qui en résulte est l'épaisseur de référence pour l'ACR.

Calcul de la charge calculée sur roue simple (DSWL)

1.1.3.6.4 En utilisant l'épaisseur de référence ci-dessus et le même modèle d'analyse des couches élastiques qu'au § 1.1.3.6.1, obtenir une charge calculée sur roue simple pour le terrain de fondation sélectionné. En maintenant la pression constante des pneus à 1,50 MPa, la valeur de la charge calculée sur roue simple est ajustée jusqu'à ce que la contrainte horizontale maximale au fond de la couche 1 soit égale à 2,75 MPa. Pour l'évaluation des contraintes sous la charge sur roue simple, utiliser un point d'évaluation situé au fond de la couche 1, directement sous le centre de la roue.

Calcul modifié de la DSWL pour les aéronefs légers

1.1.3.6.5 Pour certains aéronefs légers, l'épaisseur de référence (t) requise est inférieure à l'épaisseur minimale admissible. Appliquer les étapes modifiées suivantes pour calculer la DSWL uniquement lorsque l'épaisseur théorique de la couche 1, dont la contrainte maximale est égale à 2,75 MPa, est inférieure à 50,8 mm :

- a) déterminer la valeur de la contrainte (inférieure à 2,75 MPa) correspondant à l'épaisseur minimale admissible de béton (50,8 mm) ;
- b) calculer la DSWL pour le terrain de fondation sélectionné au moyen de l'épaisseur minimale de la structure de référence. En maintenant la pression constante des pneus à 1,50 MPa, la valeur de la charge sur roue simple est ajustée jusqu'à ce que la contrainte horizontale maximale au fond de la couche 1 soit égale à la valeur déterminée au point a) ci-dessus.

Calcul de l'ACR

1.1.3.6.6 La cote de classification de l'aéronef, à la masse et à la catégorie de terrain de fondation sélectionnées, est égale à deux fois la charge calculée sur roue simple en centaines de kilogrammes. La valeur numérique de l'ACR peut être arrondie au multiple de dix le plus proche pour la publication.

Chaussées souples

1.1.3.7 La procédure ACR pour chaussée souple lie la charge calculée sur roue simple à une pression constante des pneus de 1,50 MPa à une épaisseur totale de référence (t), calculée pour 36 500 passages de l'aéronef. Elle tient compte des quatre catégories de terrain de fondation indiquées au § 1.1.3.2.2.

Structures de chaussée de référence

1.1.3.8 Le système ACR-PCR doit couvrir une large gamme d'aéronefs, pesant de quelques tonnes à plusieurs centaines de tonnes. Les structures de référence ont été choisies de manière à produire des épaisseurs appropriées pour les catégories de terrain de fondation standard pour la gamme de poids des aéronefs utilisés. La détermination des structures de référence pour le calcul de l'ACR souple consiste à définir les matériaux et les propriétés constitutives des différentes couches. Toutes les couches sont définies par le module d'élasticité E, le coefficient de Poisson ν et (sauf pour le revêtement) l'épaisseur t. Les calculs de l'analyse des couches élastiques supposent que toutes les interfaces horizontales entre les couches sont entièrement liaisonnées. Les tableaux 1-2 et 1-3 définissent les structures de référence à utiliser pour le calcul de l'ACR souple.

**Tableau 1-2. 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	ν
Couche de roulement (asphalte)	76	1 379	0,35
Couche de base (granulat concassé)	variable	Voir le § 1.1.3.10	0,35
Terrain de fondation	infinie	Voir le § 1.1.3.2.2	0,35

**Tableau 1-3. Structure de référence pour l'ACR souple
(aéronef équipé de plus de deux roues sur toute jambe du train principal)**

Description de la couche	Épaisseur (mm)	E, MPa	ν
Couche de roulement (asphalte)	127	1 379	0,35
Couche de base (granulat concassé)	variable	Voir le § 1.1.3.10	0,35
Terrain de fondation	infinie	Voir le § 1.1.3.2.2	0,35

1.1.3.9 Dans le modèle d'analyse des couches élastiques, l'épaisseur minimale admissible de la couche variable (couche de base) est de 25,4 mm. En raison du nombre intentionnellement limité de structures de référence, les épaisseurs de couche calculées peuvent ne pas être réalistes aux extrémités de la gamme de poids des aéronefs. Toutefois, cela n'invalide pas le concept d'ACR, dans lequel t est un indicateur relatif plutôt que la base d'une conception pratique.

Module de la couche de base

1.1.3.10 Toutes les structures de chaussées de référence souples comprennent une couche d'épaisseur variable au-dessus du terrain de fondation, représentant une couche de base en granulats concassés. Le module de la couche d'épaisseur variable n'est pas déterminé dans la procédure ACR, mais il est fonction de l'épaisseur et du module du terrain de fondation. Dans le modèle d'analyse des couches élastiques, la couche de base est subdivisée en sous-couches plus petites, une valeur de module étant ensuite attribuée à chaque sous-couche au moyen d'une procédure récursive, comme expliqué ci-dessous. Les valeurs de module sont attribuées aux sous-couches suivant la procédure du programme informatique FAARFIELD (version 1.42) de la FAA, pour le point P-209 (granulat concassé). Les étapes de la procédure sont les suivantes :

Étape 1. Déterminer le nombre de sous-couches N . Si l'épaisseur de la couche de base t_B est inférieure à 381 mm, alors $N = 1$ et la sous-couche n'est pas nécessaire. Si t_B est supérieur ou égal à 381 mm, le nombre de sous-couches est :

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

où t_B s'exprime en mm, et la fonction entière renvoie la partie entière de l'argument (c'est-à-dire qu'elle arrondit au nombre 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 . 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 $t_B - (N - 1) \times 254$ mm. Il est à noter que les sous-couches de N n'ont généralement pas la même épaisseur. Par exemple, si l'épaisseur de la couche de base est de 660 mm, alors à partir de l'étape 1, 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.

Étape 3. Attribuer une valeur de module E à chaque sous-couche. Les valeurs de module augmentent de bas en haut, reflétant l'effet d'un confinement croissant du matériau granulaire. Les valeurs du module sont données par l'équation suivante :

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

où 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 ;

$c = 10,52$ (constante) ;

$d = 2,0$ (constante).

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 t_b est compris entre 127 mm et 254 mm et est supérieur à un multiple entier de 254 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 t_b dépasse un multiple entier de 254 mm de plus de 127 mm, mais de moins de 254 mm, alors :

- 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.
- 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.
- 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.
- 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} :

$$E_N = E_{N-1} + t_N \times \frac{E_{254} - E_{N-1}}{254}$$

Train d'évaluation

1.1.3.11 La valeur ACR est calculée en utilisant toutes les roues du train d'atterrissage principal (les roues du train d'atterrissage avant ne sont pas incluses). Les trains principaux sont évalués à la masse et au CG qui produisent la plus grande charge totale du train principal sur la chaussée.

Points d'évaluation de la déformation

1.1.3.12 Dans le modèle d'analyse des couches élastiques, la déformation ϵ est la déformation verticale maximale calculée sur la surface supérieure de la couche de fondation (la plus basse). Dans le programme informatique ICAO-ACR, les déformations sont calculées à des points d'évaluation spécifiques en fonction de la géométrie du train d'évaluation. Les points d'évaluation sont placés directement sous le point central de chaque roue et aux points définis par une grille rectangulaire régulière espacée à intervalles de 10 cm et orientée parallèlement aux axes principaux du train.

1.1.3.12.1 Pour les trains principaux simples composés de deux bogies [c'est-à-dire pour deux roues dans un atterrisseur à roues jumelées (D), quatre roues dans un atterrisseur à bogie (2D), etc.], l'origine de la grille est fixée au centre géométrique d'un bogie. Les limites de la grille s'étendent sur 30 cm au-delà des coordonnées maximales des roues de tous les côtés du bogie (figure 1-5).

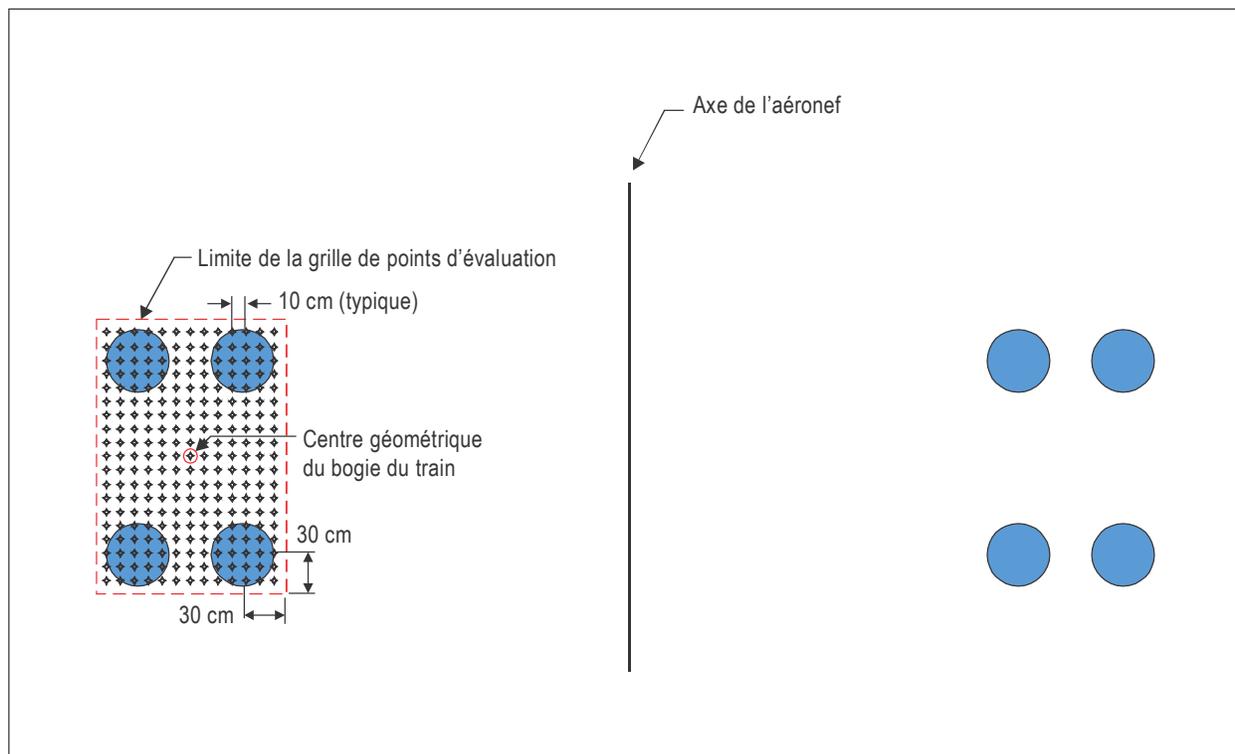


Figure 1-5. Définition de la grille pour une disposition simple du train d'atterrissage principal

1.1.3.12.2 Pour les types de trains plus complexes dont l'ensemble du train d'atterrissage principal comprend plus de deux bogies (c'est-à-dire tous les aéronefs dont la désignation du train comprend plus de deux caractères dans l'ordonnance 5300.7 de la FAA, « Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations »), 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 (figure 1-6). 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.

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

Note.— Le programme ICAO-ACR détecte automatiquement les symétries dans la grille des points d'évaluation afin de réduire le nombre de calculs nécessaires. Dans le cas du B787-9, seule une moitié de la grille de points d'évaluation peut être calculée en raison de la symétrie transversale.

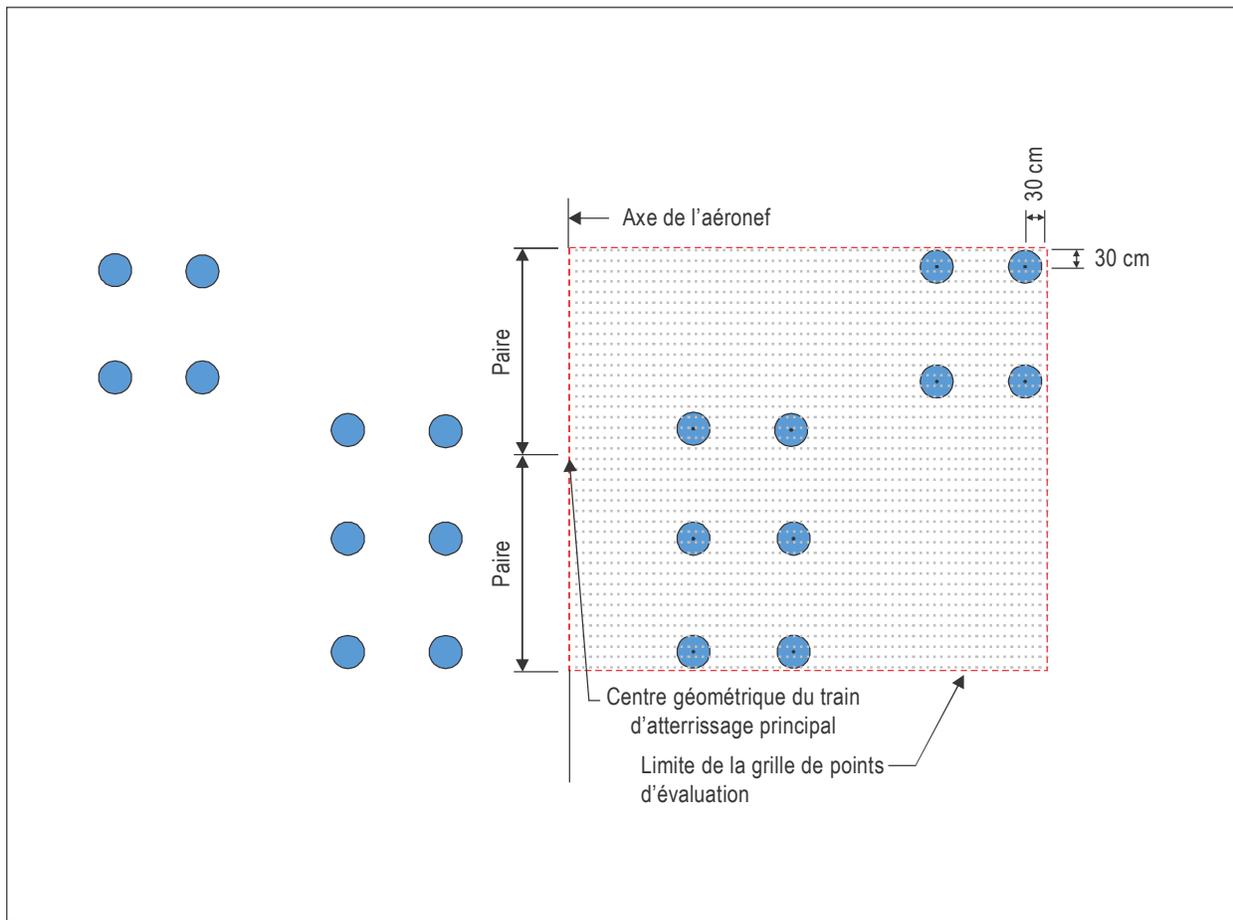


Figure 1-6. Définition de la grille pour les trains d'atterrissage principaux complexes

Modèle d'endommagement

1.1.3.13 La procédure ACR souple s'appuie sur le critère de rupture du terrain de fondation associé à la loi d'endommagement élémentaire :

$$D_e(\varepsilon) = \frac{1}{C_e(\varepsilon)}$$

Cette loi d'endommagement élémentaire se fonde sur la notion de cycle de chargement (profil de déformation à pic simple avec une valeur maximale ε), qui ne peut pas être appliquée aux atterrisseurs avec essieux en tandem produisant des profils de déformation complexes, éventuellement avec plusieurs pics de déformation et aucun retour à la déformation nulle entre les pics. Par conséquent, la loi d'endommagement élémentaire est étendue à une forme intégrale continue :

$$D = \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \left\langle \frac{dD_e(x)}{dx} \right\rangle dx$$

où x désigne la position longitudinale le long du train d'atterrissage et $\langle y \rangle$ la partie positive de y . L'appendice 3 fournit des précisions sur la formulation intégrale.

Calcul de la DSWL

1.1.3.14 Au moyen des données relatives aux exigences de la chaussée publiées par le constructeur, calculer l'épaisseur de référence (t), pour la masse donnée de l'aéronef, la valeur E du terrain de fondation et 36 500 passages de l'aéronef. Utiliser la structure de chaussée de référence appropriée du § 1.1.3.8 avec les points d'évaluation décrits au § 1.1.3.12. L'épaisseur de la couche variable (de revêtement) est ajustée jusqu'à ce que l'endommagement calculé au § 1.1.3.13 soit égal à 1,0. L'épaisseur qui en résulte (t) est l'épaisseur de référence pour l'ACR.

1.1.3.15 Au départ de l'épaisseur de référence ci-dessus et du même modèle d'analyse des couches élastiques qu'au § 1.1.3.13, obtenir une charge calculée sur roue simple pour le terrain de fondation sélectionné. En maintenant la pression constante des pneus à 1,50 MPa, 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. Pour l'évaluation des déformations sous la charge sur roue simple, utiliser un point d'évaluation situé au sommet du terrain de fondation, directement sous le centre de la roue.

Calcul modifié de la DSWL pour les aéronefs légers

1.1.3.16 Pour certains aéronefs légers, l'épaisseur de référence (t) requise est inférieure à l'épaisseur minimale admissible. Utiliser les étapes modifiées suivantes pour calculer la DSWL uniquement lorsque l'épaisseur théorique du revêtement variable, dont l'endommagement est égal à 1,0 pour 36 500 passages d'aéronef, est inférieure à 25,4 mm :

- a) déterminer la valeur de la déformation verticale maximale au sommet de la couche de fondation correspondant à l'épaisseur variable minimale admissible de la couche de conception (25,4 mm) ;
- b) calculer la DSWL pour le terrain de fondation sélectionné en utilisant l'épaisseur minimale de la structure de référence. En maintenant la pression constante des pneus à 1,50 MPa, la valeur de la charge sur roue simple est ajustée jusqu'à ce que la déformation verticale maximale au sommet du terrain de fondation soit égale à la valeur déterminée au point a) ci-dessus.

Calcul de l'ACR

1.1.3.17 La cote de classification de l'aéronef, pour la masse et la catégorie de terrain de fondation choisies, est égale à deux fois la charge calculée sur roue simple en centaines de kilogrammes. La valeur numérique de l'ACR peut être arrondie au multiple de dix le plus proche pour la publication.

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

1.1.3.18 Les pneus sont normalement gonflés à la pression qui correspond à la masse totale maximale de l'aéronef sans poussée du moteur, et cette pression est maintenue quelle que soit la variation qui intervient dans les masses au décollage. Cependant, il arrive parfois que l'exploitation avec des masses réduites, un CG modifié et/ou des pressions de pneus réduites soit profitable et il faut alors calculer des ACR réduites. Pour calculer l'ACR dans ces conditions, la pression de gonflage ajustée des pneus devrait être saisie dans le champ de saisie correspondant de l'ICAO-ACR.

1.1.3.19 Voici des exemples de ces calculs :

Exemple 1 : Trouver l'ACR d'un B747-400 à 397 800 kg sur une chaussée rigide reposant sur un terrain de fondation de résistance moyenne. La pression des pneus sur les roues principales est de 1,38 MPa. D'après les données du constructeur, on sait que, au CG arrière pour la masse maximale sur l'aire de trafic, 93,33 % de la masse de l'aéronef se trouve sur le train principal.

Solution : On trouve l'ACR en suivant les étapes décrites au § 1.1.3.6. Ces étapes sont automatiquement mises en œuvre dans le programme ICAO-ACR mentionné au § 1.1.3.4.

Étape 1. Utiliser les caractéristiques du train principal et la structure de chaussée rigide standard pour déterminer l'épaisseur ACR de référence t . Calculer l'ACR d'un bogie à quatre roues du train principal à 16 roues du B747-400. Tous les bogies du train principal du B747-400 ont la même charge, la même pression des pneus et la même configuration de roue ; par conséquent, le choix du seul bogie à utiliser pour l'évaluation est arbitraire. Le programme LEAF décrit au § 1.1.3.4 a été utilisé pour déterminer les contraintes aux points d'évaluation au fond de la couche de béton sous chacune des quatre roues d'un bogie. Les données d'entrée du LEAF pour l'aéronef B747-400 sont présentées dans la figure 1-7. Dans la figure 1-7, la force agissant sur le seul bogie, 910,22 kN, correspond à la masse totale de l'aéronef multipliée par 93,33 %, divisée par quatre. D'après cette analyse, pour la charge et la géométrie du train données, une épaisseur de béton de 381 mm produit une contrainte horizontale maximale du béton de 2,75 MPa. En raison de la symétrie, la contrainte horizontale maximale sous les quatre roues est la même. Par conséquent, l'épaisseur de référence (t) est de 381 mm.

Couche n°	Épaisseur (mm)	Module d'élasticité (MPa)	Coefficient de Poisson	Condition d'interface		
1	381,00	27 579,03	0,1500	0,0000		
2	200,00	500,00	0,3500	1,0000		
3	0,00	120,00	0,4000	1,0000		
Aéronef n° 1 B-747-Aile :						
Charge de calcul de l'aéronef :		Sans objet				
Fraction de la charge sur le train principal :		100,0				
Charge du train, kN :		910,22				
Nombre de pneus :		4				
Pneu n°	Rayon (mm)	Surface de contrôle (mm ²)	Pression de contrôle (MPa)	Charge du pneu (kiloNewtons)	Coordonnée X (mm)	Coordonnée Y (mm)
1	229	165 021	1,38	227,56	-559	0
2	229	165 021	1,38	227,56	-559	0
3	229	165 021	1,38	227,56	-559	1 473
4	229	165 021	1,38	227,56	-559	1 473

Figure 1-7. Données d'entrée pour l'aéronef d'évaluation B747-400 dans le programme LEAF dans l'exemple 1 de l'ACR

Étape 2. Déterminer la charge calculée sur roue simple correspondant à l'épaisseur ACR de référence t . Utiliser la même structure élastique en couches que dans l'étape 1 avec une épaisseur de la couche 1 égale à 381 mm. Appliquer une charge sur roue simple avec une pression de pneu constante P_s égale à 1,50 MPa. Faire varier la valeur de la charge calculée sur roue simple jusqu'à ce que la contrainte horizontale calculée en un seul point d'évaluation situé au fond de la couche de béton soit de 2,75 MPa. La figure 1-8 montre le résultat du programme LEAF pour ce cas. D'après la figure 1-8, la charge du pneu produisant la contrainte standard $\sigma = 2,75$ MPa à la pression standard du pneu = 1,50 MPa est de 336,17 kN, ce qui correspond à une charge sur roue simple de 34 280 kg.

Étape 3. La valeur numérique de l'ACR est égale à deux fois la charge sur roue simple en kg déterminée à l'étape 2, divisée par 100. Par conséquent, l'ACR sur un terrain de fondation de résistance moyenne (« B ») est de $2 \times 343 = 686$. L'ACR sur la catégorie « B » de terrain de fondation sera notée 690.

Couche n°	Épaisseur (mm)	Module d'élasticité (MPa)	Coefficient de Poisson	Condition d'interface				
1	381,00	27 579,03	0,1500	0,0000				
2	200,00	500,00	0,3500	1,0000				
3	0,00	120,00	0,4000	1,0000				
Aéronef n° 1 SWL-ACR :								
Charge de calcul de l'aéronef :			Sans objet					
Fraction de la charge sur le train principal :			100,0					
Charge du train (kN) :			336,17					
Nombre de pneus :			1					
Pneu n°	Rayon (mm)	Surface de contrôle (mm ²)	Pression de contrôle (MPa)	Charge du pneu (kiloNewtons)	Coordonnée X (mm)	Coordonnée Y (mm)		
1	267	224 114	1,50	336,17	0	0		
Point d'évaluation = 1		Couche n° = 1		Profondeur Z = 380,9900				
Coordonnée X = 0,000		Coordonnée Y = 0,000						
DÉF. VERT.		DÉF. HOR. Y		DÉF. HOR. X		CISAILLE- MENT XZ	CISAILLE- MENT YZ	CISAILLE- MENT XY
Contrainte -5,036809E-002		2,747433E+000		2,747433E+000		0,000000E+000	0,000000E+000	0,000000E+000
Déformation -3,171243E-005		8,495126E-005		8,495126E-005		0,000000E+000	0,000000E+000	0,000000E+000
Déplacement 7,395790E-001		0,000000E+000		0,000000E+000				
PRIN 1		PRIN 2		PRIN 3		CISAILLEMENT MAX	NORMAL OCT	CISAILLEMENT OCT
Contrainte 2,747441E+000		2,747425E+000		-5,036809E-002		1,398904E+000	1,814833E+000	1,318896E+000
Déformation 8,495158E-005		8,495094E-005		-3,171243E-005				

Figure 1-8. Données pour la charge calculée sur roue simple dans le programme LEAF dans l'exemple 1 de l'ACR (les contraintes sont en MPa)

Exemple 2 : Trouver l'ACR d'un B787-9 à 254 692 kg sur une chaussée souple reposant sur un terrain de fondation de faible résistance. La pression des pneus sur les roues principales est de 1,56 MPa. D'après les données du constructeur, on sait que, au CG arrière pour la masse maximale sur l'aire de trafic, 92,46 % de la masse de l'aéronef se trouve sur le train principal.

Solution : On trouve l'ACR en suivant les étapes décrites au § 1.1.3.7. Ces étapes sont automatiquement mises en œuvre dans le programme ICAO-ACR mentionné au § 1.1.3.4.

Étape 1. Utiliser les caractéristiques du train principal et la structure de chaussée souple standard pour un aéronef de plus de deux roues pour déterminer l'épaisseur ACR de référence t . D'après l'ordonnance 5300.7 de la FAA, « Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations », le train principal du B787-9 a la désignation 2D. S'agissant d'un train d'atterrissage simple (la désignation du train ne dépasse pas deux caractères), les points d'évaluation des contraintes pour l'ACR sont basés sur un seul bogie. Utiliser le programme ICAO-ACR pour trouver l'épaisseur de référence $t = 796$ mm pour 36 500 passages de l'aéronef évalué. La structure élastique en couches pour la catégorie de terrain de fondation C (faible résistance) avec des modules attribués conformément au § 1.1.3.10 est la suivante :

Couche	Épaisseur (mm)	E, MPa	ν
Asphalte	127	1 379	0,35
Sous-couche 3	161	769,52	0,35
Sous-couche 2	254	680,85	0,35
Sous-couche 1	254	271,27	0,35
Terrain de fondation	infinie	80	0,35

Étape 2. Déterminer la DSWL correspondant à l'épaisseur ACR de référence t . Utiliser la même structure élastique en couches qu'à l'étape 1. Appliquer une charge sur roue simple avec une pression de pneu constante P_s égale à 1,50 MPa. Faire varier la valeur de la DSWL jusqu'à ce que l'endommagement soit de 1,0 pour 36 500 passages. D'après le programme ICAO-ACR, la valeur calculée de la DSWL est de 37 522,2 kg, ce qui correspond à une déformation verticale maximale au sommet du terrain de fondation de 0,001325. Il est à noter que pour la charge sur roue simple, il n'y a pas d'effet lié aux essieux multiples ; par conséquent, la déformation maximale peut être trouvée directement en substituant 36 500 passages dans l'équation de la loi d'endommagement élémentaire de l'appendice 3, section 1.

Étape 3. La valeur numérique de l'ACR est égale à deux fois la charge sur roue simple en kg déterminée à l'étape 3, divisée par 100. Par conséquent, l'ACR sur un terrain de fondation de faible résistance (« C ») est de $2 \times 375 = 750$. L'ACR sur la catégorie « C » de terrain de fondation sera notée 750.

Exemple 3 : Trouver l'ACR d'un A380-800 à 562 000 kg sur une chaussée souple reposant sur un terrain de fondation de résistance moyenne. La pression des pneus sur les roues principales est de 1,50 MPa. D'après les données du constructeur, on sait qu'au CG arrière pour une masse maximale sur l'aire de trafic, 95,13 % de la masse de l'aéronef repose sur le train principal (57,08 % sur le train de fuselage et 38,05 % sur le train d'aile).

Solution : On trouve l'ACR en suivant les étapes décrites au § 1.1.3.7. Ces étapes sont automatiquement mises en œuvre dans le programme ICAO-ACR mentionné au § 1.1.3.4.

Étape 1. Utiliser les caractéristiques du train principal et la structure de chaussée souple standard pour un aéronef de plus de deux roues pour déterminer l'épaisseur ACR de référence t . D'après l'ordonnance 5300.7 de la FAA, « Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations », le train principal de l'A380-800 a la désignation 2D/3D2. S'agissant d'un train d'atterrissage complexe (la désignation du train dépasse deux caractères), les points d'évaluation des contraintes pour l'ACR sont basés sur l'ensemble du train d'atterrissage. Utiliser le programme ICAO-ACR pour trouver l'épaisseur de référence $t = 616$ mm. La structure élastique en couches pour la catégorie de terrain de fondation B (résistance moyenne) avec des modules attribués conformément au § 1.1.3.10 est la suivante :

Couche	Épaisseur (mm)	E, MPa	ν
Asphalte	127	1 379	0,35
Sous-couche 2	235	698,75	0,35
Sous-couche 1	254	372,29	0,35
Terrain de fondation	infinie	120	0,35

Étape 2. Déterminer la DSWL correspondant à l'épaisseur ACR de référence t . Utiliser la même structure élastique en couches qu'à l'étape 1. Appliquer une charge sur roue simple avec une pression de pneu constante P_s égale à 1,50 MPa. Faire varier la valeur de la DSWL jusqu'à ce que $CDF = 1,0$ pour 36 500 passages. D'après le programme ICAO-ACR, la valeur calculée de la DSWL est de 28 902,4 kg, ce qui correspond à une déformation verticale maximale au sommet du terrain de fondation de 0,001325. Il est à noter que pour la charge sur roue simple, il n'y a pas d'effet lié aux essieux multiples ; par conséquent, la déformation maximale peut être trouvée directement en substituant 36 500 passages dans l'équation de la loi d'endommagement élémentaire de l'appendice 3, section 1.

Étape 3. La valeur numérique de l'ACR est égale à deux fois la charge sur roue simple en kg déterminée à l'étape 3, divisée par 100. Par conséquent, l'ACR sur un terrain de fondation de faible résistance (« B ») est de $2 \times 289 = 578$. L'ACR sur la catégorie « B » de terrain de fondation sera notée 580.

1.1.4 Méthode de détermination des PCR

1.1.4.1 La présente section vise à fournir une procédure type pour la détermination et la publication des PCR, à l'aide du concept de CDF. Les États peuvent élaborer leurs propres méthodes de détermination de la PCR, en respectant les paramètres généraux de la méthode ACR-PCR.

1.1.4.2 Concept de CDF

1.1.4.2.1 Le CDF est la valeur de la durée de vie en fatigue structurelle d'une chaussée qui a été utilisée. Il est exprimé comme le rapport entre les répétitions de charges appliquées et les répétitions de charges admissibles jusqu'à la rupture, ou, pour un aéronef et des départs annuels constants, auquel cas une couverture est une application de la déformation ou contrainte maximale due à la charge sur un point donné de la structure de la chaussée :

$$CDF = \frac{\text{Couvertures appliquées}}{\text{Couvertures jusqu'à la rupture}}$$

Note 1.— Lorsque $CDF = 1$, le terrain de fondation de la chaussée aura utilisé toute sa durée de vie en fatigue.

Note 2.— Lorsque $CDF < 1$, le terrain de fondation de la chaussée conservera une certaine durée de vie, et la valeur de CDF donnera la fraction de la durée de vie utilisée.

Note 3.— Lorsque $CDF > 1$, toute la durée de vie en fatigue sera épuisée, et le terrain de fondation de la chaussée se sera affaissé.

1.1.4.2.2 Dans ces définitions, on entend par rupture la rupture selon les hypothèses et les définitions sur lesquelles se fondent les procédures de conception. Une valeur de CDF supérieure à un ne signifie pas que la chaussée ne supportera plus la circulation, mais qu'elle se sera affaissée selon la définition de la rupture utilisée dans la procédure de conception. Le calcul de l'épaisseur se fonde sur l'hypothèse selon laquelle la rupture se produit lorsque $CDF = 1$.

1.1.4.2.3 Les nombreux types d'aéronefs sont comptabilisés en utilisant la loi de Miner :

$$CDF = CDF_1 + CDF_2 + \dots + CDF_N$$

où CDF_i est le CDF pour chaque aéronef dans le trafic composé et N est le nombre d'aéronefs inclus.

1.1.4.2.4 Comme la PCR concerne la durée de vie structurelle de la chaussée, le CDF est basé sur le mode de rupture de la couche de fondation.

1.1.4.3 Déviation latérale

1.1.4.3.1 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 : 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.

1.1.4.3.2 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).

1.1.4.3.3 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

1.1.4.3.4 La procédure de conception de la FAA suppose que $s = 0,776$ mètre (30,54 pouces), indépendamment du type d'aéronef ou d'élément.

1.1.4.3.5 L'effet de déviation latérale peut être considéré indirectement en calculant un rapport passage/couverture (P/C) à partir de la répartition normale des aéronefs. La fonction de distribution peut également être discrétisée (associée à une grille de calcul) et l'endommagement résultant de la déviation peut être calculé numériquement. Une grille plus resserrée entraîne des temps de calcul plus élevés mais une plus grande précision. On a constaté qu'un espacement de

la grille de 5 cm donne de bons résultats. La discrétisation sur une grille à pas transversal Δy aboutit à la répartition des trajectoires sur nw lignes y_w de la grille, qui sont associées à des pourcentages du trafic P_w .

1.1.4.3.6 L'inclusion de la déviation latérale a pour effet de réduire l'endommagement théorique qui serait causé par le fait que tous les aéronefs parcourent une seule trajectoire, à savoir $D_{déviation} < D_{zéro\ déviation}$. La déviation zéro implique que le nombre de passages est égal au nombre de couvertures ($P/C = 1$).

Calcul de l'endommagement en cas de déviation latérale

1.1.4.3.7 Lorsque la méthode de la grille est utilisée, il est nécessaire d'obtenir l'endommagement total (pour un aéronef) en additionnant les différentes contributions à l'endommagement de chacun des profils nw . Cette étape consiste à additionner les profils d'endommagement $D_{non\ déviation}(y, z)$, compensée par la valeur y_w et pondérée par la probabilité d'occurrence P_w dans la loi de déviation latérale :

$$D_{déviation}(y, z) = \sum_{w=1}^{nw} P_w \times D_{non\ déviation}(y - y_w, z)$$

où nw = nombre total de profils d'endommagement.

Détermination de l'endommagement cumulé pour le trafic composé

1.1.4.3.8 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 :

$$CDF(y_j, z) = \sum_{i=1}^m N_i \times (D_{déviation})_i(y_j, z)$$

où m = nombre total d'aéronefs dans le trafic composé ; i = les différents types d'aéronefs ; et N_i = nombre de passages d'aéronefs.

1.1.4.3.9 La courbe résultante représente la variation du CDF dans la direction transversale (par rapport à l'axe longitudinal).

1.1.4.3.10 Si le rapport P/C est calculé pour chaque aéronef i , une expression équivalente donnant le CDF au décalage latéral j est :

$$CDF(y_j, z) = \sum_{i=1}^m \frac{N_i}{(P/C)_j^i} \times D_i(z)$$

où 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.

1.1.4.4 Publication de la résistance des chaussées

1.1.4.4.1 La PCR est publiée au moyen des codes suivants :

- a) Chaussée rigide = R.
- b) Chaussée souple = F.

Note.— Si la structure réelle de la chaussée est composite ou non standard, inclure une note à cet effet.

1.1.4.4.2 Catégorie de terrain de fondation

1.1.4.4.3 Les catégories de terrain de fondation sont les suivantes :

- a) Résistance élevée : caractérisée par $E = 200$ MPa et représentant toutes les valeurs de E égales ou supérieures à 150 MPa pour les chaussées rigides et les chaussées souples = code A.
- b) Résistance moyenne : caractérisée par $E = 120$ MPa et représentant une gamme de valeurs de E égales ou supérieures à 100 MPa et strictement inférieures à 150 MPa pour les chaussées rigides et les chaussées souples = code B.
- c) Résistance faible : caractérisée par $E = 80$ MPa et représentant une gamme de valeurs de E égales ou supérieures à 60 MPa et strictement inférieures à 100 MPa pour les chaussées rigides et les chaussées souples = code C.
- d) Résistance ultra-faible : caractérisée par $E = 50$ MPa et représentant toutes les valeurs de E strictement inférieures à 60 MPa pour les chaussées rigides et les chaussées souples = code D.

1.1.4.4.4 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 consiste à utiliser les valeurs CBR disponibles et de substituer la relation :

$$E = 1\,500 \times \text{CBR} \text{ (} E \text{ en psi)} \text{ ou } 10 \times \text{CBR} \text{ (} E \text{ en MPa)}$$

1.1.4.4.5 Cette méthode fournit des conceptions compatibles avec la procédure de conception flexible antérieure basée sur le CBR du terrain de fondation, mais d'autres équivalences acceptées peuvent également être utilisées [méthode Shell, méthode APSDS (Airport Pavement Design System Knowledge Base), etc.]. Les valeurs de module du terrain de fondation pour la détermination de la PCR peuvent également être déterminées à partir d'essais de sol directs (par exemple, déflectomètre léger, essai de plaque).

1.1.4.4.6 De même, pour la conception d'une chaussée rigide, le module de la fondation peut être exprimé comme le module de réaction du terrain de fondation k ou comme le module d'élasticité (de Young) E . Cependant, tous les calculs structurels sont effectués au moyen du module d'élasticité E . Si le module de fondation est entré comme une valeur k , il peut être converti en valeur E équivalente au moyen des équations suivantes :

$$E_{SG} = 20,15 \times k^{1,284}$$

où E_{SG} = module d'élasticité (de Young) du terrain de fondation, en livres par pouce carré (psi) ; et K = module de réaction du terrain de fondation, en livres par pouce cube (pci).

1.1.4.4.7 Pour la construction de nouvelles chaussées, la valeur de module du terrain de fondation pour la détermination de la PCR doit être la même que celle utilisée pour le calcul de l'épaisseur de la chaussée.

1.1.4.4.8 Les catégories de pression maximale admissible des pneus sont les suivantes :

- a) Illimitée : pas de limite de pression = code W.
- B) Élevée : pression limitée à 1,75 MPa = code X.
- c) Moyenne : pression limitée à 1,25 MPa = code Y.
- d) Faible : pression limitée à 0,5 MPa = code Z.

1.1.4.4.9 Il existe deux types de méthodes d'évaluation :

- a) Évaluation technique : 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 = code T.
- b) Expérience des aéronefs utilisateurs : représente une connaissance du type et de la masse spécifiques des aéronefs supportés de manière satisfaisante dans le cadre d'une utilisation régulière = code U.

1.1.4.5 Procédure PCR recommandée pour l'évaluation technique (T)

1.1.4.5.1 La procédure PCR recommandée suivante réduit le calcul de l'ACR d'un aéronef. Les étapes ci-dessous peuvent être parcourues pour convertir la composition du trafic d'aéronefs utilisateurs en un aéronef critique équivalent, ou aéronef de référence à la masse totale maximale admissible, qui produira alors un CDF de 1,0 sur la chaussée évaluée. Le calcul de l'ACR suit la procédure ACR décrite au § 1.1.3.

1.1.4.5.2 La procédure PCR prend en compte les caractéristiques réelles de la chaussée au moment de l'évaluation — en considérant la structure de la chaussée existante et le trafic d'aéronefs prévu pour utiliser la chaussée pendant sa durée de vie structurelle théorique (pour la construction de nouvelles chaussées) ou la durée de vie structurelle restante estimée (pour les chaussées en service). La PCR ne doit être valable que pour cette période d'utilisation. En cas de réfection majeure de la chaussée ou de modifications importantes du trafic par rapport au trafic initial, une nouvelle évaluation devrait être effectuée.

1.1.4.5.3 La procédure PCR comprend les étapes suivantes :

- 1) recueillir toutes les données pertinentes sur la chaussée (épaisseur des couches, modules d'élasticité et coefficient de Poisson de toutes les couches, au moyen des projections de trafic aérien) en utilisant les meilleures sources disponibles ;
- 2) définir les différents aéronefs par type, nombre de départs (ou d'opérations conformes aux pratiques de conception de la chaussée) et masse des aéronefs que la chaussée évaluée est censée recevoir au cours de sa durée de vie structurelle restante théorique ou estimée [en fonction de l'aire de manœuvre (piste, voie de circulation, aire de trafic), le trafic peut se voir attribuer une déviation latérale caractérisée par un écart type, comme indiqué au § 1.1.4.2.1] ;
- 3) calculer les ACR de chaque type d'aéronef à sa masse opérationnelle et noter l'aéronef affichant l'ACR maximale (le calcul des ACR doit suivre la procédure indiquée au § 1.1.3) ;

- 4) calculer le CDF maximal des différents types d'aéronefs et noter la valeur (le CDF est calculé au moyen de n'importe quel modèle d'endommagement/de rupture conforme à la procédure utilisée pour la conception de la chaussée) ;
- 5) sélectionner l'aéronef dont la contribution au CDF maximal est la plus élevée comme aéronef critique. Cet appareil est désigné par AC(i), où i est une valeur d'indice avec une valeur initiale de 1. Supprimer tous les aéronefs autres que l'aéronef critique actuel AC(i) de la liste de trafic ;
- 6) ajuster le nombre de départs de l'aéronef critique jusqu'à ce que le CDF maximal de l'aéronef soit égal à la valeur notée à l'étape 4. Noter le nombre équivalent de départs de l'aéronef critique ;
- 7) ajuster la masse de l'aéronef critique pour obtenir un CDF maximal de 1,0 pour le nombre de départs obtenu à l'étape 6. Il s'agit de la masse totale maximale admissible pour l'aéronef critique ;
- 8) calculer l'ACR de l'aéronef critique à sa masse totale maximale admissible. La valeur obtenue est désignée par PCR(i) (les calculs de l'ACR doivent suivre la procédure décrite au § 1.1.3) ;
- 9) si AC(i) est l'aéronef affichant l'ACR maximale de l'étape 3) ci-dessus, alors passer à l'étape 13 ;
- 10) supprimer l'actuel aéronef critique AC(i) de la liste de trafic et réintroduire les autres aéronefs qui n'étaient pas considérés auparavant comme aéronefs critiques. La nouvelle liste d'aéronefs, qui ne contient aucun des aéronefs critiques précédents, est appelée la liste d'aéronefs réduite. Augmenter la valeur d'indice ($i = i+1$) ;
- 11) calculer le CDF maximal de la liste d'aéronefs réduite et sélectionner le nouvel aéronef critique AC(i) ;
- 12) répéter les étapes 5 à 9 pour AC(i). À l'étape 6, utiliser le même CDF maximal que celui calculé pour la composition initiale d'aéronefs pour calculer le nombre équivalent de départs pour la liste réduite ;
- 13) la PCR à reporter est la valeur maximale de toutes les PCR(i) calculées. L'aéronef critique est l'aéronef associé à cette valeur maximale de PCR(i).

1.1.4.5.4 Un tableau schématique de la procédure ci-dessus est présenté à la figure 1-9. L'objectif des étapes 10 à 13 est de prendre en compte certains cas caractérisés par un grand nombre de départs d'un avion court/moyen-courrier (tel que le B737) et un nombre relativement faible de départs d'un avion long-courrier (p. ex. l'A350). Sans ces étapes, les aéronefs de plus faible tonnage seraient généralement définis comme critiques, avec pour conséquence que la PCR imposerait des restrictions de masse opérationnelle déraisonnables sur les aéronefs de plus gros tonnage (déraisonnables car le trafic de référence inclut déjà les aéronefs de gros tonnage). Il convient de noter que si l'aéronef critique initial est également l'aéronef de la liste affichant l'ACR maximale à la masse opérationnelle, la procédure est alors achevée en une seule itération, sans réduction ultérieure de la liste de trafic.

1.1.4.5.5 La procédure ci-dessus renvoie une valeur numérique de PCR déterminée de manière unique sur la base de l'aéronef critique défini.

1.1.4.6 Application

1.1.4.6.1 L'évaluation technique devrait être utilisée lorsque les caractéristiques de la chaussée et les différents types d'aéronefs sont connus et établis de manière cohérente.

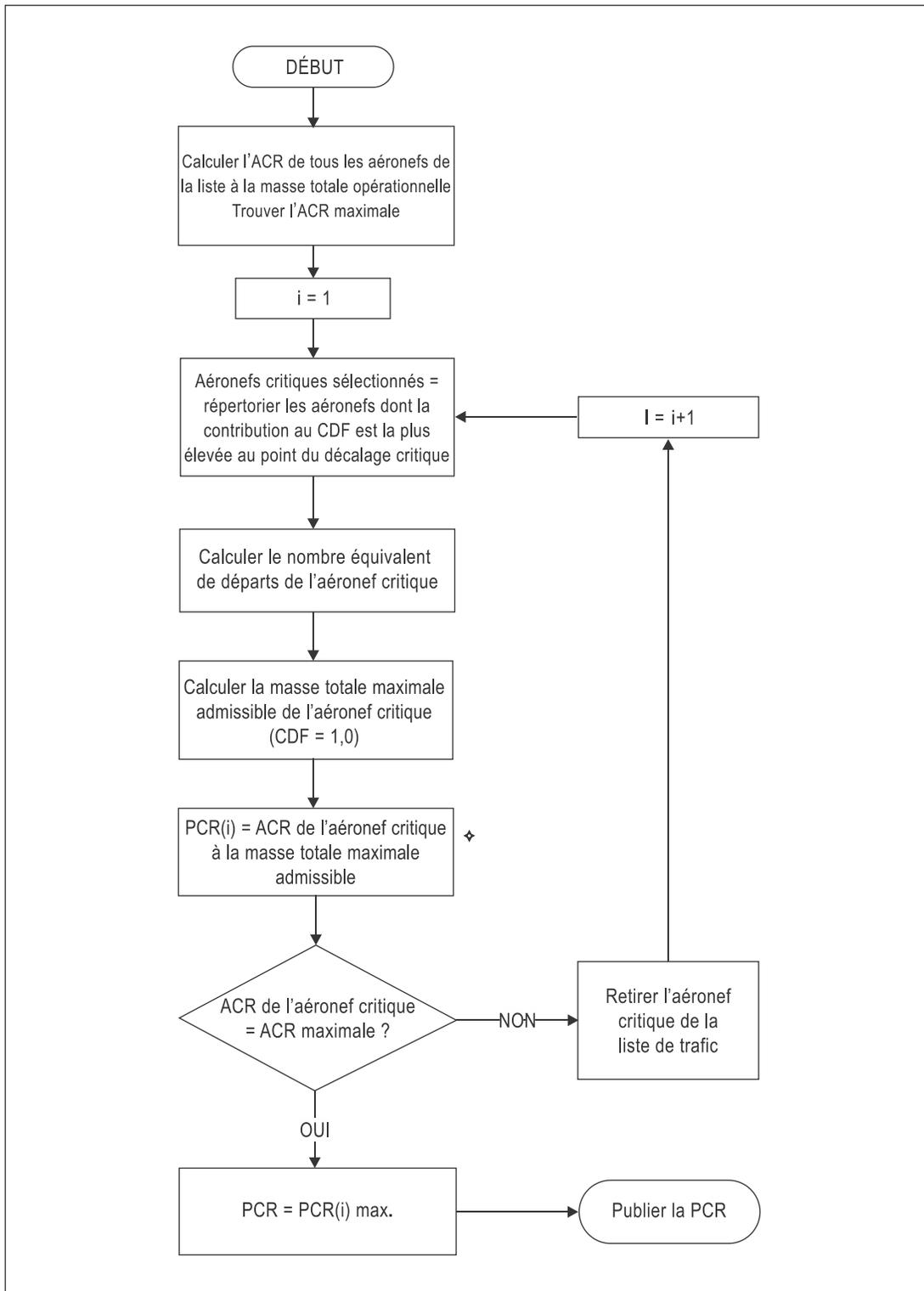


Figure 1-9. Tableau schématique de la procédure recommandée de calcul de la PCR

1.1.4.6.2 La procédure PCR n'impose pas l'utilisation d'un modèle privilégié de rupture/d'endommagement du terrain de fondation ou d'une méthode pour traiter la charge sur essieux multiples. Les États peuvent par conséquent utiliser leurs méthodes existantes de conception et d'évaluation des chaussées. L'utilisation des paramètres initiaux de conception de la chaussée assurera la cohérence entre ce que la chaussée réelle est capable de supporter et l'attribution de la PCR.

Procédure PCR — Expérience des aéronefs utilisateurs (U)

1.1.4.6.3 Chaque fois que cela est possible, la résistance de la chaussée devrait être publiée en se fondant sur une « évaluation technique ». Lorsque, pour des raisons économiques ou autres, aucune évaluation technique n'est possible, l'évaluation peut se fonder sur l'expérience acquise avec les « aéronefs utilisateurs ». Une chaussée supportant de manière satisfaisante les aéronefs qui l'utilisent peut accepter d'autres aéronefs s'ils ne sont pas plus exigeants que les aéronefs utilisateurs. Cette constatation peut servir de base à une évaluation.

1.1.4.6.4 Les techniques d'évaluation des « aéronefs utilisateurs » sont présentées à la section 3.5.

1.1.4.6.5 Exemples détaillés :

Exemple 1 (souple)

Étapes 1 et 2 : Collecte de données :

a) Caractéristiques de la chaussée

La description de la chaussée consiste à fournir pour chaque couche son épaisseur, son module d'élasticité (E) et son coefficient de Poisson (ν). Pour la construction de nouvelles chaussées, les données devraient être celles qui ont servi à la conception de la chaussée.

Pour les chaussées en service, il peut être nécessaire de déterminer ces valeurs d'entrée par des essais non destructifs (carottage, déflectomètre lourd, etc.). En raison de la charge ou des conditions environnementales, les caractéristiques des matériaux de la chaussée peuvent changer au fil du temps. Dans l'exemple suivant, la chaussée a été conçue selon la procédure française de conception des chaussées, au moyen des spécifications françaises des matériaux de la norme NF EN 13 108-1, pour une période d'utilisation de dix ans. Aux fins de la cohérence de la PCR et pour déterminer précisément la contribution individuelle de chaque aéronef de la composition au CDF maximal, les mêmes paramètres que ceux utilisés pour la conception initiale de la chaussée (modèle de rupture du terrain de fondation, traitement des charges sur essieux multiples, etc.) sont également utilisés pour déterminer la PCR. La chaussée évaluée est une piste.

<i>CARACTÉRISTIQUES DE LA CHAUSSÉE</i>				
<i>Couches</i>	<i>Désignation</i>	<i>Module E (MPa)</i>	<i>Coefficient de Poisson</i>	<i>Épaisseur (cm)</i>
Couche de roulement	EB-BBSG3	E=f(θ , fréq.)	0,35	6
Couche de base	EB-GB3	E=f(θ , 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	∞

b) Données sur les différents types d'aéronefs

Pour la construction d'une nouvelle chaussée, la liste des différents types d'aéronefs pour la détermination de la PCR est la même liste que celle utilisée pour la conception de la chaussée.

Pour les chaussées en service, l'analyse PCR prend en compte l'utilisation des aéronefs pendant la durée de vie (structurelle) restante de la chaussée. Si l'on sait que la palette de types d'aéronefs utilisant la chaussée a considérablement évolué par rapport aux prévisions de conception, une liste d'aéronefs actualisée devrait être utilisée. Cet exemple utilise la liste suivante d'aéronefs avec les 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

Note.— 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

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

Le CDF est calculé pour l'ensemble de la flotte en additionnant les contributions au CDF 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. La contribution de chaque aéronef de la composition au CDF maximal est représentée dans la figure 1-10.

Le CDF maximal est supérieur à 1,0, ce qui indique que la chaussée est sous-dimensionnée pour le trafic analysé.

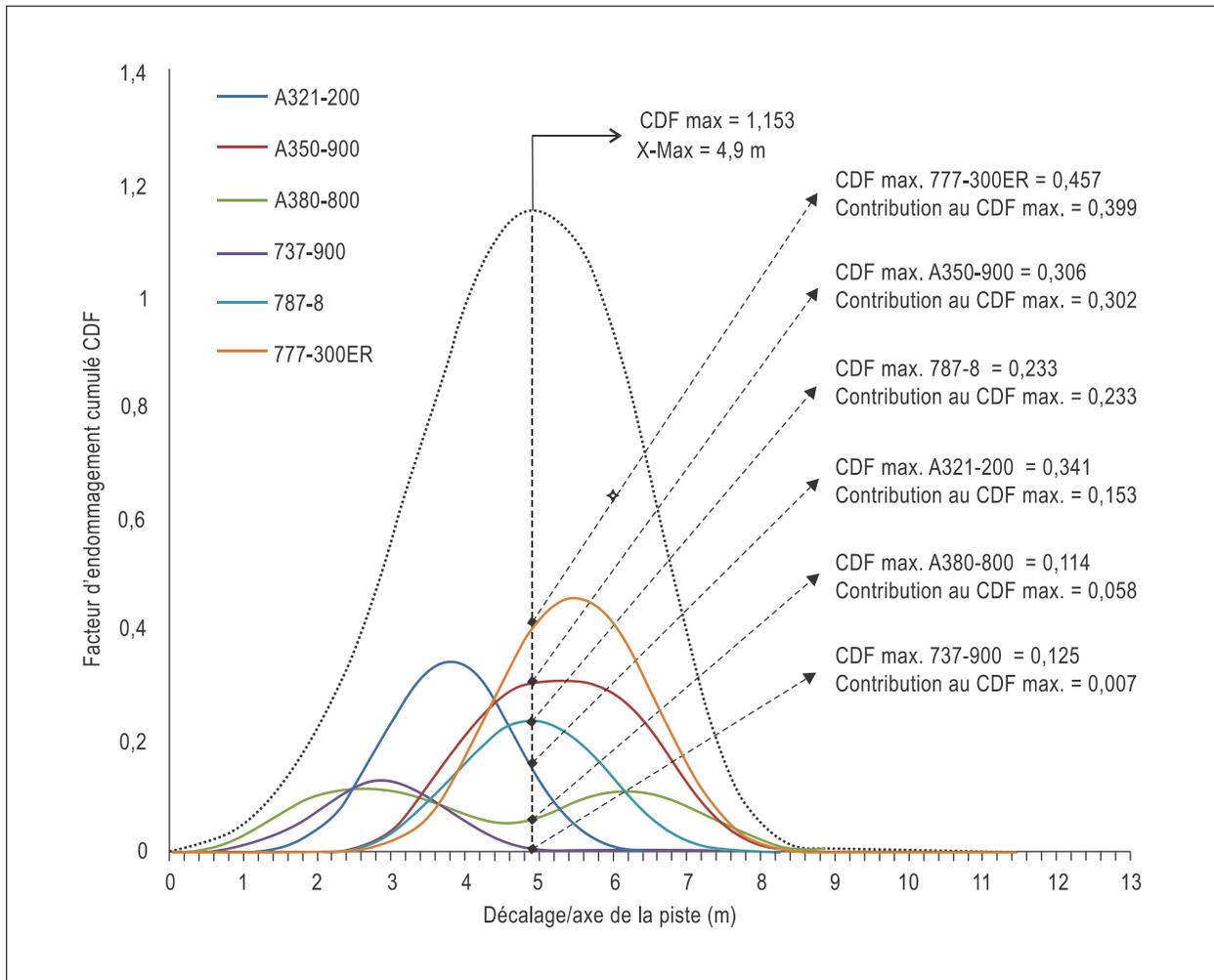


Figure 1-10. CDF de l'aéronef, CDF total et contribution de l'aéronef au CDF maximal

Note.— Il importe d'établir une distinction entre, d'une part, les contributions CDF de chaque aéronef au CDF maximal au point de décalage critique et, d'autre part, l'endommagement maximal imputable à chaque aéronef (qui peut ou non se produire au point de décalage critique). Par exemple, la contribution d'endommagement de l'A321-200 au CDF maximal au point de décalage critique est de 0,153 tandis que son endommagement maximal est égal à 0,341. De même, l'A350-900 produit 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. Cette différence s'explique par les différents axes de passage (distance du train d'atterrissage par rapport à l'axe de la piste) des divers aéronefs.

L'aéronef dont la contribution au CDF est la plus élevée (par rapport au CDF maximal) devient l'aéronef le plus exigeant de l'ensemble. Dans cet exemple, la contribution la plus élevée au CDF maximal (0,399 — voir figure 1-10) est produite par le B777-300ER.

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

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).

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.

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

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 totale maximale admissible :

PCR 740 FCWT.

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 imposées.

Exemple 2 (souple)

Étapes 1 et 2 : Collecte de données :

a) Caractéristiques de la chaussée

Dans cet exemple, une piste souple a été conçue conformément à la procédure de conception des chaussées de la FAA, en utilisant les spécifications des matériaux figurant dans la circulaire AC 150/5370-10 de la FAA des États-Unis. Aux fins de la cohérence de la PCR et pour déterminer précisément la contribution individuelle de chaque type d'aéronef au CDF maximal, la procédure devrait tenir compte des paramètres utilisés pour la conception initiale de la chaussée (modèle de rupture du terrain de fondation, traitement des charges sur essieux multiples, etc.). Ceci est réalisé conformément à la circulaire AC 150/5320-6F de la FAA — Airport Pavement Design and Evaluation.

CARACTÉRISTIQUES DE LA CHAUSSÉE				
Couches	Désignation	Module E (MPa)	Coefficient de Poisson	Épaisseur (cm)
Couche de roulement	Surface HMA P-401/P-403	1 379	0,35	10,2
Couche de base	P-401/P-403 (souple)	2 758	0,35	12,7
Couche de fondation	P-209	467	0,35	17,5
Terrain de fondation		200	0,35	infinie

b) Données sur les différents types d'aéronefs

Dans cet exemple, les données de trafic représentent un aéroport-pivot régional caractérisé par un grand nombre de départs d'avions à réaction moyen-courriers (A320, A321, B737) combiné à un moindre nombre de vols d'avions long-courriers ou de gros tonnage (A330, B777 et A380). La durée de vie théorique est de 20 ans.

COMPOSITION D'AÉRONEFS			
N°	Modèle d'aéronef	Masse maximale au roulage (t)	Départs annuels
1	A330-300	233,9	52
2	B777-300ER	352,4	52
3	A380-800	571	52
4	B737-900ER	85,4	10 950
5	A320-200	77,4	10 950
6	A321-200	93,9	1 560

Note.— Conformément aux normes de conception de la FAA, l'écart type supposé de la déviation des aéronefs est de 0,776 mètre (30,54 pouces).

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

	A321-200	B737-900ER	B777-300ER	A320-200	A330-300	A380-800
Masse opérationnelle (t)	93,9	85,4	352,4	77,4	233,9	571
ACR	460	420	570	360	570	550

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

Le CDF est calculé pour l'ensemble de la flotte en additionnant les contributions au CDF de chaque aéronef le long d'un axe transversal perpendiculaire à l'axe de la piste. Dans cet exemple, le calcul a été effectué à l'aide du programme FAARFIELD 1.42 de la FAA.

La figure 1-11 montre le CDF de chaque aéronef et le CDF total résultant pour la conception. Le CDF maximal est de 0,99, situé à un décalage latéral de 3,7 m de l'axe de la piste. La contribution de chaque type d'aéronef au CDF maximal est représentée dans la figure 1-11. Il est à noter que les valeurs du CDF représentées dans la figure 1-11 sont basées sur les caractéristiques de l'aéronef pour la conception de l'épaisseur, selon lesquelles une part de 95 % de la masse totale de l'aéronef agit sur le train principal. Le CDF maximal est légèrement inférieur à 1,0, ce qui indique que l'épaisseur de la chaussée est correctement calculée pour le trafic analysé. Lorsque les caractéristiques sont ajustées pour refléter les valeurs de masse et de CG qui produisent les charges les plus élevées sur le train principal de chaque aéronef (voir § 1.1.3.2.6), alors le CDF maximal est réduit à 0,898 ; cependant, les contributions relatives des aéronefs sont identiques. Contrairement à l'exemple 1, le CDF maximal est concentré autour des aéronefs à couloir unique, tandis que la contribution des avions long-courriers est moindre, en raison du petit nombre de départs annuels.

Étape 5 : Sur la base de la figure-1-11, le B737-900ER est sélectionné comme l'aéronef qui contribue le plus au CDF maximal. Tous les autres aéronefs sont retirés.

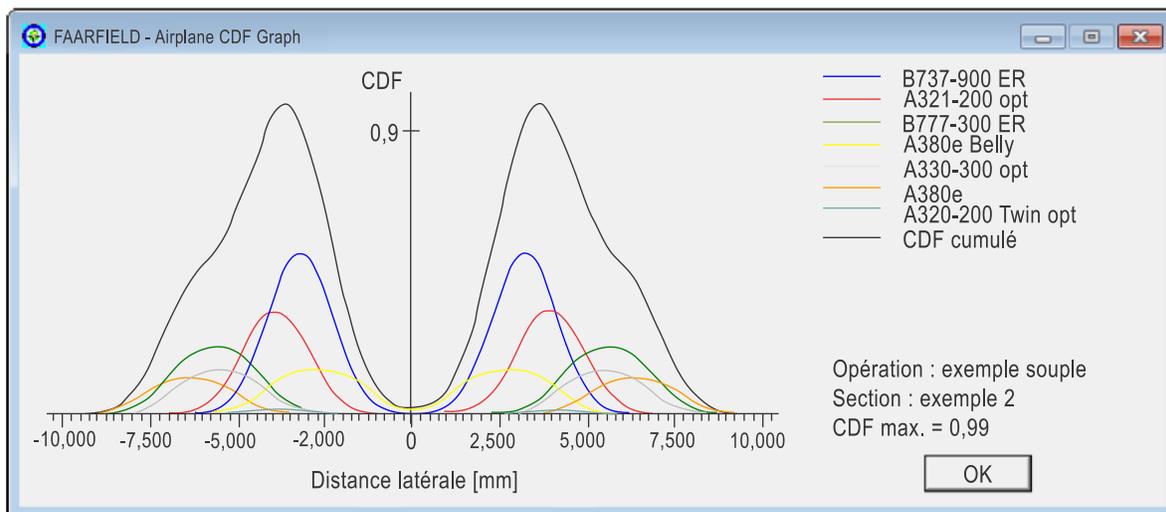


Figure 1-11. CDF de l'aéronef, CDF total et contribution de l'aéronef au CDF maximal

Étape 6 : La contribution du B737-900ER au CDF maximal à son niveau initial de départs annuels est de 0,405. Le programme ajuste le nombre de départs annuels de manière itérative jusqu'à ce que le CDF soit égal à 0,898, soit 21 837 départs annuels équivalents du B737-900ER.

Étape 7 : La masse totale du B737-900ER est ajustée pour obtenir un CDF maximal de 1,0. 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 85,77 t.

Étape 8 : L'ACR du B737-900ER à sa masse totale maximale admissible est 425 FA = PCR1.

Étape 9 : Si l'on compare avec le tableau de l'étape 3, il s'avère que le B737-900ER n'est pas l'aéronef dont l'ACR est maximale. Par conséquent, la procédure passe à l'étape 10.

Étape 10 : Le B737-900ER est supprimé de la liste des aéronefs, et tous les autres aéronefs sont réintroduits.

Étape 11 : Dans les différents types d'aéronefs réduits, l'aéronef qui contribue le plus est l'A321-200, puisque l'emplacement du CDF maximal a été modifié par la suppression du B737-900ER.

Étape 12 : Les étapes 5 à 9 sont répétées jusqu'à ce que l'aéronef qui contribue le plus au CDF au décalage critique soit également l'aéronef dont l'ACR est maximale.

Dans cet exemple, la procédure récursive prend fin au troisième aéronef critique potentiel. Les valeurs PCR_i qui en résultent sont les suivantes :

- a) PCR1 425 FAWT (premier aéronef critique, B737-900ER).
- b) PCR2 465 FAWT (deuxième aéronef critique de la composition réduite d'aéronefs, A321-200).
- c) PCR3 580 FAWT (troisième aéronef critique et aéronef dont l'ACR maximale, B777-300ER).

PCR retenue = maximum (PCR1, PCR2, PCR3) = 580 FAWT.

Comme la PCR rapportée est supérieure à l'ACR de la masse opérationnelle maximale de n'importe quel aéronef des différents types, il n'y a pas de restrictions de masse opérationnelle.

Exemple 3 (rigide)

Étapes 1 et 2 : Collecte de données :

a) Caractéristiques de la chaussée

Dans cet exemple, une voie de circulation rigide est évaluée pour la publication de la PCR. Les propriétés des matériaux sont attribuées aux couches conformément aux spécifications des matériaux figurant dans les circulaires AC 150/5370-10 et AC 150/5320-6F de la FAA. Pour cet exemple, supposer que, d'après les essais en laboratoire, la résistance à la flexion du béton est de 4,5 MPa.

CARACTÉRISTIQUES DE LA CHAUSSÉE				
Couches	Désignation	Module E (MPa)	Coefficient de Poisson	Épaisseur (cm)
Couche de roulement	Béton au ciment Portland P-501	27 579	0,15	45,0
Couche de base	P-401/P-403 (souple)	2 758	0,35	12,5
Couche de fondation	P-209	311	0,35	30,0
Terrain de fondation	P-152	90	0,40	infinie

b) Données sur les différents types d'aéronefs

Le trafic appliqué pour cet exemple est donné dans le tableau ci-dessous. La durée de vie théorique est de 20 ans. Pour ce trafic composé, l'épaisseur standard requise par la FAA (FAARFIELD 1.42) est de 45,6 cm de béton. Par conséquent, l'épaisseur de la chaussée existante est légèrement sous-dimensionnée pour le trafic donné ; en conséquence, des restrictions de masse opérationnelle peuvent être nécessaires pour certains des aéronefs les plus lourds.

ANALYSE DES DIFFÉRENTS TYPES D'AÉRONEFS				
N°	Modèle d'aéronef	Masse maximale au roulage (t)	Pourcentage de poids sur le train principal	Départs annuels
1	B747-8	440,0	94,7	365
2	A350-900	268,9	94,8	5 475
3	B787-8	228,4	91,3	3 650
4	A321-200	93,9	94,6	14 600
5	B737-900	79,2	94,6	10 950
6	EMB-190	48,0	95,0	10 950

Note.— Conformément aux normes de conception de la FAA, l'écart type supposé de la déviation des aéronefs est de 0,776 mètre (30,54 pouces).

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

	B747-8	A350-900	B787-8	A321-200	B737-900	EMB-190
Masse opérationnelle (t)	440,0	268,9	228,4	93,9	79,2	48,0
ACR/R/C	910	920	870	660	550	290

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

Le CDF est calculé pour l'ensemble de la flotte en additionnant les contributions au CDF de chaque aéronef le long d'un axe transversal perpendiculaire à l'axe de la piste. Dans cet exemple, le calcul a été effectué à l'aide du programme FAARFIELD 1.42 de la FAA.

En utilisant les données des aéronefs de l'étape 2, le CDF maximal pour le trafic composé donné est de 1,24, ce qui est supérieur à la valeur cible de conception de 1,0. Le CDF maximal est situé à un décalage latéral de 4,7 m de l'axe de la piste. L'aéronef qui contribue le plus au CDF à ce point de décalage critique est l'A350-900.

Contribution de l'aéronef au CDF au point de décalage critique (4,7 m)	
Aéronef	CDF
B747-8 (Train d'aile)	0,023
B747-8 (Train de fuselage)	0,001
A350-900	0,935
B787-8	0,158
A321-200	0,124
B737-900	0,001
EMB-190	0,000
Total	1,242

Étape 5 : L'A350-900 est sélectionné comme l'aéronef qui contribue le plus au CDF maximal. Tous les autres aéronefs sont retirés.

Étape 6 : La contribution de l'A350-900 au CDF maximal à son niveau initial de départs annuels est de 0,935. Le programme ajuste le nombre de départs annuels de manière itérative jusqu'à ce que le CDF soit égal à 1,24, soit 7 227 départs annuels équivalents de l'A350-900.

Étape 7 : La masse totale de l'A350-900 est ajustée pour obtenir un CDF maximal de 1,0 pour 7 227 départs annuels. La masse totale maximale admissible est de 270,4 t.

Étape 8 : L'ACR de l'A350-900 à sa masse totale maximale admissible est $906/R/C = PCR1$.

Étape 9 : Si l'on compare avec le tableau de l'étape 3, il s'avère que l'A350-900 est également l'aéronef dont l'ACR est maximale. Par conséquent, la procédure passe à l'étape 13 (fin). En arrondissant la valeur numérique de la PCR au multiple de 10 le plus proche, la PCR à rapporter est $910/R/C/W/T$.

Si l'aéroport publie cette PCR, des restrictions mineures de masse opérationnelle seront nécessaires pour l'A350-900. Par ailleurs, l'exploitation de l'A350-900 pourrait être autorisée dans le cadre des dispositions relatives à la surcharge (voir § 2.1.1), car son ACR dépasse la PCR dans une mesure inférieure à la marge de 10 %.

Chapitre 2

ORIENTATIONS RELATIVES À L'EXPLOITATION EN SURCHARGE

2.1 CRITÈRES PROPOSÉS DANS L'ANNEXE 14, VOLUME I, SUPPLÉMENT A

2.1.1 Il peut y avoir surcharge d'une chaussée lorsque la charge appliquée est trop forte, lorsque la fréquence d'utilisation augmente sensiblement, ou lorsque ces deux éventualités se présentent en même temps. Des charges supérieures à la charge définie (par le calcul ou l'évaluation) écourtent la durée de service prévue, alors que des charges plus faibles la prolongent. Les ruptures de chaussée sont rarement dues à un seul excès de charge, mais plutôt à la répétition de charges dépassant la classification de charge pour laquelle la chaussée a été conçue (principe de l'endommagement cumulé). Le comportement d'une chaussée est tel que celle-ci peut supporter un certain nombre d'applications répétées d'une charge définissable pendant sa durée de service théorique. Par conséquent, on peut tolérer l'application occasionnelle d'une faible surcharge, si nécessaire, moyennant seulement une réduction limitée de la durée de service prévue de la chaussée, et une accélération relativement faible du processus de détérioration de la chaussée. Pour les cas où l'importance de la charge et/ou la fréquence d'utilisation ne justifient pas une analyse détaillée, les critères ci-après sont proposés :

- a) pour les chaussées souples et rigides, des mouvements occasionnels d'aéronefs dont l'ACR ne dépasse pas de plus de 10 % la PCR communiquée ne devraient pas avoir un effet néfaste sur la chaussée ;
- b) le nombre annuel de mouvements en surcharge ne devrait pas dépasser environ 5 % du total annuel des mouvements, à l'exclusion des aéronefs légers.

2.1.2 Ces mouvements en surcharge ne devraient pas normalement être autorisés sur des chaussées qui présentent des signes de dégradation ou de rupture. De plus, toute surcharge devrait être évitée pendant les périodes de dégel en profondeur ou lorsque la résistance de la chaussée et de son terrain de fondation peut être affaiblie par l'eau. En cas d'exploitation en surcharge, l'autorité appropriée devrait vérifier périodiquement l'état des chaussées ainsi que les critères d'exploitation en surcharge étant donné que la répétition excessive des surcharges peut abréger fortement la durée de service de la chaussée ou exiger des travaux de réfection de grande envergure.

Analyse technique de la surcharge

2.1.3 Les surcharges supérieures à 10 % peuvent être envisagées au cas par cas lorsqu'elles sont étayées par une analyse technique plus détaillée. Lorsque l'exploitation en surcharge dépasse les tolérances décrites au § 2.1.1, une analyse de la chaussée est nécessaire pour admettre les charges supplémentaires proposées, qui n'étaient pas prévues dans la conception initiale de la chaussée. Dans ces cas, l'analyse de la chaussée doit déterminer comment l'exploitation en surcharge contribue au CDF maximal lorsqu'elle est combinée à la composition réelle d'aéronefs. En effet, l'ACR en tant qu'indicateur relatif, même si elle dépasse la PCR rapportée, ne peut pas prédire comment l'aéronef en surcharge influera sur le comportement structurel de la chaussée et/ou sa durée de vie théorique, car cela dépendra fortement de son décalage par rapport à l'emplacement du CDF maximal produit par les différents types d'aéronefs (décalage critique).

2.1.4 L'analyse de la chaussée consisterait alors à déterminer le nombre d'opérations en surcharge autorisées pour que le CDF de l'ensemble des aéronefs de la composition, y compris l'aéronef en surcharge, reste dans les tolérances admises par l'autorité compétente.

Chapitre 3

ÉVALUATION STRUCTURELLE DES CHAUSSÉES

3.1 GÉNÉRALITÉS

Le présent chapitre contient des éléments indicatifs destinés aux responsables de l'évaluation de la force portante des chaussées et de la publication des résultats obtenus. Les renseignements présentés visent à répondre aux besoins très divers de ces personnes qui peuvent être aussi bien des ingénieurs spécialistes des chaussées que des directeurs d'aéroport dont le personnel ne comprend pas d'experts en la matière.

3.2 ÉLÉMENTS DE L'ÉVALUATION DES CHAUSSÉES

3.2.1 Le comportement d'une chaussée dépend de trois éléments qui doivent être pris en considération lors de l'évaluation : 1) les matériaux naturellement présents sur le site qui, après les opérations de nivellement et de préparation, constituent le terrain de fondation, 2) la structure de la chaussée, qui comprend toutes les couches jusqu'à la surface et 3) la masse et la fréquence des mouvements des aéronefs utilisateurs. Chacun de ces trois éléments doit être pris en compte lors de l'évaluation d'une chaussée.

Terrain de fondation

3.2.2 Le terrain de fondation est la couche qui se trouve immédiatement au-dessous de la structure de la chaussée et qui est préparée lors de la construction pour supporter les charges transmises par la chaussée. La préparation consiste à enlever la végétation, à niveler le terrain ou à lui donner la pente prévue par des opérations de déblai et de remblai et à le compacter de façon à obtenir la densité désirée. La résistance du terrain de fondation est un élément important et elle doit être définie lors de l'évaluation ou de la conception d'une chaussée ou d'une section de chaussée. La résistance du sol, et par conséquent celle du terrain de fondation, dépend dans une très large mesure de l'humidité du sol et doit être évaluée en fonction des conditions prévues au-dessous de la chaussée. Sauf dans certains cas (nappe phréatique très près de la surface, conditions de drainage inhabituelles, chaussée extrêmement poreuse ou crevassée), l'humidité du sol tend à se stabiliser au-dessous des chaussées de grande largeur à une valeur voisine de 90 % de la saturation. Les variations saisonnières (sauf en ce qui concerne la pénétration du gel dans les matériaux gélifs) sont normalement faibles ou nulles et une humidité assez élevée est possible même dans des régions très arides. Étant donné que les matériaux présents peuvent être de type très variable, la résistance du terrain de fondation d'une chaussée peut prendre une valeur quelconque de la plage représentée par les quatre catégories de résistance du terrain de fondation qui sont utilisées dans la méthode ACR-PCR. Voir à ce sujet le chapitre 1 du présent manuel et l'Annexe 14, volume 1, chapitre 2.

Structure de la chaussée

3.2.3 On utilise les termes « rigide » et « souple » pour caractériser les deux principaux types de chaussée. Ces termes caractérisent le comportement de la chaussée lorsqu'elle est soumise à une charge. Le principal élément d'une chaussée rigide est une couche ou dalle de béton Portland ordinaire ou renforcé de différentes façons. Cette dalle est souvent supportée par une couche granuleuse qui contribue à la résistance de la structure à la fois directement et en facilitant l'écoulement de l'eau. Une chaussée rigide réagit aux charges appliquées à sa surface par une déformation très

faible et répartit ces charges sur une zone étendue du terrain de fondation en fléchissant à la façon d'une poutre. La résistance de la chaussée dépend de l'épaisseur et de la résistance de la dalle de béton et des couches présentes entre celle-ci et le terrain de fondation. La chaussée doit permettre de répartir les charges superficielles de sorte que la pression sur le terrain de fondation n'excède pas la résistance de celui-ci. Une chaussée souple consiste en une série de couches de résistance croissante, depuis le terrain de fondation jusqu'à la couche de roulement. On rencontre couramment la série suivante : matériau sélectionné, couche de fondation inférieure, couche de fondation, couche de base et couche d'usure. Toutefois, les couches inférieures ne sont pas présentes dans toutes les chaussées. La couche d'usure des chaussées destinées aux aéronefs lourds contient généralement un liant bitumineux. Une chaussée souple fléchit davantage sous l'influence d'une charge, ce qui a simplement pour effet de répartir la charge sur une plus large surface et par conséquent de réduire progressivement la pression sur les couches inférieures. Chaque couche, de la surface au terrain de fondation, doit avoir une résistance suffisante pour supporter la pression qui s'exerce à son niveau. L'épaisseur de la chaussée au-dessus de la couche de fondation doit donc être suffisante pour que la pression en surface soit réduite à une valeur acceptable au niveau du terrain de fondation. L'épaisseur de la structure qui se trouve au-dessus de chaque couche doit aussi être suffisante pour que la pression sur cette couche soit réduite à une valeur acceptable. En outre, la couche d'usure doit être suffisamment résistante pour subir sans dégradation la pression des pneus des aéronefs utilisateurs.

Charges dues aux aéronefs

3.2.4 La masse de l'aéronef est transmise à la chaussée par l'intermédiaire du train d'atterrissage. Le nombre des roues, leur espacement, la pression et les dimensions des pneus déterminent la répartition de la charge de l'aéronef sur la chaussée. En général, la chaussée doit être assez résistante pour supporter les charges appliquées par les roues individuelles, non seulement à la surface et sur le terrain de fondation mais aussi aux niveaux intermédiaires. Lorsque les roues sont très rapprochées, comme dans le cas des atterrisseurs à roues jumelées ou à bogies, ou même des jambes adjacentes d'atterrisseurs complexes, les effets des charges appliquées par les roues adjacentes se superposent au niveau du terrain de fondation et aux niveaux intermédiaires. Dans ce cas, la pression réelle est égale à la pression combinée de deux ou plusieurs roues et elle doit être suffisamment atténuée par la structure de la chaussée. Étant donné que celle-ci répartit la charge sur une surface beaucoup plus réduite lorsque la résistance du terrain de fondation est élevée que lorsque cette résistance est faible, l'effet combiné des roues adjacentes est beaucoup moins important pour la chaussée dans le premier cas que dans le second. C'est la raison pour laquelle l'effet relatif de deux types d'aéronef n'est pas le même pour des chaussées dont la résistance calculée est équivalente. La force portante des chaussées doit donc être indiquée en fonction de la catégorie de résistance du terrain de fondation. Pour une catégorie donnée de terrain de fondation, l'effet relatif de deux types d'aéronef sur les chaussées peut être indiqué sans ambiguïté et avec une bonne précision.

Application répétée des charges et composition du trafic

3.2.5 Il ne suffit pas de considérer l'intensité de la charge. Il faut également tenir compte d'un facteur de fatigue ou de répétition des charges. Ainsi, l'intensité et les répétitions doivent être considérées simultanément, et une chaussée qui est conçue pour supporter une charge d'intensité donnée un certain nombre de fois peut supporter une charge supérieure appliquée moins souvent ou une charge inférieure appliquée plus souvent. Il est donc possible d'exprimer l'effet d'un mouvement d'aéronef de masse donnée sous la forme d'un nombre équivalent de mouvements d'un aéronef de masse et de type différents. L'application de ce principe permet de représenter l'effet de l'ensemble des aéronefs qui utilisent la chaussée par une charge unique (arbitraire) et le nombre d'applications de cette charge.

Examen de l'état de la chaussée

3.2.6 Une étude détaillée de l'état de la chaussée constitue un élément important de l'évaluation. La chaussée doit être examinée attentivement en vue de détecter tout signe de dégradation, de déformation ou de modification. Toute modification observable de la chaussée fournit des renseignements sur les effets du trafic ou de l'environnement. Les

effets observables du trafic, lorsqu'ils s'accompagnent d'une évaluation de l'intensité et de la composition de celui-ci, peuvent constituer une excellente base pour définir la force portante de la chaussée.

3.3 ÉLÉMENTS DE LA MÉTHODE ACR-PCR

Cote de classification de chaussée (PCR)

3.3.1 La cote de classification de la chaussée (PCR) est un indice égal à $1/50^e$ de la masse, exprimée en kilogrammes qui, d'après les résultats de l'évaluation, peut être supportée par la chaussée lorsque cette charge est appliquée au moyen d'une roue unique dans des conditions normalisées (pneu gonflé à 1,50 MPa). La PCR établie pour une chaussée signifie que celle-ci est capable de supporter un aéronef dont la cote de classification d'aéronef (ACR) est égale ou inférieure à cette PCR. L'ACR qui est utilisée aux fins de comparaison avec la PCR doit être l'ACR établie pour le type de chaussée et la catégorie de terrain de fondation correspondant à la chaussée étudiée ainsi que pour la masse et les caractéristiques de l'aéronef en cause.

Type de chaussée

3.3.2 Aux fins de publication de la résistance des chaussées, les chaussées sont classées en chaussées rigides et chaussées souples. Les chaussées rigides comportent une dalle en béton, renforcé ou précontraint, avec ou sans couche intermédiaire entre la dalle et le terrain de fondation. Les grandes dalles préfabriquées, dont le placement nécessite une grue, peuvent être classées comme rigides lorsqu'elles sont utilisées dans les chaussées. Les chaussées souples consistent en une série de couches de résistance croissante depuis le terrain de fondation jusqu'à la couche d'usure. Il est plus difficile de classer les chaussées composées formées d'une chaussée souple recouverte d'une dalle de béton Portland, les chaussées souples avec revêtement de béton bitumineux, ou celles qui comportent des couches stabilisées chimiquement (ciment) et en très bon état. Si la partie « rigide » constitue l'élément structural prédominant de la chaussée et si elle n'est pas gravement dégradée par des fissures rapprochées, la chaussée doit être classée comme rigide. Dans les autres cas, elle doit être considérée comme une chaussée souple. Dans les cas douteux, la classification dans la catégorie des chaussées souples constitue généralement une hypothèse prudente. La PCR étant relative aux surfaces revêtues, elle ne devrait pas être considérée comme appropriée pour les surfaces non revêtues (terre compactée, gravier, latérite, corail, etc.), les surfaces construites avec des briques ou des blocs et les surfaces recouvertes de tapis d'atterrissage et de membranes. Si un certain type de PCR est déterminé pour ces types de surfaces, seule la méthode des « aéronefs utilisateurs » devrait être suivie. Dans ce cas, le champ « type de chaussée » devrait indiquer le type de surface réel. Elle peut également être classée comme souple aux fins de la publication ; cependant, ce champ doit comporter une désignation indiquant que la surface n'est pas réellement une surface revêtue [voir la note du § 2.6.6, alinéa a) de l'Annexe 14, volume I]. Si la structure réelle de la chaussée est composite ou non standard, une note devrait être incluse à cet effet.

Catégorie du terrain de fondation

3.3.3 Le problème de la publication de la force portante se trouve compliqué par le fait que les atterrisseurs à roues multiples sont d'autant plus efficaces que la chaussée est construite sur un terrain de fondation plus solide. Pour simplifier la publication et permettre l'utilisation d'indices représentant les cotes de classification des aéronefs et des chaussées (ACR et PCR), la méthode ACR/PCR fait appel à quatre catégories de résistance du terrain de fondation. La résistance est qualifiée d'élevée, de moyenne, faible et ultra-faible, chaque catégorie correspondant à une gamme déterminée de valeurs. Par conséquent, pour qu'un rapport d'évaluation (PCR) soit utile, il faut établir et indiquer la catégorie de résistance du terrain de fondation sur lequel repose la chaussée. Normalement, la résistance du terrain de fondation aura été évaluée lors de la conception initiale de la chaussée ou à l'occasion d'une remise en état ou d'un

renforcement. Si ce renseignement n'est pas disponible, la résistance du terrain de fondation doit être déterminée dans le cadre de l'évaluation de la chaussée. Dans toute la mesure du possible, cette évaluation devrait être fondée sur des essais. Si cela se révèle impossible, une catégorie représentative de la résistance de la chaussée doit être choisie en se fondant sur les caractéristiques du sol, sa classification, l'expérience locale ou le jugement. Normalement, une seule catégorie de terrain de fondation peut s'appliquer à l'ensemble d'un aéroport. Toutefois, lorsque les chaussées sont réparties sur une grande surface et que les caractéristiques du sol diffèrent d'un emplacement à l'autre, il est possible que plusieurs catégories s'appliquent et il faut évidemment en tenir compte dans l'évaluation et la publication des résultats. L'évaluation doit porter sur le terrain de fondation, tel qu'il se présente *in situ* au-dessous de la chaussée. Normalement, l'humidité et la résistance d'un terrain de fondation situé sous une chaussée d'aéroport atteignent et conservent une valeur relativement constante en dépit des variations saisonnières. Toutefois, dans le cas de surfaces très fissurées, d'un revêtement poreux, d'une nappe phréatique proche de la surface ou d'un mauvais écoulement des eaux, la résistance du terrain de fondation peut être nettement réduite au cours des périodes humides. Les surfaces non revêtues sont particulièrement sujettes aux changements d'humidité. Enfin, dans les zones soumises à un gel saisonnier, on peut s'attendre à une réduction de la résistance du terrain de fondation pendant les périodes de dégel lorsque les matériaux utilisés sont sensibles au gel.

Catégorie de pression des pneus

3.3.4 En ce qui concerne la surface elle-même, la pression de contact des pneus est l'élément le plus critique de la charge et ne présente que peu de rapports avec les autres aspects de la résistance de la chaussée. C'est la raison pour laquelle différentes catégories de pression des pneus sont utilisées pour indiquer la pression admissible. Sauf dans de rares cas (joints effrités ou défauts inhabituels de la surface), aucune limite n'est imposée à la pression des pneus sur les chaussées rigides. Toutefois, les chaussées qualifiées de rigides qui possèdent un revêtement souple ou bitumineux doivent être considérées comme des chaussées souples en ce qui concerne la publication de la pression admissible. Les chaussées souples qui sont placées dans la catégorie la plus élevée du point de vue de la pression des pneus doivent être de très bonne qualité et en excellent état, alors que la catégorie la plus basse correspond à celle d'une route soumise à une circulation occasionnelle. Les essais d'enrobés bitumineux et d'échantillons obtenus par carottage en vue d'établir la qualité du revêtement bitumineux peuvent être très utiles pour déterminer la catégorie de pression des pneus, mais aucune relation spécifique n'a été établie entre le comportement lors des essais et la pression acceptable pour les pneus. En général, sauf dans le cas où des limites évidentes s'imposeraient, il suffit d'établir des catégories de pression lorsqu'une chaussée donne des signes de dégradation à la suite de l'utilisation de pneus à haute pression.

Méthode d'évaluation

3.3.5 Chaque fois que cela est possible, la résistance de la chaussée devrait être publiée en se fondant sur une « évaluation technique ». Normalement, la méthode d'évaluation est une inversion de la méthode de calcul. Le calcul d'une chaussée consiste à prendre en compte la charge appliquée par les aéronefs et la résistance du terrain de fondation qui résulte de la préparation du sol et à calculer l'épaisseur et la qualité des matériaux nécessaires pour réaliser la structure de chaussée désirée. L'évaluation procède en sens inverse. Elle consiste à déterminer d'abord la résistance du terrain de fondation existant, à mesurer l'épaisseur et la qualité de chaque élément de la structure de la chaussée et à déterminer le poids des aéronefs que la chaussée peut supporter en appliquant les principes de calcul utilisés pour la conception. Lorsqu'elles sont disponibles, les données d'archives concernant la conception, les essais et la construction du terrain de fondation et des éléments de la structure de la chaussée peuvent souvent être utilisées pour l'évaluation. On peut également pratiquer des excavations dans la chaussée pour déterminer l'épaisseur des couches ainsi que leur résistance et celle du terrain de fondation. L'évaluation technique peut aussi être fondée sur des mesures de la réaction de la chaussée à une charge. La déflexion de la chaussée sous une charge appliquée par l'intermédiaire d'une plaque statique ou d'un pneu peut permettre de prédire son comportement. Il existe aussi différents dispositifs qui sont utilisés pour appliquer des charges dynamiques sur une chaussée [p. ex. les déflectomètres lourds à masse tombante (HFWD), l'adaptation potentielle des déflectomètres de vitesse de circulation (TSD) et d'autres techniques émergentes utilisées sur les chaussées d'aéroport], observer sa réaction et prédire son comportement à partir des résultats obtenus. Lorsque, pour

des raisons économiques ou autres, une évaluation technique n'est pas possible, l'évaluation peut se fonder sur l'expérience acquise avec les « aéronefs utilisateurs ». Une chaussée qui supporte de façon satisfaisante un aéronef utilisant déjà la chaussée peut recevoir d'autres aéronefs moins exigeants. Cette constatation peut servir de base à une évaluation.

Chaussées pour aéronefs légers

3.3.6 Les aéronefs légers sont ceux dont la masse est égale ou inférieure à 5 700 kg. Ces aéronefs sont moins exigeants en matière de chaussée que beaucoup de camions routiers. Il est possible d'effectuer une évaluation technique des chaussées qui leur sont réservées, mais une évaluation fondée sur les aéronefs effectivement utilisés est suffisante. Il convient de noter qu'à certains aéroports, les véhicules de service, notamment les camions d'incendie, les camions-citernes ou les chasse-neige peuvent être plus critiques que les aéronefs. Étant donné que presque tous les aéronefs légers ont des atterrisseurs à roue unique, il n'y a pas lieu de publier la catégorie du terrain de fondation. Par contre, les pneus de certains hélicoptères et aéronefs militaires d'entraînement étant gonflés à des pressions très élevées, il peut être nécessaire d'établir une pression maximale admissible pour les pneus lorsque la chaussée est de mauvaise qualité.

3.4 ESTIMATION DE L'AMPLEUR ET DE LA COMPOSITION DU TRAFIC

Généralités

3.4.1 Les évaluations de la force portante des chaussées devraient viser à établir non seulement une charge admissible, mais également le nombre de fois que cette charge peut être appliquée. Une chaussée qui peut supporter de nombreuses répétitions d'une charge donnée pourra supporter une charge supérieure appliquée moins souvent. Les effets observables du trafic, même ceux qui comportent des mesures minutieuses *in situ* ou des analyses de laboratoire dans des conditions bien précises, ne permettent malheureusement pas (sauf lorsqu'un dommage physique est évident¹) de déterminer la portion de la vie d'une chaussée qui a été consommée ou, inversement, la durée de vie restante. Ainsi, une évaluation visant à déterminer la force portante de la chaussée est une évaluation de la durée de vie totale prévue en fonction du trafic et de la charge. Toute prédiction concernant la durée de vie restante de la chaussée dépendra de la détermination du trafic que celle-ci a supporté depuis sa construction ou reconstruction.

Charges diverses

3.4.2 Normalement, il faudra considérer les diverses charges en fonction du nombre de fois où elles seront appliquées. Il existe une tendance très nette à évaluer la force portante des chaussées en fonction d'une charge de référence et d'un niveau de répétition admissible et à évaluer les diverses charges appliquées à la chaussée en fonction d'un nombre équivalent d'applications de la charge de référence. Pour cela, il faut d'abord établir une relation entre la charge et le nombre de répétitions entraînant une rupture. Ces relations sont établies de diverses façons en combinant la théorie, les méthodes de calcul, les modèles de comportement expérimentaux et les courbes de fatigue obtenues en laboratoire pour l'élément structural principal de la chaussée. Ces relations ne sont pas toutes identiques, mais la précision du paramètre répétitions peut ne pas être toujours efficace, de sorte qu'il n'est pas nécessaire de connaître sa valeur exacte, mais seulement d'établir un ordre de grandeur. La relation entre la charge et les répétitions peut donc présenter d'assez larges variations sans qu'il en résulte des différences sérieuses dans les résultats de l'évaluation.

1. En cas de dommages physiques évidents, la chaussée approche déjà de la fin de sa vie utile.

3.4.3 La courbe qui représente la charge en fonction du nombre de répétitions à la rupture permet de déterminer ce nombre pour chaque charge et de le comparer au nombre correspondant à la charge de référence choisie. À partir de ces comparaisons, on peut calculer le nombre équivalent de répétitions de la charge de référence correspondant à une application unique d'une charge quelconque, c'est-à-dire un facteur supérieur à un lorsque cette charge est supérieure à la charge de référence et inférieur à un dans le cas contraire. Un exemple permettra de mieux comprendre la méthode :

- a) établir la relation entre la charge et le nombre de répétitions à la rupture, comme il est indiqué à la figure 3-1 ;

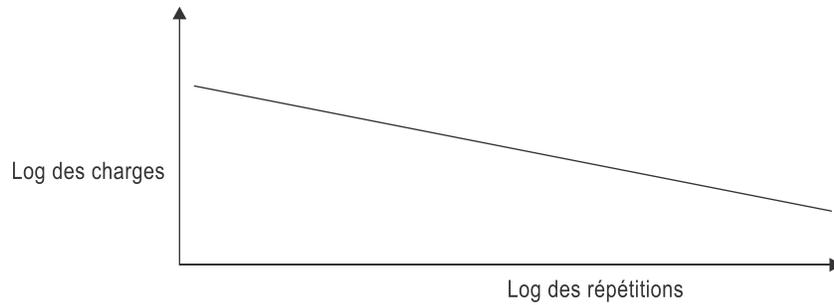


Figure 3-1. Courbe qui représente la charge en fonction du nombre de répétitions à la rupture

- b) $L_4 - r_4$ pour différentes charges L , lire le nombre de répétitions r sur la courbe ;

$$L_1 - r_1$$

$$L_2 - r_2$$

$$L_3 - r_3$$

$$L_4 - r_4$$

- c) choisir L_3 comme charge de référence ;

- d) calculer le facteur d'équivalence des répétitions f pour chaque charge (voir tableau 3-1).

Tableau 3-1. Facteur d'équivalence des répétitions f pour chaque charge

Charge	Facteur d'équivalence des répétitions
L_1	$f_1 = \frac{r_3}{r_1}$ (une valeur inférieure à 1)
L_2	$f_2 = \frac{r_3}{r_2}$ (une valeur inférieure à 1)
L_3	$f_3 = \frac{r_3}{r_3} = 1$
L_4	$f_4 = \frac{r_3}{r_4}$ (une valeur supérieure à 1)

Grâce à ces facteurs, l'effet cumulatif d'une combinaison quelconque de charges prévues ou observées peut être comparé à la force portante évaluée en fonction du nombre de répétitions admissibles pour la charge de référence choisie.

3.5 TECHNIQUES D'ÉVALUATION PAR LA MÉTHODE DES « AÉRONEFS UTILISATEURS »

3.5.1 Une évaluation « technique » devrait être effectuée chaque fois que cela est possible, mais les circonstances ou des contraintes financières peuvent rendre cette évaluation impossible. Étant donné qu'il est extrêmement important de publier des renseignements complets sur la force portante et qu'une évaluation fondée sur les aéronefs qui utilisent la chaussée est relativement simple et facile à comprendre, cette méthode est présentée d'abord dans les paragraphes suivants.

Aéronef le plus lourd utilisant la chaussée

3.5.2 On peut considérer qu'une chaussée qui supporte de façon satisfaisante un trafic donné peut supporter l'aéronef le plus lourd qui l'utilise régulièrement et tout autre aéronef qui n'est pas plus contraignant du point de vue de la résistance des chaussées. Par conséquent, pour évaluer une chaussée en se fondant sur les aéronefs utilisateurs, il faut commencer par déterminer le type et la masse de ces aéronefs, ainsi que le nombre de fois qu'ils utilisent la chaussée au cours d'une période déterminée. Il est particulièrement important de déterminer l'aéronef le plus lourd qui utilise régulièrement la chaussée. Le fait qu'une chaussée puisse supporter très occasionnellement une charge particulièrement lourde ne signifie pas obligatoirement qu'elle peut supporter des charges équivalentes de façon régulière (voir section 3.4).

État et comportement de la chaussée

3.5.3 Il faut ensuite examiner soigneusement l'effet des aéronefs sur la chaussée. Il est particulièrement important de tenir compte de l'état de la chaussée en ce qui concerne la présence éventuelle de fissures, de déformations ou de traces d'usure et de l'expérience relative aux opérations d'entretien nécessaires. L'âge de la chaussée doit également être pris en considération, car les effets d'une surcharge ne sont pas toujours immédiatement apparents sur une chaussée neuve alors que l'accumulation des signes de dégradation peut être normale sur une chaussée ancienne. Cependant, on peut généralement considérer qu'une chaussée en bon état supporte de façon satisfaisante le trafic qu'elle reçoit tandis que les signes de dégradation qui s'aggravent indiquent que la chaussée est surchargée. L'examen de l'état de la chaussée devrait porter notamment sur les différences de comportement entre les zones d'utilisation intense et légère, par exemple dans les zones de passage des roues et à proximité de celles-ci, ou sur les voies de circulation les plus utilisées et les moins utilisées, dans les zones de freinage maximal (p. ex. les embranchements de voies de circulation, etc.). Il faut aussi prendre note du comportement de toutes les zones connues comme critiques ou qui présentent des signes de faiblesse, par exemple les points bas du profil de la chaussée, les points de franchissement d'anciens cours d'eau ou de conduites lorsque le compactage initial a été insuffisant, les sections qui présentent des faiblesses de structure, etc. Ces observations permettront de prédire la vitesse de la détérioration provoquée par le trafic actuel et indiqueront par conséquent si la chaussée est surchargée ou, au contraire, si elle peut recevoir une charge supérieure. Cet examen devrait aussi porter sur les dommages provoqués par la pression des pneus des aéronefs utilisateurs afin d'évaluer la nécessité d'imposer des limites de pression.

Aéronef de référence

3.5.4 L'étude du type et de la masse des aéronefs indiquera les paramètres qui doivent être pris en compte pour caractériser l'aéronef de référence et les résultats de l'examen de l'état de la chaussée permettront de dire si la charge de l'aéronef de référence doit être inférieure à celle qui est appliquée ou si elle peut être un peu plus élevée. Étant donné

que la répartition de la charge sur le terrain de fondation dépend dans une certaine mesure du type de chaussée et de la résistance du terrain de fondation, l'aéronef de référence et sa masse ne peuvent être choisis tant que les éléments de la méthode ACR-PCR dont la publication doit accompagner celle de la PCR n'ont pas été établis (voir § 3.3.2 et 3.3.3).

Détermination du type de chaussée, de la catégorie de résistance du terrain de fondation et de la catégorie de pression des pneus

3.5.5 Il faut d'abord déterminer si l'on a affaire à une chaussée rigide ou à une chaussée souple. Si l'élément structural principal de la chaussée est une dalle de béton Portland, la chaussée doit être considérée comme rigide, même si elle possède un revêtement bitumineux (voir § 3.3.2). En l'absence d'une telle dalle, on considérera qu'il s'agit d'une chaussée souple.

3.5.6 La résistance du terrain de fondation doit être classée dans l'une des catégories suivantes : élevée, moyenne, faible ou ultra-faible. Si l'on possède des données d'essai du module d'élasticité pour le terrain de fondation, celles-ci peuvent être utilisées directement pour choisir la catégorie de terrain de fondation. Toutefois, ces données doivent représenter l'état du terrain de fondation *in situ*. On peut également utiliser des données analogues recueillies pour des structures avoisinantes établies sur un sol de même type et de topographie analogue. Presque toutes les autres formes de données sur la résistance du sol (telles que les données CBR) peuvent être utilisées pour calculer un module d'élasticité E équivalent qui détermine la catégorie du terrain de fondation. Il est parfois possible d'obtenir des renseignements sur la résistance du terrain de fondation auprès des organismes locaux de travaux publics ou de certains organismes agricoles. La résistance du terrain de fondation peut aussi être déterminée directement, quoique de façon assez approximative, à partir de la classification du matériau qui le compose en s'aidant des nombreux tableaux d'équivalences qui ont été publiés (voir figure 3.2 ainsi que § 3.3.3 et 3.2.2). Le § 1.1.4.4.4 donne les équivalences entre le CBR ou le module de réaction k du terrain de fondation et le module d'élasticité E .

3.5.7 En ce qui concerne la pression des pneus, la chaussée doit être classée dans l'une des quatre catégories suivantes : illimitée, élevée, moyenne ou faible. Les surfaces en béton au ciment Portland, de même que les surfaces bitumineuses dont la qualité est considérée comme bonne à excellente peuvent supporter les pressions de pneu courantes et elles devraient être classées dans la catégorie « illimitée », c'est-à-dire sans limite de pression. Les surfaces bitumineuses de qualité inférieure, de même que les surfaces granulaires ou de terre compactée correspondent aux catégories les plus basses (voir § 3.3.4). La catégorie de pression applicable devrait normalement être choisie en fonction de l'expérience acquise avec les aéronefs qui utilisent la chaussée. Ce choix devrait être fondé sur la pression la plus élevée qui est appliquée par les aéronefs sans provoquer de dégradation observable en excluant toutefois les aéronefs qui n'utilisent la chaussée que très rarement.

3.5.8 L'élément le plus important de l'évaluation fondée sur les aéronefs utilisateurs est la détermination de l'aéronef critique et de la PCR pour la publication des résultats. Lorsque le type de chaussée et la catégorie de terrain de fondation ont été déterminés, l'étape suivante consiste à déterminer les ACR des aéronefs utilisateurs. À cette fin, les informations nécessaires peuvent être obtenues par une analyse utilisant les méthodes ACR-PCR prescrites (voir le programme ICAO-ACR). La comparaison entre les aéronefs qui utilisent régulièrement la chaussée (à leur masse opérationnelle), à l'aide du programme mentionné ci-dessus ou des documents des constructeurs, permet de déterminer quel est l'aéronef le plus critique pour la chaussée. Si celle-ci supporte de façon satisfaisante les aéronefs qu'elle reçoit, et si rien n'indique qu'elle pourrait recevoir un aéronef nettement plus lourd, il convient de retenir l'ACR de l'aéronef le plus critique comme mesure de la PCR de la chaussée. Ainsi, tout aéronef dont l'ACR n'est pas plus élevée que cette PCR pourra utiliser la chaussée sans en abrégier la durée de vie à condition que la fréquence d'utilisation (c'est-à-dire le nombre de mouvements par mois) ne dépasse pas celle des aéronefs qui l'utilisent déjà.

3.5.9 Seuls les aéronefs qui utilisent la chaussée de façon continue sans provoquer de dégradation inacceptable devraient être pris en compte pour déterminer l'aéronef critique. La présence occasionnelle d'un aéronef plus exigeant, même si elle ne s'accompagne d'aucune dégradation apparente, n'est pas suffisante pour garantir que la chaussée pourra supporter ce même aéronef de façon continue.

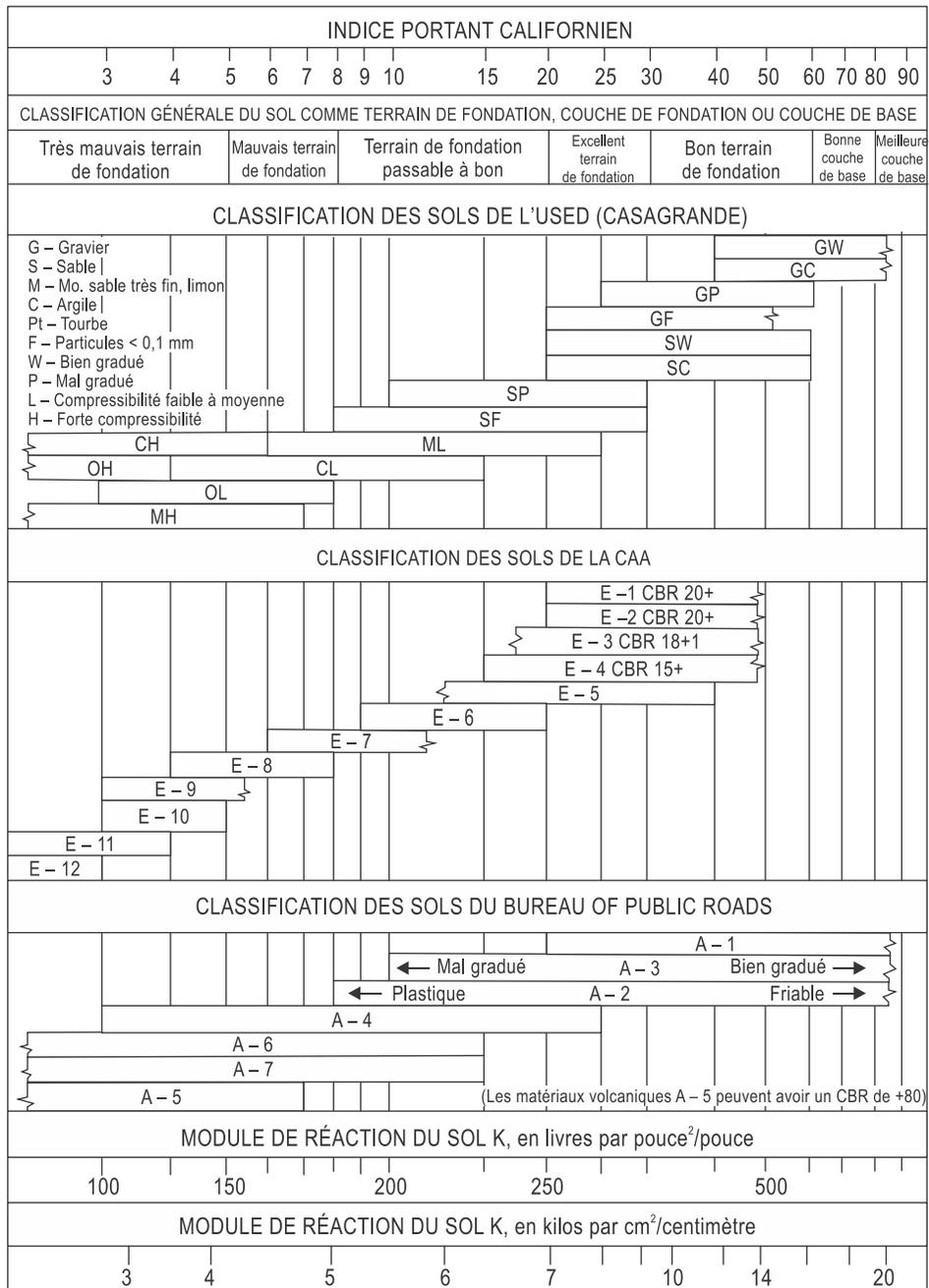


TABLEAU EXTRAIT DE « Design of Concrete Airport Pavement »
 [CALCUL DE CHAUSSÉE D'AÉROPORT EN BÉTON], PORTLAND CEMENT ASSOCIATION.
 N.B. Tous ces rapports sont très approximatifs. Les valeurs réelles de CBR, K, etc.
 ne peuvent être établies que par des essais.

Figure 3-2. Relations entre la classification des sols, l'indice portait californien (CBR) et les valeurs k

3.5.10 Comme on vient de le voir, le choix d'une PCR fondée directement sur la charge appliquée par l'aéronef jugé critique suppose que la fréquence d'utilisation à l'avenir sera semblable à la fréquence observée au moment de l'évaluation. Si l'on prévoit une utilisation nettement accrue (augmentation de la fréquence d'application des charges), la PCR devrait être révisée à la baisse. La section 3.4 indique comment effectuer cette correction en établissant une relation entre l'intensité des charges et leur répétition.

Chaussées pour aéronefs légers

3.5.11 Lorsqu'on évalue les chaussées destinées aux aéronefs légers (5 700 kg et moins), il est inutile de tenir compte de la géométrie du train d'atterrissage ou de la répartition de la charge entre les roues. Il n'est donc pas nécessaire d'indiquer la classe du terrain de fondation et le type de chaussée et il suffit de déterminer et de publier les valeurs maximales admissibles pour la masse de l'aéronef et la pression des pneus. En pareil cas, il convient de suivre les techniques décrites ci-dessus pour l'évaluation fondée sur les aéronefs utilisateurs.

3.5.12 Étant donné que la limite de 5 700 kg qui s'applique aux aéronefs légers représente à peine 2/3 des charges que l'on rencontre généralement sur les routes, l'évaluation de la circulation devrait également porter sur les véhicules terrestres lourds, par exemple les camions de carburant, les véhicules d'incendie, les chasse-neige, les véhicules de service, etc. La circulation de ces véhicules doit également être réglementée en fonction des limites de charge imposées à la chaussée.

3.6 TECHNIQUES ET MATÉRIEL NÉCESSAIRES POUR UNE ÉVALUATION « TECHNIQUE »

L'évaluation technique consiste à définir et à quantifier la force portante d'une chaussée en mesurant et en étudiant ses caractéristiques et son comportement sous l'influence d'une charge. Cela peut se faire soit par inversion de la méthode de calcul, c'est-à-dire en utilisant les mêmes paramètres et les mêmes méthodes, mais en inversant le processus afin de déterminer les charges admissibles en fonction des caractéristiques réelles de la chaussée, soit en déterminant directement par diverses méthodes la réaction de la chaussée à l'application d'une charge.

3.6.1 Principes du comportement des chaussées pouvant servir à leur calcul et à leur évaluation

On désigne souvent sous le nom de méthodes de calcul des chaussées, les principes de comportement à partir desquels ont été élaborées des méthodes analytiques destinées à calculer des chaussées en fonction de conditions topographiques et de conditions de trafic données. Il existe un grand nombre de méthodes de calcul particulières fondées sur divers principes. Par exemple, le chapitre 4 du présent manuel expose plusieurs méthodes de calcul et d'évaluation.

Méthodes anciennes

3.6.1.1 Les premières méthodes de calcul et d'évaluation des chaussées souples étaient fondées sur l'expérience, à laquelle venaient s'ajouter certaines considérations théoriques. Elles faisaient appel à des essais visant à déterminer divers indices afin d'évaluer la résistance du terrain de fondation et, assez souvent, la résistance des couches de base et de fondation ou leur contribution à la résistance totale. Parmi ces essais, on peut citer la mesure de la CBR, l'essai de plaque portante et beaucoup d'autres qui sont largement utilisés en construction routière.

3.6.1.2 Les premières méthodes de calcul et d'évaluation des chaussées rigides utilisaient presque toujours le modèle de Westergaard (plaque élastique sur une fondation de Winkler), mais comportaient différentes additions visant à

tenir compte de la fatigue, du rapport entre la contrainte théorique et la contrainte ultime, la contribution des couches de fondation (ou de base) à la résistance totale, etc. Westergaard a mis au point deux méthodes correspondant à des situations différentes : application de la charge au centre d'une dalle de chaussée (largeur illimitée), et application de cette charge sur un bord de la dalle (dont les dimensions dans les autres directions sont illimitées). La première méthode (application de la charge au centre de la dalle) est la plus utilisée, mais on emploie également la deuxième dans certaines conditions. Dans ce cas, on tient compte du transfert de la charge aux dalles adjacentes, mais les méthodes de calcul sont différentes. Les essais de plaque portante servent à caractériser la résistance du terrain de fondation (et parfois aussi de la couche de fondation) qui constitue un élément essentiel de ces méthodes de calcul. Dans ce cas également, les anciennes méthodes, qui ont subi certaines améliorations, ont servi de méthodes de base pour le calcul des chaussées d'aérodromes avant l'introduction de l'analyse élastique linéaire et de la méthode d'analyse des éléments finis (FEM). La méthode adoptée précédemment pour la détermination du numéro de classification d'aéronef (ACN) est un exemple de ces méthodes.

Nouvelles méthodes faisant appel à des principes plus fondamentaux

3.6.1.3 Des efforts incessants visant à fonder le calcul des chaussées sur des principes plus fondamentaux ont abouti à la mise au point de méthodes basées sur la déformation des matériaux sous l'influence des contraintes et sur des modèles théoriques rationnels. Grâce au progrès de l'informatique, ces méthodes, qui présentaient autrefois des problèmes de calcul insolubles revêtent maintenant un intérêt pratique et les ordinateurs sont utilisés pour des travaux qui n'auraient pu être effectués par d'autres moyens.

3.6.1.4 Le modèle théorique qui est le plus souvent employé dans ces nouvelles méthodes de calcul est le modèle à couches élastiques. On considère que ces couches ont des dimensions horizontales infinies et une épaisseur finie, sauf la couche inférieure (terrain de fondation) qui s'étend également à l'infini vers le bas. La réponse de chaque couche est caractérisée par son module d'élasticité et son coefficient de Poisson. La valeur de ces paramètres peut être déterminée de différentes façons par des essais de laboratoire ou à partir d'essais sur le terrain auxquels on applique des méthodes d'équivalence ou de calcul, ou encore par une simple estimation, lorsque cette valeur n'est pas d'une importance critique. Ces méthodes permettent de calculer les contraintes, les déformations et les déflexions dues aux charges appliquées. Les charges multiples peuvent être considérées comme provenant de la superposition de charges simples. En général, il y a corrélation entre l'importance de la déformation au point critique (au sommet du terrain de fondation, à la verticale de la charge, à la partie inférieure de la couche de surface, etc.) et les performances que l'on attend de la chaussée, qu'il s'agisse du calcul ou de l'évaluation de celle-ci. Ces méthodes sont surtout utilisées pour les chaussées souples, mais on les a appliquées également au calcul des chaussées rigides.

3.6.1.5 Les modèles à couches élastiques sont actuellement très utilisés, mais on sait que la courbe contrainte-déformation des matériaux employés dans la construction des chaussées n'est pas linéaire. La division en couches permet de faire varier le module d'élasticité d'une couche à l'autre, mais non d'un point à l'autre d'une même couche dans le sens horizontal. On a cherché à établir une relation entre le module d'élasticité et la contrainte et à utiliser cette relation dans des modèles de chaussées à éléments finis de façon à établir le module effectif de l'ensemble élément par élément en procédant par itération et à produire ainsi un modèle plus satisfaisant. Dans ce cas également, les déformations sont calculées pour des emplacements critiques et comparées au comportement prévu à l'aide de facteurs d'équivalence. Les modèles à éléments finis sont aussi utilisés pour améliorer les aspects géométriques particuliers aux modèles de chaussées rigides, comme cela a été incorporé dans la procédure de conception des chaussées rigides de la FAA.

Méthodes fondées sur la réaction à une charge directe

3.6.1.6 Les théories appliquées antérieurement au comportement des chaussées ont montré que la déflexion est proportionnelle à la charge, ce qui signifie que la déflexion pourrait être une mesure de la capacité d'une chaussée à supporter les charges. Cela signifie aussi que la déflexion déterminée à la suite de l'application d'une charge pourrait servir à calculer la déflexion produite par une autre charge. Ces constatations servaient de base à l'évaluation des

chaussées. Des vérifications expérimentales et des recherches effectuées sur le terrain ont rapidement mis en évidence les relations étroites qui existent entre le comportement des chaussées d'une part et l'intensité des charges et la déflexion d'autre part, ce qui a conduit à établir des déflexions limites en vue de l'évaluation. Depuis lors, on a procédé à de nombreux essais contrôlés et à des expériences pratiques soigneusement analysées qui ont confirmé cette relation entre la déflexion et la durée de vie prévue de la chaussée exprimée par le nombre d'applications (jusqu'à rupture) de la charge correspondant à cette déflexion. Cependant, bien que cette relation soit très nette, elle ne peut être représentée par une simple courbe. Elle correspond en fait à une bande assez large dans laquelle de nombreux facteurs secondaires semblent intervenir.

3.6.1.7 Cette forte relation établie a servi, et continue de servir de base à l'évaluation des chaussées mais, jusqu'à récemment, elle était principalement utilisée pour les chaussées souples. Des méthodes fondées sur des essais de plaque portante statiques et dynamiques utilisant des plaques dont le diamètre peut atteindre 75 cm pour les essais statiques et est compris entre 30 et 45 cm pour les essais dynamiques au déflectomètre lourd à masse tombante ont été utilisées. La circulaire d'information 150/5320-6 de la FAA — Airport Pavement Design and Evaluation et la circulaire d'information 150/5370-11 de la FAA² — Use of Non-destructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements constituent une source d'orientations sur l'évaluation et les essais non destructifs à l'aide d'une masse tombante.

3.6.1.8 Les déflexions provoquées par l'application d'une charge sur une roue réelle (ou sur un atterrisseur à deux ou quatre roues) servent de base à certaines méthodes rapides qui ressemblent beaucoup aux méthodes utilisant des plaques. L'évaluation des chaussées destinées aux avions légers peut être effectuée par une méthode utilisant la poutre de Benkelman ou par d'autres méthodes employées en construction routière.

3.6.1.9 Diverses raisons expliquent pourquoi l'emploi d'un équipement permettant d'appliquer des charges dynamiques sur les chaussées s'est répandu. Les charges sur plaque statique dont l'intensité est comparable à celle des charges appliquées au moyen de roues ne sont pas faciles à transporter ou à repositionner. Les systèmes dynamiques appliquent une charge pulsée qui reproduit mieux l'impulsion produite par le passage d'une roue. Cependant, le progrès le plus important a été la mise au point de détecteurs qu'il suffit de placer sur la chaussée ou sur la plaque de charge afin de mesurer la déflexion (déplacement vertical). Les déflectomètres lourds à masse tombante appliquent des charges qui dépassent la charge statique et font varier l'intensité de la force en modifiant la hauteur de chute. Les impulsions provoquées sont répétitives, mais le régime n'est pas constant et la fréquence est celle qui est ajustée à l'ensemble dispositif-chaussée. L'application des méthodes dynamiques ressemble beaucoup à celle des méthodes statiques dont il est question au § 3.6.1.7. Elles peuvent également fournir des données sur la relation entre les contraintes et les déformations des matériaux utilisés pour la construction des chaussées, comme nous le verrons plus loin dans cette section.

Données essentielles au calcul des chaussées

3.6.1.10 Les paramètres qui définissent le comportement des éléments (couches) d'une chaussée donnée dans le modèle sur lequel est fondé le calcul comprennent la CBR et les autres indices caractéristiques des anciennes méthodes applicables aux chaussées souples, les résultats d'essais de plaque portante utilisés pour les chaussées rigides et pour certaines chaussées souples, ainsi que les modules de contrainte-déformation qui sont utilisés dans les nouvelles méthodes plus fondamentales.

3.6.1.11 Les essais de CBR visant à déterminer la résistance des terrains de fondation et des autres couches non liées en vue du calcul ou de l'évaluation d'une chaussée devraient être effectués comme il est indiqué dans la méthode utilisée (France, États-Unis et autres pays) mais, en général, on suit la méthode ASTM D1883 ou EN 13286, « Bearing Ratio of Laboratory Compacted Soils for Laboratory Test Determinations ». Normalement, il est préférable, dans toute la mesure du possible, de déterminer la CBR par des essais sur le terrain plutôt que par des essais de laboratoire, et ces essais devraient être effectués conformément aux indications suivantes (extraites de l'US Military Standard 621A).

2. [Circulaires d'information \(AC\) de la série 150 pour les projets d'aéroport \(faa.gov\)](#)

Mesures de la CBR *in situ*

3.6.1.12 a) Ces essais sont utilisés pour la conception dans l'une des conditions suivantes :

- 1) lorsque la densité en place et la teneur en eau sont telles que le degré de saturation (pourcentage des vides remplis d'eau) est de 80 % ou plus ;
- 2) lorsque le matériau est à gros grains et sans cohésion, de sorte qu'il n'est pas affecté par les variations de la teneur en eau ; ou
- 3) lorsque la construction a été achevée plusieurs années auparavant. Dans ce dernier cas, la teneur en eau n'est pas vraiment constante, mais elle varie apparemment dans des limites assez étroites et l'essai sur le terrain est considéré comme un indice satisfaisant de la force portante. Le temps nécessaire à la stabilisation de la teneur en eau ne peut être fixé avec précision, mais il peut être évalué à trois ans environ au minimum.

b) Pénétration :

Niveler la surface à essayer et débarrasser celle-ci de toutes les parties meubles. Suivre la méthode décrite dans la norme ASTM D1883.

c) Nombre d'essais :

Trois mesures devraient être effectuées à chaque niveau essayé dans la couche de base et à la surface du terrain de fondation. Toutefois, si les résultats des trois essais appartenant à un même groupe ne sont pas raisonnablement concordants, des essais supplémentaires doivent être faits au même endroit. On considère que l'accord entre les trois essais est raisonnable si la différence est égale à : 3 lorsque la CBR est inférieure à 10 ; 5 lorsque la CBR est comprise entre 10 et 30 ; 10 lorsque la CBR est comprise entre 30 et 60. Lorsque la CBR est supérieure à 60, les différences entre les résultats individuels ne présentent pas d'importance particulière. Ainsi, des résultats de 6, 8 et 9 sont raisonnables et on peut prendre la valeur 8 comme moyenne ; des résultats de 23, 18 et 20 sont également raisonnables et donnent une moyenne de 20. Si les trois premiers résultats ne sont pas compris dans les limites spécifiques, trois autres essais sont effectués au même endroit et la moyenne arithmétique des six essais donne la valeur de la CBR pour cet emplacement.

d) Teneur en humidité et densité :

Une fois que la CBR est déterminée, on prélève deux échantillons : l'un au point de pénétration afin d'établir la teneur en humidité et l'autre à 10 ou 15 cm du point de pénétration pour déterminer la densité.

3.6.1.13 En ce qui concerne la détermination du module de réaction (k) du terrain de fondation qui est utilisé dans l'évaluation ou le calcul d'une chaussée rigide, les essais de plaque portante doivent être effectués conformément aux procédures spécifiques dans la méthode utilisée. On peut aussi utiliser l'une des normes suivantes : ASTM D1196 « Non-Repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements » ou ASTM D1195 « Repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements ». Ces normes s'appliquent aussi au calcul des chaussées flexibles, comme l'indique leur titre.

3.6.1.14 Des méthodes et des valeurs conventionnelles sont utilisées pour déterminer le module d'élasticité E et le coefficient de Poisson ν qui servent à décrire le comportement structurel de la couche de béton dans l'analyse des chaussées rigides. En général, on considère que ν est égal à 0,15. Le module E devrait être déterminé par des essais effectués sur le béton et sa valeur est normalement comprise entre 25 000 et 30 000 MPa.

3.6.1.15 Le module d'élasticité et le coefficient de Poisson doivent être déterminés pour chaque couche d'un modèle à couches élastiques et diverses méthodes sont disponibles à cette fin. Le coefficient de Poisson n'est pas un paramètre critique et l'on considère généralement que sa valeur varie de 0,3 à 0,33 pour les granulats et de 0,4 à 0,5 pour les matériaux à grains fins ou plastiques. Étant donné qu'il existe différentes façons de déterminer le module d'élasticité et que la relation contrainte-déformation des sols et des granulats n'est pas linéaire (c'est-à-dire qu'il n'y a pas proportionnalité entre ces deux variables), ces différentes méthodes ne donnent pas pour un matériau donné la valeur unique que des considérations théoriques idéales laisseraient prévoir. On trouvera ci-après quelques-uns des moyens servant à déterminer les valeurs du module d'élasticité qui sont utilisées dans les modèles théoriques de comportement des chaussées (par exemple les modèles à couches élastiques).

- a) Les valeurs du module d'élasticité (notamment pour le terrain de fondation, mais aussi pour d'autres couches de la chaussée, à l'exception des matériaux à base de bitume ou de ciment) peuvent être déterminées par corrélation avec les résultats d'essais de résistance de type indice. On utilise très souvent la corrélation suivante avec la CBR : $E = 10 \text{ CBR MPa}$.
- b) Le module représentant la relation contrainte-déformation peut être déterminé par essai direct d'échantillons préparés ou prélevés sur le terrain, mais ceux-ci ne sont presque jamais satisfaisants. Le résultat est trop sensible soit à la préparation, soit aux modifications apportées par l'échantillonnage, pour être représentatif.
- c) On a constaté qu'il était possible de soumettre les échantillons préparés, et dans certains cas les échantillons prélevés sur le terrain, à des charges répétées afin d'obtenir, après un nombre variable de cycles de charge, un module assez représentatif de la courbe contrainte-déformation. Le module d'élasticité ainsi déterminé est appelé module de résilience et il est actuellement très utilisé, sous une forme ou sous une autre, pour l'analyse des couches élastiques. Les essais peuvent prendre la forme d'essais triaxiaux, d'essais de tension indirecte, d'essais de compression en milieu non confiné, etc. L'application des charges peut se faire sous forme d'ondes régulières (sinusoïdales, etc.), mais en général, il s'agit d'impulsions de forme choisie avec un intervalle entre chaque impulsion pour mieux représenter le passage des roues. Il est possible d'obtenir le module de résilience des matériaux bitumineux en utilisant certains de ces essais ou d'autres essais semblables, mais l'influence de la température est extrêmement importante, tant pour la conduite des essais que pour l'application du module aux couches bitumineuses. Le module des différentes couches d'une chaussée est obtenu à partir de ces essais et utilisé directement dans les analyses de systèmes multicouches, mais il se pose souvent des problèmes de validité.
- d) Lorsqu'on effectue des essais dynamiques à l'aide de plaques portantes sur des chaussées existantes, il est possible de mesurer la vitesse de propagation des ondes de contrainte à l'intérieur de la chaussée. Des méthodes ont été mises au point pour calculer le module d'élasticité de chaque couche (à l'exception généralement de la ou des couches supérieures) à partir des vitesses ainsi mesurées. Ces modules sont quelquefois utilisés directement dans l'analyse par couche, mais ils sont déterminés pour des déformations si faibles qu'ils correspondent à des tangentes aux courbes contrainte-déformation non linéaires. En réalité, dans le cas des niveaux de contrainte plus élevés (correspondant aux déformations réelles), les modules devraient être inférieurs. Les modules calculés de cette façon sont utilisés après avoir été corrigés de façon empirique ou suivant une méthode analytique dont la validité a été vérifiée.
- e) Le module du terrain de fondation est le paramètre le plus important ; dans certaines analyses, on le détermine par l'une des méthodes ci-dessus, puis on choisit le module des autres couches soit par estimation directe, soit par un processus numérique simple (en considérant par exemple qu'il est égal au double du module de la couche inférieure ou à la moitié de celui de la couche supérieure) étant donné que sa valeur précise ne présente pas une importance capitale.

- f) Le module de chaque couche à l'exception du terrain de fondation ayant été convenablement choisi ou calculé par une méthode simple, il est possible de calculer le module du terrain de fondation en appliquant la méthode d'analyse des couches élastiques et en tenant compte des déflexions provoquées par les charges sur plaques ou sur roues. Ceci est fait pour certaines analyses.
- g) Une méthode qui suscite actuellement beaucoup d'intérêt consiste à appliquer la théorie des couches élastiques en utilisant les déflexions obtenues lors d'essais de charge dynamique pour des points situés sous le centre d'application de la charge et à différentes positions autour de celui-ci. Il est alors possible, à l'aide d'un ordinateur, de calculer par itération les modules du terrain de fondation et des couches situées au-dessus. Les modules ainsi calculés sont ensuite utilisés dans le modèle multicouche pour calculer les déformations aux points critiques afin de prévoir le comportement de la chaussée.

3.6.1.16 Grâce aux méthodes d'analyse par éléments finis, il est possible d'établir des modèles de chaussée qui tiennent compte non seulement de la présence de diverses couches, mais aussi de la relation non linéaire entre la contrainte et la déformation que l'on observe pour la plupart des matériaux utilisés. Dans ce cas également, le coefficient de Poisson et le module d'élasticité sont importants, mais ils doivent être établis pour chaque couche de la chaussée en fonction de la charge ou des contraintes qui existent en chaque point (élément fini) du modèle. Les équations des modules sont établies à partir d'essais de laboratoire et, le plus souvent, par des essais de charge triaxiale répétés. Ces équations se présentent généralement sous la forme ci-après, mais il existe des variantes.

- a) pour les matériaux granulaires :

$$M_r = E = K_1 \theta^{k_2}$$

ou

$$M_r = E = K_3 \sigma_3^{k_4}$$

- b) pour les sols à grains fins :

$$M_r = E = K_5 \sigma_d^{k_6}$$

où :

M_r	Module de résilience
E	Module d'élasticité
θ	Contrainte brute = $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Principales contraintes
σ_3	Contrainte de confinement sur l'échantillon triaxial
σ_d	Déviateur du tenseur des contraintes = $\sigma_1 - \sigma_3$
$K_1, k_2, K_3, k_4, K_5, k_6$	Constantes établies empiriquement

3.6.2 Évaluation par la méthode de calcul inverse

Le calcul d'une chaussée commence par le choix de la méthode à appliquer. Il faut ensuite déterminer l'épaisseur et les caractéristiques acceptables des matériaux pour chaque couche et pour la surface de roulement en tenant compte du terrain de fondation sur lequel reposera la chaussée ainsi que de la nature et de l'intensité du trafic qu'elle devra supporter. Dans le cas d'une évaluation, le processus doit être inversé puisque la chaussée existe déjà. Les caractéristiques du terrain de fondation, de même que les caractéristiques et l'épaisseur de chaque couche de la structure, y compris la couche de surface, doivent être établies. À partir de ces données, il est possible de déterminer la charge et la fréquence maximales des aéronefs admis sur la chaussée en inversant la méthode de calcul choisie. Il n'est pas nécessaire que la méthode de calcul utilisée pour l'évaluation soit la même que celle qui a servi au calcul de la chaussée. Les paramètres essentiels qui caractérisent le comportement des différents matériaux ou des différentes couches doivent être identiques.

Méthode et éléments de calcul

3.6.2.1 Il faut d'abord choisir la méthode qui servira à l'évaluation. Les éléments de calcul inhérents à la chaussée existante doivent ensuite être évalués selon la méthode retenue.

- a) L'épaisseur de chaque couche doit être déterminée. Cela peut se faire soit en consultant les dossiers de construction, soit en forant des trous ou en creusant des tranchées afin de mesurer directement l'épaisseur des couches.
- b) Il faut ensuite déterminer la résistance et les caractéristiques du terrain de fondation. Dans ce cas, les dossiers de construction peuvent fournir la réponse, soit directement, soit par transposition des renseignements sous une forme adaptée à la méthode de calcul choisie. Dans le cas contraire, des études sur le terrain peuvent être nécessaires. On peut constater à la lecture des § 3.6.1.9 à 3.6.1.14 que le comportement du terrain de fondation est abordé de façon très différente suivant les méthodes de calcul. Il peut être nécessaire de creuser des tranchées pour effectuer des essais de pénétration ou de plaque portante ou pour prélever des échantillons du terrain de fondation aux fins d'analyse en laboratoire. Il est également possible de forer des trous pour l'échantillonnage ou les essais de pénétration. Des essais peuvent aussi être nécessaires pour établir la relation entre une charge dynamique ou statique et la déflexion ou pour mesurer la propagation des ondes. La marche à suivre dépend des particularités de la méthode de calcul choisie pour l'évaluation.
- c) La résistance et les caractéristiques des couches comprises entre le terrain de fondation et la surface doivent aussi être déterminées. Les problèmes à résoudre ressemblent beaucoup à ceux qui se posent avec le terrain de fondation [voir le point b) ci-dessus] et la méthode de calcul retenue doit également servir de guide.
- d) La plupart des méthodes de calcul des chaussées rigides supposent que le module d'élasticité et la contrainte limite de tension par flexion du béton sont connus. Si ces renseignements ne figurent pas dans les dossiers de construction, ils doivent être vérifiés par des essais effectués sur des échantillons prélevés dans la chaussée (voir ASTM C469 pour le module d'élasticité et ASTM C683 pour la résistance à la flexion). Pour les couches de béton armé ou précontraint, la connaissance de ces renseignements dépend des caractéristiques de la méthode de calcul retenue.
- e) Les revêtements bitumineux doivent être caractérisés en fonction de la méthode de calcul retenue de façon à déterminer les limites de pression des pneus qui doivent être éventuellement imposées. Si ces renseignements ne figurent pas dans les dossiers de construction, il faudra procéder à des essais. Des données sur la température des chaussées peuvent être nécessaires pour évaluer la relation entre la contrainte et la déformation ou les effets de la pression des pneus sur la couche bitumineuse.

- f) La façon dont les effets du gel ou du climat de la région sont pris en compte dans la méthode de calcul et leur incidence sur l'évaluation doit être établie.
- g) Le facteur de répétition de charge sur la chaussée constitue un élément important du calcul et le trafic déjà supporté par la chaussée, de même que le trafic prévu, peuvent être des facteurs de l'évaluation. Voir la section 3.4 en ce qui concerne l'évaluation du trafic. Dans le cas de certaines méthodes de calcul, il suffit de considérer que le trafic constaté lors de l'étude représente avec une assez bonne approximation le trafic futur et que la charge limite établie par l'évaluation correspond à cette intensité de trafic. Cette hypothèse traduit la relation établie entre la masse d'un aéronef et son ACR (ou l'inverse) dans la méthode ACR-PCR.

Toutefois, dans beaucoup de méthodes, le choix de la déflexion ou de la déformation limite servant à évaluer la charge limite est fondé sur le nombre de répétitions des charges ou des contraintes.

Lorsqu'on a choisi la méthode de calcul et que l'on a attribué une valeur aux différents éléments, il est possible d'établir la charge ou la masse limite de tout aéronef appelé à utiliser la chaussée.

3.6.3 Évaluation directe ou non destructive

L'évaluation directe consiste à appliquer une charge sur la chaussée, à mesurer la réaction de celle-ci, généralement en observant la déflexion au point d'application de la charge, et parfois en certains points environnants, afin d'établir la forme de la cuvette de déflexion, et finalement à calculer la force portante prévue à partir de ces mesures. Les concepts qui s'appliquent dans ce cas sont examinés aux § 3.6.1.6, 3.6.1.7 et 3.6.1.8.

Méthodes statiques

3.6.3.1 Les méthodes statiques consistent à appliquer une charge à l'aide de plaques ou de roues en des points déterminés et à mesurer la déflexion. L'utilisation de plaques exige la présence d'un massif de réaction contre lequel prend appui le dispositif qui applique la charge. Ces méthodes directes dépendent de la relation entre le comportement de la chaussée et la déflexion provoquée par une charge. Cette relation est du type illustré dans la figure 3-3. Un avertissement peut s'imposer pour éviter une interprétation erronée de ces relations. En effet, elles n'indiquent pas la déflexion constatée après un certain nombre d'applications de la charge, comme on pourrait le croire. La déflexion ne varie pratiquement pas tout au long de la vie d'une chaussée (sauf au cours de la période initiale d'ajustement et avant la dégradation finale). Ces relations indiquent le nombre de fois qu'il est possible d'appliquer la charge correspondant à une déflexion donnée avant qu'il n'y ait rupture de la chaussée. Les relations sont établies en mesurant la déflexion de chaussées dont l'état est satisfaisant et en évaluant le trafic qu'elles ont supporté depuis leur construction. Les méthodes d'évaluation rapide par la mesure de la déflexion qui sont décrites ci-après sont de bons exemples de méthodes statiques.

Méthodes rapides de mesure de la déflexion

3.6.3.2 Des études et des observations faites par de nombreux chercheurs ont montré qu'il existe une relation générale très nette entre la déflexion d'une chaussée sous la charge d'une roue et le nombre d'applications de cette charge qui entraînera une grave détérioration (rupture) de la chaussée (voir figure 3-3). Ces constatations sont à la base d'une méthode simple et rapide pour évaluer la résistance des chaussées. Quelques références d'études et d'observations réalisées au début des années 1970 peuvent encore être trouvées ; mais comme la pratique consistant à mesurer les déflexions sous le train d'atterrissage d'un aéronef réel remorqué sur la chaussée a pratiquement disparu avec l'avènement des deflectomètres à masse tombante dans les essais de chaussée, les références à ces études et observations plus récentes portent généralement sur les équivalences relatives aux méthodes de mesure dynamiques (voir § 3.6.3.8).

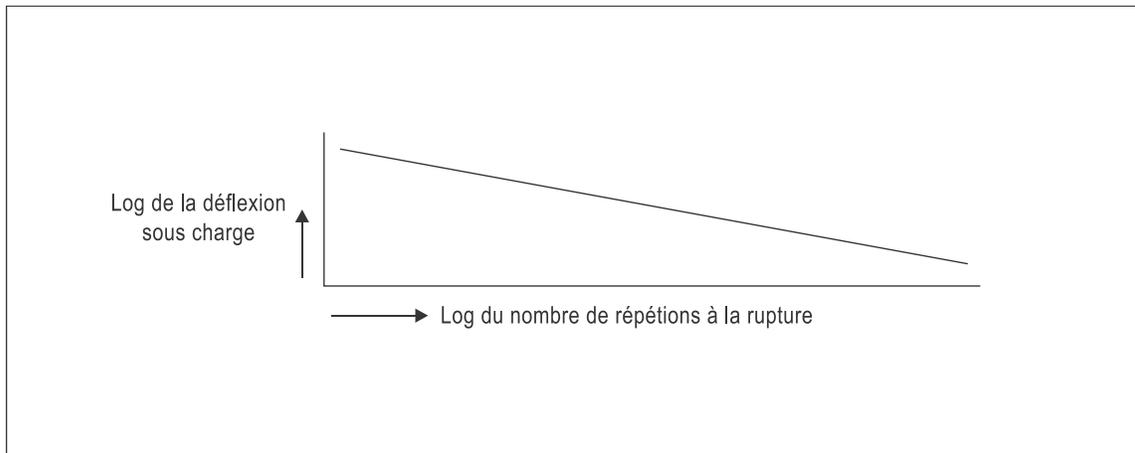


Figure 3-3. Relation entre la déflexion d'une chaussée sous charge et le nombre de répétitions à la rupture

3.6.3.3 L'allure générale de ces relations est très nette, mais la dispersion des points individuels est considérable. Si l'on veut utiliser ces relations pour évaluer rapidement une chaussée, il faut donc choisir entre la solution de prudence consistant à utiliser une courbe limite et le faible niveau de confiance dû à la dispersion des points individuels, ou accepter une solution de compromis. Quoi qu'il en soit, ces relations constituent une méthode d'évaluation simple et relativement peu coûteuse. La procédure à suivre est la suivante :

- a) mesurer la déflexion provoquée par une charge importante appliquée sur une roue en un point critique de la chaussée. Il est possible d'utiliser une seule roue ou un dispositif comportant plusieurs roues. Cette mesure se fait de la façon suivante :
 - 1) placer la roue de l'aéronef en position dans la zone critique ;
 - 2) marquer sur la chaussée les points où les mesures doivent être prises, comme il est indiqué à la figure 3-4 a) ;
 - 3) en utilisant la méthode de la « ligne de visée », procéder à la lecture en chaque point ;
 - 4) déplacer l'aéronef et répéter les lectures ;
 - 5) porter les résultats sous forme de déflexions sur un graphique, comme illustré à la figure 3-4 b) ;
 - 6) tracer une courbe passant par ces points pour obtenir une estimation de la déflexion maximale sous le pneu ;
- b) tracer une courbe représentant la charge en fonction de la déflexion, comme il est indiqué à la figure 3-4 c) ;

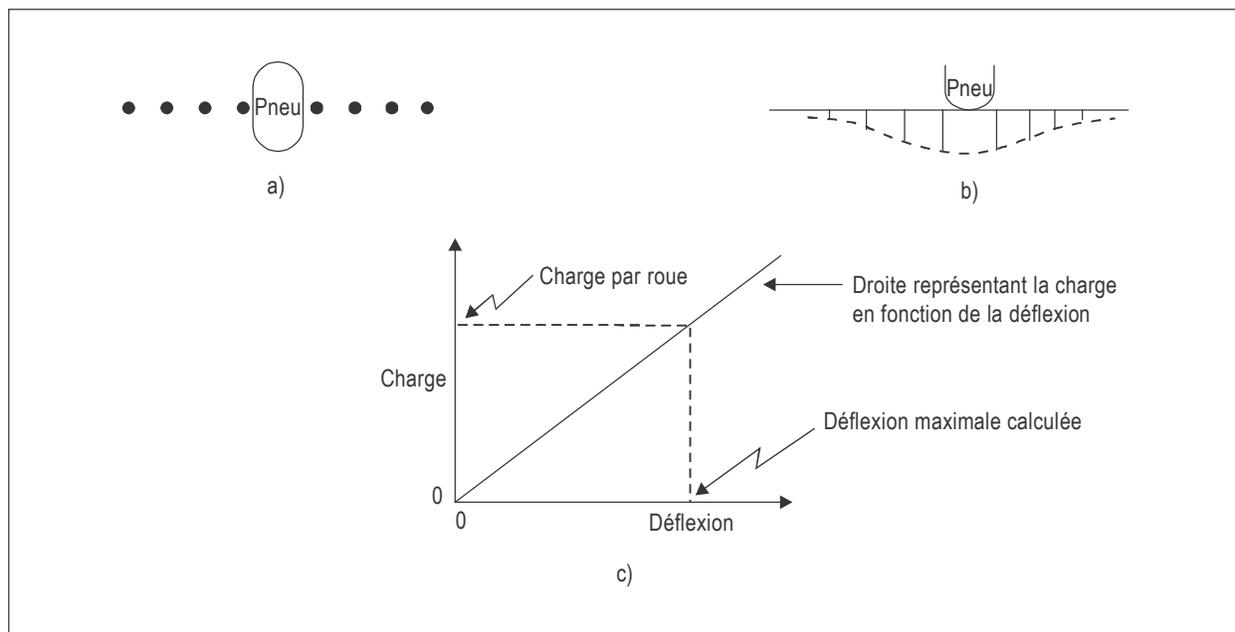


Figure 3-4. Relation entre la charge et la déflexion

- c) combiner la courbe représentant la déflexion en fonction du nombre de répétitions à la rupture avec la courbe ci-dessus afin d'évaluer la force portante de la chaussée vis-à-vis de l'atterrisseur utilisé pour déterminer la déflexion. Pour cela :
- 1) déterminer le nombre d'applications de la charge (ou le nombre d'applications équivalentes, comme il est expliqué en 3.4) que la chaussée doit pouvoir supporter avant rupture ;
 - 2) grâce à une relation du type qui est représenté dans la figure 3-3, déterminer la déflexion correspondant au nombre d'applications entraînant la rupture ;
 - 3) d'après la relation établie entre la charge et la déflexion (voir figure 3-4), déterminer la force portante de la chaussée exprimée par la charge admissible sur la roue utilisée pour les mesures de déflexion ;
- d) appliquer la méthode décrite au chapitre 1 pour trouver la PCR correspondant à la force portante de la chaussée. Les aéronefs dont l'ACR n'est pas supérieure à cette PCR peuvent utiliser la chaussée sans imposer de surcharge à celle-ci. Voir le programme informatique ICAO-ACR pour la détermination de l'ACR des aéronefs en fonction de la masse.

3.6.3.4 Une méthode analogue peut être utilisée en installant un vérin et une plaque de charge sous un point de levage d'aile d'aéronef ou tout autre massif de réaction acceptable. On peut ainsi obtenir un tracé complet de la charge en fonction de la déflexion, et des comparateurs montés sur une longue poutre de référence peuvent être utilisés à la place des méthodes optiques. En ménageant une ouverture d'accès adéquate, il est possible de mesurer la déflexion produite directement au-dessous du centre de la charge. Les résultats peuvent être traités de la même manière que ceux obtenus pour une charge sur roue simple.

3.6.3.5 Les méthodes servant à mesurer la déflexion des routes soumises à des charges (par exemple la méthode de la poutre de Benkelman) peuvent être utilisées pour obtenir un relevé de la déflexion en fonction de la charge. Les

résultats sont traités comme indiqué sur la figure 3-4 pour extrapoler les charges à celles qui sont appliquées par un atterrisseur d'aéronef à roue simple, ce qui permet d'évaluer la force portante de la chaussée pour des charges sur roue simple en utilisant une relation analogue à celle de la figure 3-3. La procédure exposée à la section 1.2 du chapitre 1 permet ensuite de déterminer directement et de publier la masse maximale des aéronefs qui peuvent utiliser une chaussée destinée aux aéronefs légers. Si la pression appliquée par la plaque de charge ou le pneu est anormalement élevée, il peut être nécessaire de procéder à un ajustement entre les caractéristiques de charge unique utilisées dans le calcul présenté à la figure 3-4 [§ 3.6.3.3 a)] et la masse limite admissible publiée pour les aéronefs ou la charge du véhicule critique obtenue par comparaison avec la masse limite. Cet ajustement peut se faire en suivant les procédures de toute méthode particulière de calcul des chaussées. Les limites d'utilisation de la chaussée par des aéronefs plus lourds peuvent être déterminées comme il est indiqué au § 3.6.3.3 d). Il est à noter que la détermination de la relation entre la déflexion et la charge [selon la méthode indiquée dans la figure 3.4 c)] par extrapolation des données obtenues en appliquant de faibles charges sur des chaussées à haute résistance ne donne pas de bons résultats. Malheureusement, les limites de validité de l'extrapolation n'ont pas été établies.

Méthodes dynamiques

3.6.3.6 Ces méthodes font appel à un dispositif de charge dynamique qui est monté sur un véhicule ou une remorque pour en faciliter le transport et que l'on abaisse sur la chaussée à l'endroit choisi. Ces dispositifs comprennent soit des masses animées d'un mouvement rotatif en sens inverse l'une de l'autre, ou d'un mouvement alternatif obtenu à l'aide d'un mécanisme hydraulique, soit des poids (masses) que l'on laisse tomber pour appliquer une série d'impulsions. L'intensité de ces impulsions est constante dans le cas des masses animées d'un mouvement alternatif ou rotatif et décroissante lorsqu'il s'agit de masses qu'on laisse tomber. Dans la plupart des cas, la charge est appliquée par l'intermédiaire d'une plaque, mais certains dispositifs de petite taille utilisent des roues fixes ou des patins. Toutes les méthodes font appel à des instruments à inertie (détecteurs) qui sont placés sur la surface de la chaussée ou sur la plaque de charge afin de mesurer le déplacement vertical (déflexion). La charge dynamique est généralement déterminée à l'aide d'un capteur qui transmet cette charge à la plaque. La relation entre la charge et la déflexion de la chaussée soumise à l'essai est obtenue par comparaison de la charge appliquée et du déplacement observé. Le déplacement est toujours mesuré directement au-dessous de la charge, mais aussi en plusieurs points situés à différentes distances du point d'application. Ainsi la relation entre la charge et la déflexion est déterminée non seulement dans l'axe de la charge (point de déflexion maximale), mais aussi en d'autres points afin de représenter la courbure ou la forme (pente) de la cuvette de déflexion. La gamme des dispositifs utilisés s'étend des appareils très perfectionnés conçus spécialement pour les besoins de la construction routière, qui appliquent des charges inférieures à 1 000 kg, jusqu'aux grosses installations décrites dans la méthode d'essai non destructif de la FAA des États-Unis (voir § 3.6.1.7). Certains des systèmes qui comportent des masses animées d'un mouvement rotatif ou alternatif permettent de faire varier la fréquence de la charge dynamique et certains de ceux qui utilisent la chute d'un poids peuvent appliquer une charge variable.

3.6.3.7 Il est possible de calculer la vitesse de propagation des ondes de contrainte induites par la charge dynamique en mesurant le temps de propagation de ces ondes entre un détecteur et le suivant. Ces mesures de vitesse sont utilisées pour évaluer la résistance ou la relation entre la contrainte et la déformation du terrain de fondation et des différentes couches dans certaines méthodes dynamiques de calcul des chaussées. La vitesse des ondes de cisaillement v est liée au module d'élasticité E par la relation suivante :

$$v = \sqrt{\frac{1}{2(1 + \nu)} \frac{E}{\rho}} \quad (\text{Voir } \textit{Dynamics of Bases and Foundations} \text{ de Barkan})$$

dans laquelle ν représente le coefficient de Poisson qui peut être estimé de façon satisfaisante (voir § 3.6.1.13 et 3.6.1.14) et ρ la masse volumique du terrain de fondation ou de la couche étudiée (couche de fondation ou couche de base) qui peut aussi être estimée avec une précision satisfaisante ou mesurée expérimentalement. Les valeurs du module d'élasticité ainsi établies sont utilisées soit directement, soit après modification, dans des modèles théoriques de calcul ; on peut également les utiliser pour établir la résistance du terrain de fondation et des différentes couches à l'aide

d'équivalences qui donnent la CBR, le module k du terrain de fondation et d'autres indices analogues. Les détecteurs utilisés pour la mesure de la vitesse doivent parfois être situés à une plus grande distance de la charge que ceux qui servent à déterminer la forme de la cuvette de déflexion. En outre, le dispositif dynamique doit être capable de faire varier la fréquence, car les différentes couches d'une chaussée répondent de façon préférentielle à certaines fréquences qui doivent être découvertes. L'énergie dynamique doit ensuite être appliquée à la fréquence voulue pour déterminer la vitesse de propagation des ondes dans chaque couche.

Application des mesures obtenues à l'aide des méthodes dynamiques

3.6.3.8 Les déflectomètres à masse tombante (FWD) et les déflectomètres lourds (HWD) permettent de déterminer les zones d'un système de chaussée dont la réponse à la charge est constante. Les déflectomètres lourds à masse tombante sont rapides à utiliser, relativement économiques et sont devenus largement disponibles. Il est à noter que certains proposent des résultats de type « PCR » ou autre directement à partir des données de déflexion et d'une structure de chaussée nominale ; cependant, la fiabilité de cette pratique est discutable en raison du module sensiblement différent attribué à chaque couche en raison de différences mineures dans les déflexions. Les déflexions mesurées au point d'application de la charge et autour de celui-ci, ainsi que les vitesses de propagation des ondes de contrainte déterminées à l'aide du matériel et des méthodes disponibles sont utilisées de différentes façons pour l'évaluation des chaussées :

- a) Des correspondances directes sont établies entre le rapport charge-déflexion observé lors de l'application d'une charge dynamique et le comportement de la chaussée. Ces correspondances sont établies en soumettant à des essais de charge dynamique des chaussées dont le comportement peut être vérifié.
- b) Des mesures obtenues par les méthodes dynamiques, que ce soit directement ou par extrapolation, peuvent fournir des renseignements utiles pour les essais sur plaque. Ces données peuvent être utilisées — en adoptant des plaques de dimensions convenables ou d'autres conversions — dans différentes méthodes. Elles peuvent être appliquées directement à des terrains de fondation ou à d'autres couches pour lesquelles on dispose d'équivalences afin d'établir les coefficients nécessaires aux analyses de chaussées rigides.
- c) La forme de la cuvette de déflexion qui est déterminée à l'aide de détecteurs placés en différents points de part et d'autre de l'axe de la charge est utilisée dans certaines méthodes pour représenter la rigidité d'ensemble de la structure de la chaussée et déterminer par le fait même la répartition des charges. Toutefois, les tentatives visant à utiliser directement cette caractéristique pour évaluer la force portante des chaussées n'ont pas donné de résultats probants.
- d) La mesure de la déflexion provoquée par une charge dynamique sert à établir le module d'élasticité effectif du terrain de fondation dans les modèles théoriques de chaussée. Les constantes élastiques (module et coefficient de Poisson) des autres couches sont établies à partir d'hypothèses ou d'essais et le module du terrain de fondation est calculé en fonction de la charge, de la déflexion mesurée et du modèle de chaussée en appliquant généralement la théorie des couches élastiques.
- e) Les méthodes les plus récentes utilisent des programmes informatiques fondés sur la théorie des couches élastiques. Ces méthodes tiennent compte de la charge appliquée et des déflexions mesurées en différents points et dans l'axe d'application de la charge. Les méthodes de calcul itératives permettent d'établir les modules élastiques des diverses couches du modèle de chaussée.
- f) Les modèles théoriques qui font appel à des constantes élastiques [comme en d) et e) ci-dessus] servent à calculer les déformations par flexion de la couche superficielle au point d'application de la charge ou la déformation verticale à la partie supérieure du terrain de fondation, sous le point d'application de la charge, ces points étant considérés comme critiques pour les chaussées souples.

Les contraintes ou les déformations en flexion d'une dalle de chaussée rigide peuvent être calculées de façon analogue. Ces résultats sont comparés aux valeurs déduites du comportement de la chaussée grâce aux équivalences établies. Des exemples de ces équivalences sont répertoriés depuis la fin des années 1970 et peuvent être trouvés dans la littérature sur les chaussées des 20 dernières années.

- g) Les mesures de vitesse de l'onde de contrainte permettent d'établir les caractéristiques des diverses couches d'une chaussée sans avoir à prélever d'échantillons. Les modules d'élasticité des différentes couches sont calculés à partir de ces mesures et sont introduits dans les modèles théoriques soit directement, soit après correction afin de mieux représenter les modules correspondant à des déformations plus importantes. La valeur de la CBR est établie à l'aide de facteurs de correspondance entre la CBR et le module d'élasticité corrigé ; on considère généralement que $E = 10 \text{ CBR}$, en MPa. Le module de réaction k du terrain de fondation et d'autres indices analogues peuvent être calculés de la même façon.
-

Chapitre 4

MÉTHODES UTILISÉES PAR LES ÉTATS POUR LE CALCUL ET L'ÉVALUATION DES CHAUSSÉES

Note.— Le présent chapitre sera mis à jour au fur et à mesure que les États mettront à jour leurs orientations concernant l'évaluation des chaussées pendant la période de mise en œuvre du protocole de publication de la résistance des chaussées ACR-PCR.

4.1 OBJET

4.1.1 Les chaussées d'aérodrome sont conçues et construites pour supporter adéquatement les charges imposées par les avions et produire une surface ferme, stable, lisse, utilisable toute l'année, par tous les temps et exempte de débris ou d'autres particules qui peuvent être soufflées ou absorbées par le souffle des hélices ou des réacteurs. Pour répondre à ces exigences, la qualité et l'épaisseur de la chaussée ne doivent pas céder sous les charges imposées. La chaussée doit également posséder une stabilité intrinsèque suffisante pour résister, sans dommage, à l'action abrasive de la circulation, aux conditions météorologiques défavorables et à d'autres facteurs de détérioration. Cela nécessite la coordination de nombreux facteurs de conception, de construction et d'inspection afin d'assurer la meilleure combinaison possible de matériaux et de main-d'œuvre disponibles.

4.1.2 L'objectif du présent chapitre est de présenter les différentes pratiques des États en matière de conception et d'évaluation des chaussées, et de publication de la résistance des chaussées.

4.2 USAGE DE LA FRANCE

4.2.1 Généralités

Tous les documents et toutes les orientations cités dans la présente section sont disponibles sur le site web de la Direction générale de l'aviation civile/Service technique de l'aviation civile (DGAC/STAC) <https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/fr/publications>, ainsi que d'autres informations, documents et logiciels relatifs à la conception des chaussées sur www.stac.aviation-civile.gouv.fr.

4.2.2 Conception des chaussées

4.2.2.1 La communauté internationale des spécialistes des chaussées d'aérodrome s'accorde à dire que les méthodes de calcul de l'épaisseur fondées uniquement sur des considérations empiriques ont montré leurs limites. C'est pourquoi les pratiques en France — comme dans de nombreux autres États — se sont orientées vers des outils plus sophistiqués et plus rationnels que la procédure de calcul CBR pour les chaussées souples et la méthode PCA pour les chaussées rigides (Portland Cement Association).

4.2.2.2 Ces nouveaux outils de conception structurelle comprennent des descriptions précises des couches de la structure de la chaussée en ce qui concerne l'épaisseur, les propriétés des matériaux et les conditions de liaison entre les

couches. Les propriétés mécaniques intrinsèques des matériaux de chaussée sont utilisées pour les enrobés bitumineux et cimentés selon les normes européennes ou françaises. En outre, la variabilité et l'évolution des trains d'atterrissage des aéronefs sont prises en compte dans le processus de calcul des chaussées grâce à une description complète des trains de roues des aéronefs (géométrie, charge, pression des pneus).

4.2.2.3 Ce type de méthodologie est disponible pour les structures de chaussées souples dans les orientations techniques « Méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées aéronautiques souples », associées au logiciel Alizé-Aéronautique Chaussées pour leur application. Ces orientations sont également en cours d'élaboration pour la conception des chaussées rigides et des revêtements. Entre-temps, pendant la période de transition, les procédures CBR et PCA adaptées au contexte français sont toujours utilisées, telles qu'elles sont décrites dans l'Instruction sur le dimensionnement des chaussées d'aérodrome et la détermination des charges admissibles (STBA) et disponibles pour l'application de la méthode actuelle de publication ACN-PCN de l'OACI (<https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/fr/publications/dimensionnement-chaussees>).

4.2.3 Évaluation des chaussées

4.2.3.1 L'évaluation de l'état des chaussées existantes est une tâche nécessaire pour les gestionnaires des chaussées d'aérodrome en vue de définir des programmes de réfection aussi précis que possible. L'autorité de l'aviation civile, la Direction générale de l'aviation civile (DGAC), fournit une méthodologie d'évaluation de l'état de la chaussée des aérodrômes fondée sur des relevés visuels, permettant de déterminer l'indice de service (IS) de la chaussée, allant de 0 (hors service) à 100 (aucun dommage). Deux sous-indices permettent de quantifier l'état de surface ainsi que l'état structurel de la chaussée. Ces indices sont associés à des valeurs seuils définies de manière à fournir aux gestionnaires de chaussées des indications pour envisager une réfection dans les meilleurs délais, dans un avenir proche ou à un stade ultérieur. La méthodologie complète est décrite dans la méthode indice de service (STBA).

4.2.3.2 L'utilisation de déflectomètres lourds (HWD) pour l'évaluation structurelle des chaussées est une tendance encouragée par la DGAC ainsi que par les gestionnaires de chaussées. En effet, cet équipement associé à un outil d'analyse approprié donne une description précise de l'état structurel de la chaussée. Le guide « Auscultation des chaussées souples aéronautiques au HWD » fournit des orientations pour l'évaluation des chaussées souples. Des orientations similaires sont en cours d'élaboration pour les chaussées rigides.

4.2.4 Publication de la résistance des chaussées

Note.— Le présent chapitre sera mis à jour par les États concernés en fonction de la mise en œuvre de l'ACR-PCR.

4.3 USAGE DU ROYAUME-UNI

4.3.1 Conception et évaluation des chaussées

4.3.1.1 Au Royaume-Uni, les chaussées sont conçues en fonction d'une utilisation opérationnelle illimitée par un aéronef donné, compte tenu éventuellement de la charge résultant de l'interaction des atterrisseurs adjacents. Cet aéronef est appelé « aéronef de calcul » pour la chaussée. La classification de la force portante de la chaussée est représentée par le numéro de classification de chaussée de l'avion de calcul qui caractérise le niveau de la charge imposée par ce dernier. Pour tous les autres aéronefs dont le niveau de charge est considéré comme moins contraignant d'après les normes du Royaume-Uni, on peut prévoir une utilisation illimitée de la chaussée, quoique la décision finale relève de l'autorité aéroportuaire.

4.3.1.2 Il existe maintenant un certain nombre de programmes informatiques fondés sur la théorie des plaques, la théorie multicouche élastique et l'analyse par éléments finis, pour ceux qui souhaitent disposer de données sous forme de tableaux pour la conception et l'évaluation des chaussées, mais le système RCC (Reference Construction Classification) a été élaboré à partir des systèmes LCN (Load Classification Number) et LCG (Load Classification Group). Les chaussées sont divisées en deux grandes catégories : les chaussées rigides et les chaussées souples, et elles sont analysées en conséquence.

4.3.1.3 Pour décrire l'effet des aéronefs sur les chaussées rigides, on a adopté un modèle simple à deux couches. On établit l'épaisseur de construction de référence pour un aéronef donné et pour une série de valeurs de la force portante du terrain de fondation comparables aux valeurs utilisées dans la méthode ACN/PCN de l'OACI en appliquant au modèle la théorie de Westergaard (charge au centre de la dalle). On tient compte de l'effet des atterrisseurs adjacents jusqu'à une distance égale à trois fois le rayon de rigidité relative. Cet aspect de la méthode est jugé essentiel dans tout nouveau système étant donné l'augmentation de la masse des aéronefs, la disposition complexe des trains d'atterrissage, et l'interaction possible entre atterrisseurs adjacents, en particulier sur les sols de fondation peu résistants.

4.3.1.4 Pour résoudre les problèmes pratiques de conception et d'évaluation, on a adopté une série de facteurs d'équivalence correspondant aux résistances relatives des matériaux de construction locaux, pour faire la conversion entre l'épaisseur de construction du modèle théorique et l'épaisseur réelle de la chaussée.

4.3.1.5 La distribution de la charge des aéronefs sur les chaussées souples est fondamentalement la même que celle qui a été adoptée pour la conception et l'évaluation des chaussées rigides. Dans le cas présent, on analyse un modèle à quatre couches en utilisant l'indice portant californien (CBR) mis au point par l'United States Corps of Engineers. Cette méthode fait appel aux facteurs de déflexion de Boussinesq et tient compte de l'interaction entre les atterrisseurs adjacents jusqu'à une distance égale à vingt fois le rayon. On résout les problèmes pratiques de conception et d'évaluation en utilisant des facteurs d'équivalence pour passer des matériaux et des épaisseurs effectivement utilisés au modèle théorique qui sert à évaluer l'épaisseur de construction de référence pour différents aéronefs.

4.3.2 Publication de la résistance des chaussées

4.3.2.1 Pour la publication de la résistance des chaussées, le Royaume-Uni suit la méthode ACN/PCN de l'OACI, décrite dans l'Annexe 14, volume I, section 2.6. L'avion critique est défini comme étant celui qui impose la charge qui se rapproche le plus du maximum autorisé sur une piste donnée pour une utilisation opérationnelle illimitée. Les autorités aéroportuaires utilisent les numéros ACN des aéronefs critiques pour décider du numéro PCN à publier pour chaque chaussée.

4.3.2.2 Bien qu'elles ne soient pas indiquées par la méthode ACN/PCN, des restrictions à l'exploitation peuvent être imposées par les autorités aéroportuaires du Royaume-Uni sous forme d'une limite de masse ou d'une réduction du nombre de mouvements permis, lorsque l'interaction des atterrisseurs adjacents influe sur la charge imposée par un aéronef. Il est toutefois peu probable que cette situation se produise avec les aéronefs actuellement en service, sauf lorsque la force portante du terrain de fondation est médiocre.

4.4 USAGE DES ÉTATS-UNIS

4.4.1 Généralités

Tous les documents et toutes les orientations cités dans la présente section et relatifs à la conception et à la construction des chaussées d'aéroport sont disponibles sur le site web de la FAA https://www.faa.gov/airports/engineering/pavement_design et sur le logiciel de conception d'aéroport https://www.faa.gov/airports/engineering/design_software/.

4.4.2 Conception des chaussées

4.4.2.1 Des orientations relatives à la conception des chaussées sont présentées dans la circulaire d'information (AC) 150/5320-6 « Airport Pavement Design and Evaluation¹ » de la FAA. La pratique de conception met en œuvre la théorie élastique en couches pour la conception des chaussées souples et la théorie tridimensionnelle des éléments finis pour la conception des chaussées rigides. La FAA a adopté ces méthodes pour tenir compte de l'incidence des configurations des trains d'atterrissage et des conditions de charge accrues sur les chaussées d'aéroport. Ces procédures sont solides et peuvent prendre en compte les futures configurations de train d'atterrissage sans modifier les procédures de conception sous-jacentes. Les courbes de rupture ont été étalonnées à l'aide d'essais de chaussée en grandeur réelle à la National Airport Pavement Test Facility (NAPTF) de la FAA.

4.4.2.2 La FAA a donc développé un programme informatique appelé FAARFIELD pour aider les ingénieurs des chaussées à les mettre en œuvre. FAARFIELD peut être téléchargé gratuitement sur <http://www.airporttech.tc.faa.gov/Products/Airport-Pavement-Software-Programs>.

4.4.3 Évaluation des chaussées

4.4.3.1 Des orientations relatives à l'évaluation des chaussées sont présentées dans la circulaire AC 150/5320-6 « Airport Pavement Design and Evaluation² » de la FAA. Les évaluations des chaussées d'aéroport servent à évaluer la capacité d'une chaussée existante à supporter différents types, poids ou volumes de trafic aérien. La capacité de charge des ponts, des ponceaux, des collecteurs d'eaux pluviales et autres structures existantes doit être prise en compte dans ces évaluations. Les évaluations peuvent également aider à déterminer l'état des chaussées existantes pour les utiliser dans la planification ou la conception des améliorations de l'aéroport.

4.4.3.2 Les procédures d'évaluation sont essentiellement l'inverse des procédures de conception. Cette circulaire d'information porte sur l'évaluation des chaussées pour toutes les masses d'aéronef.

4.4.4 Publication de la résistance des chaussées

4.4.4.1 Des orientations pour rendre compte de la résistance de la chaussée sont présentées dans la circulaire AC 150/5335-5 « Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength — PCN³ » de la FAA. La circulaire d'information fournit des orientations pour l'utilisation de la méthode normalisée de publication de la résistance des chaussées, qui ne s'applique qu'aux chaussées dont la force portante est de 5 700 kg (12 500 livres) ou plus. La détermination de la valeur numérique du PCN pour une chaussée particulière peut se fonder sur l'une des deux procédures suivantes : la méthode des « aéronefs utilisateurs » ou la méthode de l'« évaluation technique ». Des orientations sur les deux méthodes sont fournies, et l'une ou l'autre peut être utilisée pour déterminer un PCN, mais la méthode utilisée doit être indiquée lors de la publication de la cote. La cote publiée du système PCN utilise le format codé décrit à l'Annexe 14, volume I, section 2.6.

1. http://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentNumber/150_5320-6
2. http://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentNumber/150_5320-6
3. http://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentNumber/150_5335-5

Chapitre 5

Page laissée intentionnellement en blanc

Chapitre 6

Page laissée intentionnellement en blanc

Chapitre 7

CONSIDÉRATIONS RELATIVES AUX PONTS, AUX PONCEAUX ET AUX AUTRES STRUCTURES

7.1 OBJET

Le présent chapitre vise à fournir des informations et des orientations de base pour la conception et les aspects des structures d'aérodrome. Les structures d'aérodrome, telles que les ponts et les ponceaux, sont généralement conçues pour durer jusqu'à un avenir proche de l'aérodrome. Les informations relatives à la disposition des trains d'atterrissage des futurs aéronefs lourds sont spéculatives, mais on peut supposer, avec suffisamment de confiance, que le renforcement des chaussées pour accueillir les futurs aéronefs peut être effectué sans problèmes excessifs. Le renforcement des structures peut toutefois s'avérer extrêmement difficile, coûteux et long.

7.2 GÉNÉRALITÉS

7.2.1 Les structures de drainage ou d'accès traversent couramment les chaussées qui supportent les aéronefs. Ces installations sont soumises à la charge directe supplémentaire imposée par l'aéronef, lorsque les charges ponctuelles peuvent être augmentées, comme sur les ponts, les passerelles et les installations souterraines de l'aérogare où la totalité du poids de l'aéronef peut être imposée sur une travée de pont, une pile ou une semelle. Cependant, le plus souvent, la charge est indirectement transmise aux ponceaux et aux canalisations enterrées par la couche de sol située sous la chaussée. Ces structures souterraines doivent être prises en compte lors de la conception et de l'évaluation de la résistance de la chaussée. Les schémas des contraintes induites par les charges des roues en surface lorsqu'elles sont transmises vers le bas ne sont pas les mêmes sur les structures souterraines que sur les structures du terrain de fondation. Cela s'explique non seulement par le fait que ces structures ne se trouvent pas au niveau du terrain de fondation, mais aussi par le fait que la présence de la structure déforme les modèles.

7.2.2 Lors de la conception de nouvelles installations, il faut veiller à l'adéquation structurelle des conduites, des ponceaux et des ponts, non seulement pour les charges de conception envisagées, mais aussi pour les éventuelles charges futures, afin d'éviter des traitements correctifs très coûteux rendus nécessaires par l'augmentation de la charge des aéronefs.

7.3 CONSIDÉRATIONS RELATIVES À LA CONCEPTION

7.3.1 Pour de nombreuses structures, la conception dépend fortement de la configuration du train d'atterrissage de l'aéronef ; par conséquent, la conception devrait être adaptée à l'aéronef le plus gros, à la masse totale maximale, qui pourrait utiliser l'aérodrome pendant la durée de vie de celui-ci. Il faut tenir compte de toutes les conditions de charge, qu'il s'agisse de charges permanentes ou de charges dynamiques, semblables à celles utilisées par les méthodes et les programmes de calcul des facteurs de charge et de résistance aux niveaux national et local, tels que l'AASHTO LFRD utilisé aux États-Unis ou les Eurocodes structuraux (normes EN-1990 à EN-1999) utilisés en Europe. Les paramètres de conception suggérés sont présentés dans les paragraphes suivants.

Conception de la fondation

7.3.2 La conception de la fondation varie selon le type et la profondeur du sol. Il n'y a pas lieu de s'écarter d'une méthodologie reconnue ; sauf que, pour les structures peu profondes, comme les prises d'eau et les ponceaux, les charges concentrées peuvent nécessiter des semelles plus lourdes et plus larges que celles prévues par les normes structurales actuellement en vigueur. Pour les structures souterraines/enfouies, comme les ponceaux, il est recommandé de se reporter aux orientations suivantes :

- a) Lorsque la profondeur du remblai est inférieure à 0,6 m (2 ft), les charges sur roues seront traitées comme des charges concentrées.
- b) Lorsque la profondeur du remblai est de 0,6 m (2 ft) ou plus, les charges sur roues devraient être considérées comme uniformément réparties sur un carré dont les côtés sont égaux à 1,75 fois la profondeur du remblai. Lorsque ces zones de plusieurs concentrations se chevauchent, la charge totale devrait être répartie uniformément sur l'aire définie par les limites extérieures des différentes aires, mais la largeur totale de la répartition ne devrait pas dépasser la largeur totale de la dalle porteuse.
- c) Pour les charges maximales par roue dépassant 11 400 kg (25 000 lb), effectuer une analyse structurale pour déterminer la répartition des charges par roue au sommet de la structure enterrée. Tenir compte des charges maximales sur les roues, de la pression des pneus et de la configuration du train, qui agiront sur la structure enterrée. Les répartitions de charges peuvent être postulées de manière conservatrice au lieu d'effectuer une analyse structurale détaillée.

Charges

7.3.3 Toutes les charges doivent être considérées comme la somme des poids morts et des charges mobiles. La conception des structures soumises aux charges directes sur roues doit également prévoir des charges de freinage pouvant atteindre 0,7 G (pour les freins sans glissement).

Charges directes

7.3.4 Charges directes. Les ponts et revêtements soumis à la charge directe d'aéronefs lourds, tels que les couvercles de trou d'homme, les grilles d'entrée, les toits de tunnels de services publics, les ponts, etc., devraient être conçus pour les charges suivantes :

- a) Couvercles de trou d'homme pour des charges sur roue de 45 000 kg (100 000 lb) avec une pression des pneus de 1,72 MPa (250 psi). Il faut prévoir des pressions de pneus plus élevées si l'on utilise des aéronefs dont la pression des pneus est supérieure à 1,72 MPa (250 psi).
- b) Pour les portées de 0,6 m (2 ft) ou moins dans la moindre direction, une charge mobile uniforme de la plus grande des valeurs suivantes : 1,72 MPa (250 psi) ou la pression maximale des pneus supposée pour la conception du couvercle de trou d'homme.
- c) Pour les portées de 0,6 m (2 ft) ou plus dans la moindre direction, la conception sera basée sur le nombre de roues qui conviendront à la portée. Conception pour la charge maximale prévue sur les roues.

7.3.5 Il convient d'accorder une attention particulière aux structures qui devront supporter à la fois des voies de circulation en ligne et en diagonale, comme les voies de circulation en diagonale ou les voies de circulation sur l'aire de trafic. Si des joints de dilatation sont nécessaires pour ces structures, le transfert de charge peut ne pas être possible.

Chapitre 8

Page laissée intentionnellement en blanc

Chapitre 9

CRITÈRES STRUCTURELS RELATIFS AUX SURFACES NATURELLES

9.1 INTRODUCTION

9.1.1 Dans certains cas, les caractéristiques physiques d'un aérodrome peuvent ne pas comporter de revêtement, mais doivent néanmoins pouvoir supporter le passage occasionnel d'un aéronef. Dans ces cas, le sol naturel peut ne pas avoir une résistance suffisante pour supporter l'aéronef, et une préparation spéciale peut par conséquent être nécessaire. Une résistance adéquate est nécessaire pour faire en sorte qu'un aéronef qui dévie sur la surface non revêtue ne subisse aucun dommage structurel. La surface non revêtue doit également pouvoir supporter les véhicules terrestres qui peuvent occasionnellement circuler sur l'aire.

9.1.2 Les orientations présentées dans la présente section sont axées sur les caractéristiques physiques les plus souvent laissées sans revêtement sur un aérodrome. Il s'agit plus précisément des accotements des pistes et des voies de circulation, des aires de sécurité d'extrémité de piste (RESA) et des bandes de piste situées en dehors de l'accotement de la piste. Ces orientations ne s'appliquent pas aux pistes non revêtues elles-mêmes, car les exigences de résistance d'une piste sont beaucoup plus strictes.

9.1.3 Pour toute surface non revêtue, l'ingestion ou le souffle d'objets intrus par les moteurs à turbines des aéronefs est une considération importante. La protection de la surface pour faire en sorte qu'aucun matériau libre ne soit présent relève de la responsabilité de l'aérodrome. Un certain type de traitement chimique ou l'utilisation de gazon en plaques peut être nécessaire pour la surface non revêtue, ainsi que des inspections visuelles, pour s'assurer de l'absence d'objets intrus.

9.1.4 Il convient de souligner que les orientations relatives à la force portante contenues dans le présent chapitre ne doivent en aucun cas être interprétées comme une exigence de conception. Ces orientations ne servent qu'à étayer le jugement de l'ingénieur lorsqu'aucune donnée spécifique n'est disponible.

9.2 CONTEXTE DE LA CONCEPTION

9.2.1 Afin de concevoir une aire non revêtue, plusieurs paramètres doivent être connus. Le type d'aéronef prévu pour l'aérodrome doit être connu, car la charge équivalente d'une seule des roues du train d'atterrissage principal est critique, ainsi que la pression des pneus du train principal. La connaissance du nombre prévu de passages d'aéronefs nécessaires pour appliquer une charge complète sur une surface unitaire de la chaussée, ainsi que des paramètres d'aéronefs susmentionnés, permettra de déterminer la CBR du sol naturel nécessaire pour supporter les charges des aéronefs sans rupture.

9.2.2 Dans la plupart des cas, la CBR du sol naturel n'est pas suffisante pour supporter les charges sur roues des aéronefs les plus gros. La méthode de conception suppose une seule couche de matériau de couverture granulaire de haute qualité, qui peut être ajoutée sur le sol naturel de faible CBR afin de supporter l'aéronef. La CBR minimale requise pour la couche de couverture granulaire est CBR 20. Cette CBR est caractéristique de la plupart des matériaux granulaires des couches de fondation utilisés dans la construction de chaussées souples et devrait être facilement disponible. Si la pente existante de l'aire non revêtue doit être maintenue, l'épaisseur requise de sol naturel à faible CBR peut être enlevée

et remplacée par la couche de couverture à CBR élevée. Il est recommandé de vérifier la CBR du sol naturel jusqu'à une profondeur d'au moins 60 cm.

9.3 DÉTAILS DE LA CONCEPTION

9.3.1 La méthode de conception est fondée sur des travaux antérieurs réalisés par la station d'expérimentation des voies navigables du Corps of Engineers de l'armée des États-Unis pour des terrains d'aviation militaire semi-préparés. Une reformulation de l'équation CBR originale utilisée dans la conception des chaussées souples peut être utilisée pour déterminer l'épaisseur de la couche de couverture nécessaire pour supporter le sol naturel dans la zone non revêtue. L'équation est la suivante :

Unités impériales

(t=pouces, A=pouces carrés)

$$t_{cover} = (0,1275 \times \log C + 0,087) \sqrt{\frac{P}{(8,1 \times CBR)} - \frac{A}{\pi}}$$

C = passages nécessaires prévus pour appliquer une charge complète sur une surface unitaire de la chaussée.

P = charge équivalente sur roue simple — fonction de la géométrie et de l'épaisseur de l'atterrisseur (lb)

A = surface de contact du pneu (pouces carrés)

t_{cover} = épaisseur de la couverture (in)

Unités métriques

(t=cm, A=cm²)

$$t_{cover} = (0,1275 \times \log C + 0,087) \sqrt{\frac{P \times 27,556}{CBR} - \frac{A}{6,4516 \times \pi}}$$

C = passages nécessaires prévus pour appliquer une charge complète sur une surface unitaire de la chaussée.

P = charge équivalente sur roue simple — fonction de la géométrie et de l'épaisseur de l'atterrisseur (kN)

A = surface de contact du pneu (cm²)

t_{cover} = épaisseur de la couverture (cm)

9.3.2 La méthode de conception est supposée, par prudence, correspondre à dix passages d'un aéronef. Le critère de rupture est de 8 cm (3 pouces) d'orniérage, mais il est basé sur les charges de roulement sans les effets de freinage des aéronefs. Le niveau de dix passages a été fixé pour permettre à une couche de couverture légèrement plus forte de contrebalancer les charges de freinage de l'avion. En cas de freinage important, l'orniérage attendu serait supérieur au critère de rupture de 8 cm. Cependant, une surface non revêtue peut être facilement réparée par le nivellement et le recompactage de la surface altérée, si nécessaire.

9.3.3 Afin de fournir des orientations techniques générales aux aérodrômes pour la conception des zones non revêtues, une méthode analogue au système PCN a été adoptée. Les quatre mêmes catégories de terrain de fondation utilisées dans le système PCN ont été adoptées, car elles sont caractéristiques de la plupart des conditions de sol naturel auxquelles on peut s'attendre sur les aérodrômes du monde entier. En outre, on a supposé que trois catégories d'aéronefs étaient représentatives du trafic existant à la majorité des aérodrômes, elles sont indiquées ci-dessous :

Groupe 1 : avions régionaux dont la charge sur les roues est inférieure à 13 600 kg

Groupe 2 : avions à fuselage étroit avec des charges sur les roues comprises entre 13 600 et 20 410 kg

Groupe 3 : gros-porteurs dont la charge sur les roues est supérieure à 22 680 kg

Tableau 9-1. Épaisseur de la couverture requise par type de terrain de fondation et groupe d'aéronefs

Groupe d'aéronefs	Épaisseur de couverture requise par type de terrain de fondation			
	CBR 3	CBR 6	CBR 10	CBR 15
1	10 cm	8 cm	aucune	aucune
2	18 cm	13 cm	10 cm	8 cm
3	31 cm	20 cm	15 cm	13 cm

9.3.4 Les épaisseurs de couverture indiquées dans le tableau 9-1 sont celles de la couche de matériau CBR 20 ou plus, nécessaire pour protéger le type de terrain de fondation indiqué. Pour les sols naturels dont les valeurs de CBR se situent entre les quatre types de terrain de fondation, utiliser l'interpolation linéaire pour obtenir l'épaisseur de couverture requise. Une couche de terre végétale ensemencée pourrait être placée sur la couche de couverture là où cela est nécessaire pour assurer une protection contre l'érosion et les risques présentés par les objets intrus (FOD).

9.4 ORIENTATIONS RELATIVES À LA FORCE PORTANTE DES SURFACES NATURELLES PRÉPARÉES

Accotements des pistes et des voies de circulation

9.4.1 L'objectif de l'accotement est de fournir une résistance adéquate afin de supporter un aéronef en cas de sortie de piste latérale. Les orientations de conception fournies dans le tableau 9-1 sont suffisantes pour la conception d'un accotement non revêtu.

Aires de sécurité d'extrémité de piste (RESA)

9.4.2 L'objectif des RESA est de fournir une force adéquate en cas d'atterrissage de l'aéronef avant la piste ou en cas de dépassement de la piste. S'il est nécessaire de prévoir une meilleure résistance et de faciliter la décélération de l'aéronef, l'ajout d'une couche de matériau granulaire moins résistant peut être une option. Il convient toutefois de réfléchir à la préparation et à l'entretien de cette couche granulaire.

Bandes de piste

9.4.3 La bande de piste nivelée jusqu'à l'accotement devrait être suffisamment résistante pour offrir une surface de frottement et faciliter la décélération d'un aéronef en cas de sortie de piste. La surface supérieure peut être constituée de 15 cm de matériau de moindre résistance et le sol naturel sous-jacent doit offrir une résistance suffisante pour supporter l'aéronef pendant un passage, de manière à éviter tout dommage structurel.

Appendice 1

CARACTÉRISTIQUES DES AÉRONEFS INFLUENÇANT LA FORCE PORTANTE DES CHAUSSÉES

1. GÉNÉRALITÉS

1.1 Le présent appendice donne les caractéristiques des aéronefs qui influent sur la résistance des chaussées, à savoir le poids des aéronefs, le pourcentage de charge sur la roue avant, la disposition des roues, la charge supportée par la jambe de l'atterrisseur principal, la pression des pneus et l'aire de contact pour chaque pneu. Le tableau A1-1 (situé à la fin du présent appendice) reprend ces données pour la plupart des aéronefs couramment utilisés.

1.2 Les contraintes imposées aux chaussées par les aéronefs sont transmises par l'intermédiaire du train d'atterrissage, qui se compose en général d'un atterrisseur principal double et d'un atterrisseur auxiliaire disposé, soit à l'avant (disposition aujourd'hui la plus courante) soit à l'arrière (disposition ancienne).

1.3 La contrainte transmise par chaque jambe d'atterrisseur dépend du centrage par rapport aux trois points d'appui. La répartition statique de la charge par les différentes jambes d'un train d'atterrissage tricycle commun peut être illustrée dans la figure A1-1 comme suit :

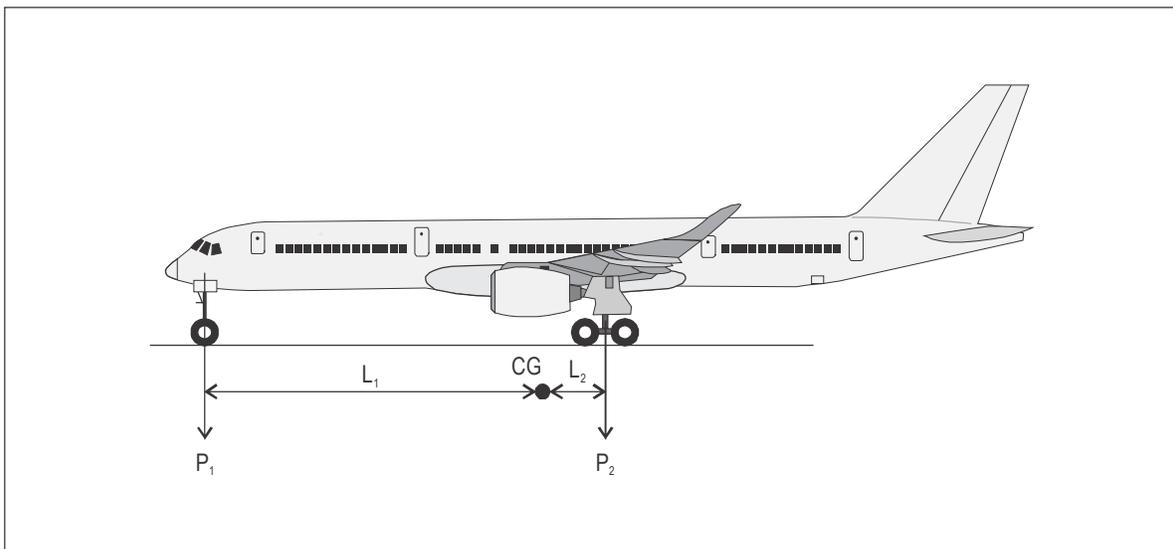


Figure A1-1. Répartition du poids de l'aéronef au sol

W étant le poids brut de l'aéronef ; P_1 la charge transmise par l'atterrisseur auxiliaire ; P_2 la charge transmise par l'atterrisseur principal ; L_1 et L_2 , les distances du CG à l'atterrisseur auxiliaire P_1 et au plan formé par les deux jambes de l'atterrisseur principal P_2 respectivement,

on a :

$$W = P_1 + P_2$$

$$P_1 L_1 = P_2 L_2$$

d'où :

$$P_2 = P_1 \frac{L_1}{L_2}$$

1.4 Le rapport L_1/L_2 est généralement de l'ordre de 9, c'est-à-dire que l'atterrisseur auxiliaire supporte environ le dixième du poids de l'aéronef. Par conséquent, chaque jambe de l'atterrisseur principal transmet une charge égale à 45 % environ de ce poids. L'empattement et la largeur de la voie n'ont pas été inclus, car ces dimensions sont telles qu'il n'y a aucune possibilité d'interaction des contraintes imposées par les différentes jambes du train d'atterrissage.

1.5 Il s'ensuit que les caractéristiques des jambes de l'atterrisseur principal sont suffisantes pour calculer la résistance de chaussée nécessaire. C'est pourquoi le tableau ne donne que ces caractéristiques.

1.6 La charge supportée par chaque jambe d'atterrisseur est transmise à la chaussée par une ou plusieurs roues à pneumatique. Les dispositions des roues illustrées à la figure A1-2 peuvent se trouver sur les atterrisseurs principaux des aéronefs civils actuellement en service.

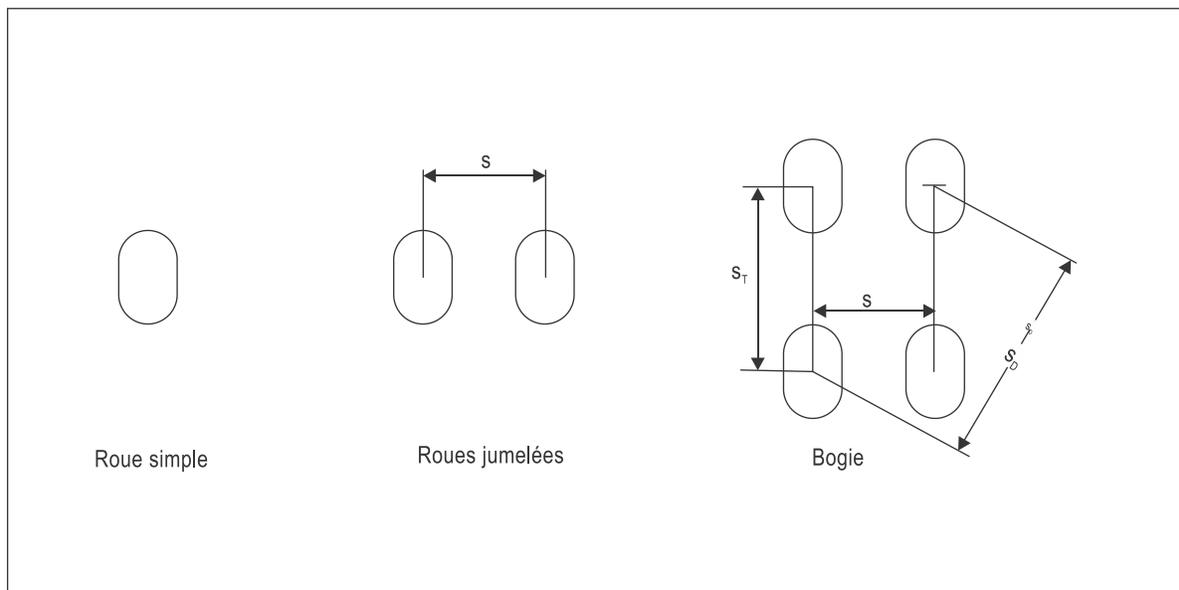


Figure A1-2. Dispositions des roues

1.7 Aux fins de la conception et du calcul des chaussées, les caractéristiques suivantes sont importantes et, pour cette raison, sont indiquées dans le tableau :

S — Voie du train des roues jumelées

S_T — Empattement du bogie

S_D — Distance entre les centres des aires de contact des roues diagonales, donnée par l'expression suivante :

$$S_D = \sqrt{(S^2 + S_T^2)}$$

Note.— La pression des pneus indiquée est la pression interne ou pression de gonflage.

1.8 On remarquera que les chiffres donnés dans le tableau correspondent à la masse maximale de l'aéronef au décollage. Pour des masses opérationnelles inférieures, les valeurs indiquées pour la « charge par jambe d'atterrisseur », et l'« aire de contact » doivent être réduites proportionnellement.

2. CARACTÉRISTIQUES D'AÉRONEFS POUR LA CONCEPTION ET L'ÉVALUATION DES CHAUSSÉES

2.1 Les aéronefs répertoriés dans le tableau A1-1 sont représentatifs des types d'aéronefs commerciaux les plus courants des avionneurs, qui transportent généralement 70 passagers ou plus ou qui ont une masse supérieure à 40 tonnes. Les aéronefs de cette gamme de poids sont les plus exigeants pour ce qui est de la charge sur la chaussée. Dans la plupart des cas, le tableau A1-1 indique la version la plus lourde d'un modèle d'aéronef ; des informations plus détaillées figurent dans les caractéristiques des aéronefs des avionneurs destinées aux documents de planification des aéroports.

2.2 Nomenclature des atterrisseurs (utilisée dans le tableau A1-1)

2.2.1 **Désignation de la géométrie du train d'atterrissage.** Selon la convention d'appellation, les désignations abrégées des trains d'atterrissage peuvent inclure deux variables, la configuration du train principal et la configuration du train de fuselage, si des trains de fuselage sont présents. La figure A1-3 illustre les deux variables principales.

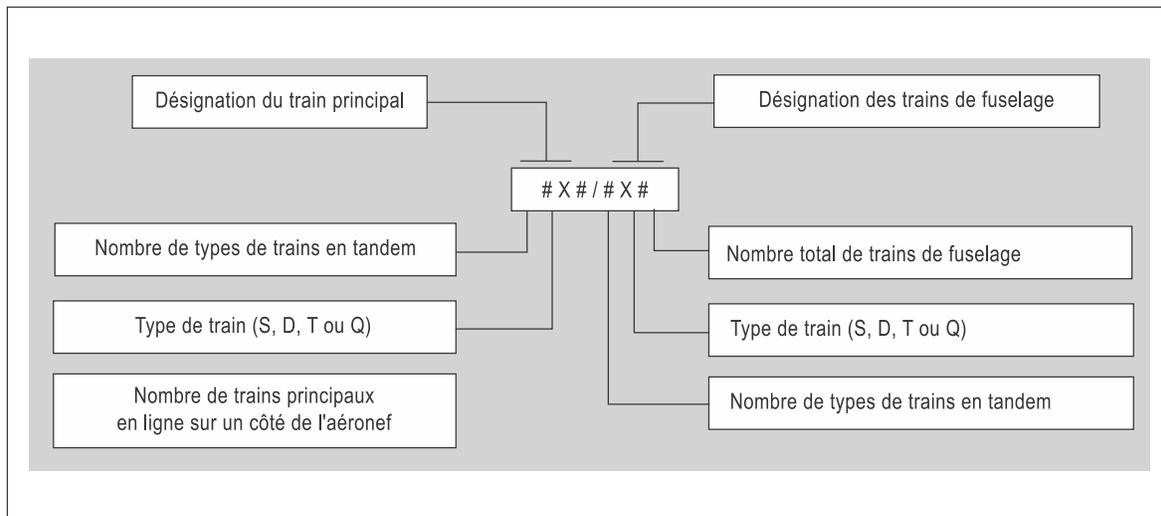


Figure A1-3. Convention d'appellation des trains

2.2.2 **Type de train de base.** Le type de train d'atterrissage pour une jambe individuelle est déterminé par le nombre de roues sur un essieu donné (ou une ligne d'essieux) et par la présence de roues répétées en tandem. Il peut toutefois exister des cas où plusieurs jambes sont très proches les unes des autres et où il est préférable de les traiter comme un seul train, p. ex. l'Antonov AN-124 (voir figure A1-4). En l'absence de trains de fuselage, la deuxième partie de la désignation est omise. Pour les aéronefs à trains multiples, comme le B747 et l'A380, la paire de trains extérieure est considérée comme le train principal.

2.2.3 **Codes de train de base.** Cette convention d'appellation, comme le montre la figure A1-4, utilise les codes suivants pour la désignation des trains : simple (S) ; à diablo (D) ; triple (T) ; quadruple (Q).

2.2.4 **Partie relative au train principal de la désignation du train.** La première partie de la désignation du train d'atterrissage comprend la désignation du train principal. Cette partie peut comporter jusqu'à trois caractères.

- Le **premier caractère** indique le nombre d'assemblages en tandems ou de roues en tandem (par ex. « 3D » représente trois trains à diablo en tandem). En l'absence d'une configuration en tandem, la valeur de tête « 1 » est omise. Les codes classiques sont : « S » représentant le train simple ; « 2D » représentant deux diabolos en tandem ; « 5D » représentant cinq diabolos en tandem ; « 2T » représentant deux triples en tandem.
- Le **deuxième caractère** de la désignation du train indique le code du train (S, D, T ou Q).
- Le **troisième caractère** de la désignation du train est une valeur numérique qui indique le nombre multiple des trains. Pour le train principal, la désignation du train suppose que celui-ci est présent des deux côtés (symétriques) de l'aéronef et que la valeur déclarée indique le nombre de trains sur un côté de l'aéronef. Une valeur de 1 est utilisée pour les aéronefs équipés d'un train d'atterrissage de chaque côté de l'aéronef. Pour des raisons de simplicité, la valeur 1 est supposée et n'est pas indiquée dans la désignation du train principal. Les aéronefs ayant plus d'un train principal de chaque côté de l'aéronef et dont les trains sont en ligne utiliseront une valeur indiquant le nombre de trains en ligne.

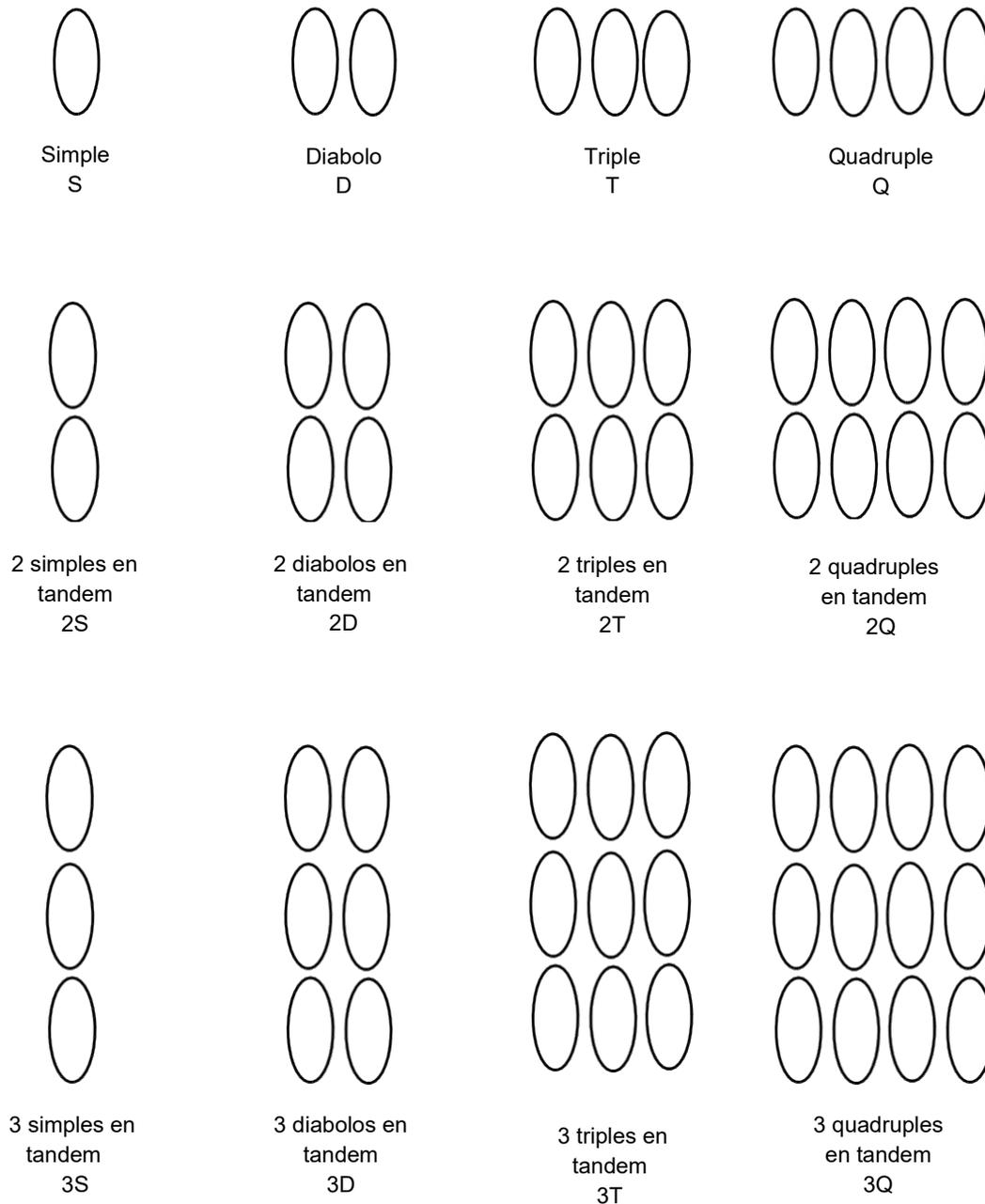


Figure A1-4. Configurations génériques des trains (augmenter la valeur numérique pour les essieux en tandem supplémentaires)

2.2.5 **Partie relative au train de fuselage de la désignation du train.** La deuxième partie de la désignation du train est utilisée lorsque des trains de fuselage sont présents. Si tel est le cas, la désignation du train principal est suivie d'une barre oblique (/), puis de la désignation du train de fuselage. Par exemple, l'aéronef B-747 est équipé d'un train principal à deux diabolos en tandem et de deux trains de fuselage à deux diabolos en tandem. La désignation complète

des trains d'atterrissage de cet aéronef est 2D/2D2. La désignation du train de fuselage est similaire à celle du train principal, sauf que la valeur numérique qui suit le type de train (S, D, T ou Q) indique le nombre total de trains de fuselage présents (p. ex. 2D1 = un train de fuselage à diabolo en tandem ; 2D2 = deux trains de fuselage à diabolo en tandem). Étant donné que la disposition des trains de fuselage peut ne pas être symétrique, le code du train doit indiquer le nombre total de trains présents et la valeur 1 n'est pas omise s'il n'y a qu'un seul train.

2.2.6 Configuration de trains uniques. Le Lockheed C-5 Galaxy est équipé d'un type de train unique, et il est difficile de le désigner en utilisant la méthode proposée. Cet aéronef ne sera pas classé selon la nouvelle convention d'appellation et restera désigné directement comme le C5. Les configurations de train telles que celles du Boeing C-17, de l'Antonov AN-124 et de l'Ilyshin IL-76 peuvent également prêter à confusion. Dans ce cas, il est important d'observer le nombre de jambes de train d'atterrissage et leur proximité. Dans le cas de l'AN-124, il est plus avantageux de traiter les multiples jambes de train d'atterrissage comme un seul et même train (c'est-à-dire 5D ou cinq jambes en tandem à deux roues) plutôt que d'utiliser D5 ou deux trains à roues jumelées avec cinq assemblages par côté de l'aéronef. En raison de la proximité des roues, il est plus approprié de désigner le train du C-17 comme 2T, car il s'agit d'un train à trois roues en tandem. En revanche, l'IL-76 présente un espacement considérable entre les jambes et devrait être désigné comme un Q2.

2.2.7 Exemples de convention d'appellation de la géométrie des trains. La figure A1-4 donne des exemples de types de trains génériques dans des configurations individuelles et en tandem multiple.

Tableau A1-1. Caractéristiques d'aéronefs pour la conception et l'évaluation des chaussées

Note 1.— Ce tableau a été préparé en unités métriques. Pour convertir les kilogrammes en newtons, multiplier par 9,80665.

Note 2.— Les chiffres se rapportent à l'aéronef à sa masse maximale au décollage. Pour des masses opérationnelles inférieures, les valeurs indiquées pour la « charge par jambe d'atterrisseur », la « pression de gonflage » et/ou l'« aire de contact » doivent être réduites proportionnellement.

Type d'aéronef	Masse totale au décollage (kg)	Charge sur une jambe d'atterrisseur principal (%)	Type d'atterrisseur	JAMBES PRINCIPALES D'ATTERRISSEURS					Données complémentaires pour les atterrisseurs complexes
				Charge par jambe (kg)	Pression des pneus (MPa)	Écartement des roues (cm)			
						(S)	(S _T)	(S _D)	
A300 B2	142 900	47,0	2D	67 118	1,28	89	140	165,6	
A300 B4	165 900	47,0	2D	77 921	1,46	93	140	167,7	
A300-600 B4	165 900	47,1	2D	78 216	1,28	93	140	167,7	
A300-600R B4	172 600	47,5	2D	81 988	1,34	93	140	167,7	
A300-600R B4F	172 600	47,5	2D	81 988	1,34	93	140	167,7	
A300-600R F4	171 400	47,5	2D	81 418	1,34	93	140	167,7	
A310-200	144 900	46,6	2D	66 243	1,33	93	140	167,7	

Type d'aéronef	JAMBES PRINCIPALES D'ATTERISSEURS								Données complémentaires pour les atterrisseurs complexes
	Masse totale au décollage (kg)	Charge sur une jambe d'atter- risseur principal (%)	Type d'atter- risseur	Charge par jambe (kg)	Pression des pneus (MPa)	Écartement des roues (cm)			
						(S)	(S _T)	(S _D)	
A310-200F	142 900	46,6	2D	66 662	1,33	93	140	167,7	
A310-300	164 900	47,2	2D	77 873	1,29	93	140	167,7	
A310-300F	164 900	47,2	2D	77 873	1,29	93	140	167,7	
A318-100	68 400	44,5	D	30 431	1,24	93			
A319-100	75 900	45,8	D	34 746	1,38	93			
A319 CJ	76 900	45,8	D	35 181	1,38	93			
A319neo	75 900	45,8	D	34 746	1,38	93			
A320-100	68 400	47,1	D	32 215	1,28	93			
A320-200	78 400	46,4	D	36 405	1,44	93			
A320neo	79 400	46,3	D	36 757	1,44	93			
A320-200 (2D)	73 900	47,0	2D	34 969	1,22	78	101	127,5	
A321-100	89 400	47,5	D	42 432	1,46	93			
A321-200	93 900	47,6	D	44 717	1,50	93			
A321neo	93 900	47,6	D	44 717	1,50	93			
A330-200	242 900	46,3	2D	112 515	1,47	140	198	242,4	
A330-200F	233 900	47,3	2D	110 674	1,42	140	198	242,4	
A330-800neo	242 900	46,3	2D	112 515	1,47	140	198	242,4	
A330-300	242 900	46,9	2D	113 896	1,49	140	198	242,4	
A330-900neo	242 900	46,9	2D	113 896	1,49	140	198	242,4	
A340-200	275 900	39,2	2D/D1	108 219	1,49	140	198	242,4	
A340-300	277 400	39,4	2D/D1	109 190	1,49	140	198	242,4	
A340-500	375 200	31,9	2D/2D1	119 675	1,61	140	198	242,4	
A340-500 HGW	381 200	31,6	2D/2D1	120 592	1,61	140	198	242,4	
A340-600	369 200	32,2	2D/2D1	118 930	1,61	140	198	242,4	
A340-600 HGW	381 200	31,7	2D/2D1	121 016	1,61	140	198	242,4	
A350-900	275 900	46,9	2D	129 326	1,68	173,5	204	267,8	

Type d'aéronef	JAMBES PRINCIPALES D'ATTERISSEURS								Données complémentaires pour les atterrisseurs complexes
	Masse totale au décollage (kg)	Charge sur une jambe d'atter- risseur principal (%)	Type d'atter- risseur	Charge par jambe (kg)	Pression des pneus (MPa)	Écartement des roues (cm)			
						(S)	(S _T)	(S _D)	
A350-1000	308 900	47,1	3D	145 427	15,2	140 F 147 C 140 R	140	313,0	
A380-800 (Train d'aile)	577 000	18,9	2D	108 847	1,50	135	170	217,1	Configuration complète des atterrisseurs 3D/2D2.
A380-800 (Train de fuselage)	577 000	28,3	3D	163 271	1,50	153 F 155 C 153 R	170	372,8	Configuration complète des atterrisseurs 3D/2D2.
A400M	141 400	46,9	3D	66 368	0,95	86	157 F 156 R	325,0	
An-12	64 000	46,3	2D	29 651	0,83	123	49,2	132,5	
An-22	227 500	43,6	3D	99 076	0,49	115	250	275,2	
An-24	21 000	46,6	D	9 786	0,49	50			
An-72-100	35 150	47,2	2S	16 591	0,59		126		
An-74TK-300	37 850	46,5	2S	17 600	0,69		126		
An-124-100M-150	408 000	45,8	5D	186 864	1,18	101	171	198,6	
An-148-100E	43 850	43,8	D	19 184	1,13	58			
An-158	43 850	44,3	D	19 404	1,13	58			
An-225	650 000	46,1	7D	299 650	1,23	101	171	198,6	
B707-320C	152 407	46,7	2D	71 174	1,24	88	142	167,1	
B720B	106 594	46,4	2D	49 460	1,00	81	124	148,1	
B727-100	77 110	47,6	D	36 704	1,14	86			
B727-200 (standard)	78 471	48,5	D	38 058	1,14	86			
B727-200 (avancé)	95 254	46,5	D	44 293	1,19	86			
B737-100	50 349	45,9	D	23 110	1,08	77			
B737-200/200C	58 332	46,0	D	26 833	1,25	77			

Type d'aéronef	JAMBES PRINCIPALES D'ATTERISSEURS								
	Masse totale au décollage (kg)	Charge sur une jambe d'atter- risseur principal (%)	Type d'atter- risseur	Charge par jambe (kg)	Pression des pneus (MPa)	Écartement des roues (cm)			Données complémentaires pour les atterrisseurs complexes
						(S)	(S _T)	(S _D)	
B737-300	63 503	45,4	D	28 830	1,39	77			
B737-400	68 266	46,9	D	32 016	1,28	77			
B737-500	61 915	46,1	D	28 540	1,36	77			
B737-600	66 224	45,3	D	30 000	1,25	86			
B737-700	77 791	45,8	D	35 628	1,35	86			
B737-800	79 333	46,6	D	37 001	1,41	86			
B737-900	79 243	46,7	D	37 006	1,41	86			
B737-900ER	85 366	47,2	D	40 293	1,52	86			
B747-SP	318 875	21,9	2D/2D2	69 834	1,41	110	137	175,7	
B747-100/100B	341 555	23,1	2D/2D2	78 899	1,32	112	147	184,8	
B747-200B/300	379 204	22,7	2D/2D2	86 079	1,31	112	147	184,8	
B747-400/400ER	414 130	23,4	2D/2D2	96 906	1,57	112	147	184,8	
B747-8	449 056	23,7	2D/2D2	106 426	1,52	119	144	186,8	
B757-200	116 120	45,6	2D	52 951	1,26	86	114	142,8	
B757-300	124 058	46,4	2D	57 563	1,38	86	114	142,8	
B767-200/200ER	179 623	45,4	2D	81 549	1,31	114	142	182,1	
B767-300/300ER	187 334	46,2	2D	86 548	1,38	114	142	182,1	
B767-400ER	204 570	47,0	2D	96 148	1,47	116	137	179,5	
B777-200/200ER	298 464	45,9	3D	136 995	1,41	140	145	322,0	
B777-200LR	348 722	45,9	3D	160 063	1,50	140	145,3F 147R	324,0	
B777-300	300 278	47,4	3D	142 332	1,48	140	145	322,0	
B777-300ER	352 442	46,2	3D	162 828	1,52	140	145,3F 147R	324,0	
B787-8	228 383	45,6	2D	104 143	1,57	130	146	195,5	
B787-9	254 692	46,2	2D	117 772	1,56	152	151	214	
BAe 146 Série 200	40 600	47,1	D	19 123	0,90	71			

Type d'aéronef	JAMBES PRINCIPALES D'ATTERISSEURS					Écartement des roues (cm)			Données complémentaires pour les atterrisseurs complexes
	Masse totale au décollage (kg)	Charge sur une jambe d'atter- risseur principal (%)	Type d'atter- risseur	Charge par jambe (kg)	Pression des pneus (MPa)	(S)	(S _T)	(S _D)	
CRJ-700	34 132	47,0	D	16 042	0,90	62			
CRJ-900/900 LR	38 555	46,3	D	17 851	1,15	62			
CRJ-1000	41 867	46,4	D	19 426	1,37	69			
Dash 8-400	29 347	47,0	D	13 793	1,57	50			
DC-9-32	49 442	46,2	D	22 842	1,07	64			
DC-9-51	55 338	47,0	D	26 009	1,19	66			
DC-10-10	207 745	46,7	2D	97 017	1,34	137	163	212,9	
DC-10-30	264 444	37,5	2D/D1	99 167	1,22	137	163	212,9	
E170	38 790	45,6	D	17 688	0,94	71			
E175	40 550	46,0	D	18 653	0,97	71			
E190	51 960	46,1	D	23 954	1,08	87			
E195	52 450	46,8	D	24 547	1,06	87			
Fokker 50	20 820	47,8	D	9 952	0,59	52			
Fokker 100	44 680	47,8	D	21 357	0,98	59			
IL-62M	168 000	47	2D	78 960	1,08	80	165	183,4	
IL-76TD-90BD	196 000	46,7	2Q	91 532	0,69	S1=82 S2=206			Quatre roues dans chacune des deux jambes de chaque côté. S1/S2 — distances entre les centres des zones de contact des roues intérieures/ extérieures pour chaque jambe.

Type d'aéronef	JAMBES PRINCIPALES D'ATTERISSEURS								Données complémentaires pour les atterrisseurs complexes
	Masse totale au décollage (kg)	Charge sur une jambe d'atter- risseur principal (%)	Type d'atter- risseur	Charge par jambe (kg)	Pression des pneus (MPa)	Écartement des roues (cm)			
						(S)	(S _T)	(S _D)	
IL-96-400T	271 000	31,7	2D/2D1	85 907	1,23	110	140	178	Deux diabolos en tandem sur le train principal/deux diabolos en tandem sur le train de fuselage.
L-100-30	70 670	48,4	2S	17 102	0,72		154		
L-1011-500	225 889	46,2	2D	104 361	1,27	132	178	221,6	
MD-11ER	287 124	38,8	2D/D1	111 404	1,42	137	163	212,9	
MD-83	73 028	47,4	D	34 615	1,34	71			
MD-87	63 956	47,4	D	30 315	1,17	71			
MD-90-30	76 430	47,0	D	35 922	1,33	71			
Tu-134A	49 000	47,1	2D	23 079	0,88	56	99	113,7	
Tu-154M	100 000	42,4	3D	42 400	0,98	62	F103 R98	210,3	
Tu-204CE	107 500	46,3	2D	49 719	1,37	80	127	150,1	
Tu-204-100C	110 750	46,3	2D	51 277	1,37	80	127	150,1	
Tu-214	110 750	46,3	2D	51 277	1,37	80	127	150,1	
Yak-42	57 500	47,0	2D	27 025	0,88	62,2	98	116	

Appendice 2

INFORMATIONS À L'INTENTION DES UTILISATEURS DU PROGRAMME INFORMATIQUE ICAO-ACR

1. GÉNÉRALITÉS

1.1 Le programme informatique ICAO-ACR est géré par la FAA, William J. Hughes Technical Center (WJHTC). Ce programme applique les procédures de calcul de l'ACR pour les chaussées rigides et souples. L'ICAO-ACR incorpore le programme LEAF (Layered Elastic Computational Program for FAA Pavement Design and Evaluation Procedures — FAA), un programme informatique qui calcule les réponses structurelles d'un système de chaussée en couches selon la théorie de Burmister (modèle à couches élastiques). Le programme ICAO-ACR est distribué sous forme compilée comme bibliothèque de liaison dynamique (DLL) Visual Basic.NET. Les fichiers du programme peuvent être téléchargés depuis le site web de la FAA WJHTC : [Logiciels pour les chaussées d'aéroports — \(FAA\)](#).

1.2 Les fichiers suivants peuvent être téléchargés depuis le site web ci-dessus :

- a) ICAO-ACR est un programme informatique exécutable (autonome) qui exécute le programme DLL *ACRClassLib.dll*, et renvoie des valeurs ACR standard.
- b) *ACRClassLib.dll* est une DLL Visual Basic.NET qui peut être reliée directement à d'autres programmes qui calculent directement l'ACR ou qui utilisent le calcul de l'ACR pour évaluer la PCR. *ACRClassLib.dll* n'est pas un programme informatique autonome. Il est plutôt destiné à être géré dans le cadre d'un programme appelant distinct tel que ICAO-ACR. Des informations sur la manière de lier la bibliothèque à un programme appelant sont données ci-dessous.

1.3 Le programme ICAO-ACR est un logiciel ouvert. Les codes sources de ICAO-ACR, *ACRClassLib.dll* et LEAF peuvent être obtenus auprès de :

Federal Aviation Administration
William H. Hughes Technical Center
Airport Technology R&D Branch., ANG-E26
Atlantic City International Airport, NJ 08405
United States

2. INFORMATIONS TECHNIQUES SUR LA BIBLIOTHÈQUE DE LIAISON DYNAMIQUE (DLL)

La DLL *ACRClassLib.dll* a été compilée à l'aide de Microsoft Visual Basic 2013 dans l'environnement de programmation Microsoft Visual Studio. Son cadre cible est Microsoft.NET Framework 4.5.

2.1 Données d'entrée. La bibliothèque *ACRClassLib.dll* accepte les entrées de données suivantes :

2.1.1 Masse totale de l'aéronef (en tonnes ou en livres).

- 2.1.2 Pourcentage de la masse totale de l'aéronef agissant sur le train principal, exprimé en valeur décimale.
 - 2.1.3 Nombre de roues du train de l'aéronef à analyser.
 - 2.1.4 Pression des pneus (en MPa ou en livres par pouce carré).
 - 2.1.5 Coordonnées horizontales (x, y) de chaque roue (en millimètres ou en pouces).
 - 2.1.6 Pour chaque roue, une valeur 0 ou 1, indiquant si la roue se trouve dans les limites de la grille de points d'évaluation. (La valeur 1 indique qu'elle est incluse.)
 - 2.1.7 Type de chaussée. Cette valeur ne peut être que « Souple » ou « Rigide ».
 - 2.1.8 Système d'unités (métrique ou impérial).
- 2.2 Données de sortie. La bibliothèque *ACRClassLib.dll* renvoie les sorties de données suivantes, compte tenu des entrées ci-dessus :
- 2.2.1 Épaisseur ACR (t) correspondant à quatre catégories standard de terrain de fondation (en pouces).
 - 2.2.2 Numéro ACR (t) correspondant aux quatre catégories standard de terrain de fondation.
- 2.3 Procédure de liaison à la DLL. *ACRClassLib.dll* est une DLL .NET. Pour les projets compilés dans l'environnement de programmation Microsoft Visual Studio.NET, la procédure de liaison à la DLL est la suivante :

- 2.3.1 Dans les propriétés du projet, ajouter *ACRClassLib.dll* aux Références.
- 2.3.2 Déclarer toutes les variables qui seront transmises entre le programme appelant et *ACRClassLib.dll*. Les variables d'entrée suivantes sont déclarées comme étant de type Simple : masse totale de l'aéronef, pourcentage de la masse totale, pression des pneus, coordonnée x (tableau), coordonnée y (tableau). Les variables d'entrée suivantes sont déclarées comme étant de type Entier : nombre de roues, variable de sélection des roues (tableau) (voir § 2.1.6).

Certaines variables ont des définitions particulières. Le type de chaussée est spécifié comme un type de variable énumérée :

```
Public Enum PavementType
    Souple = 1
    Rigide = 2
End Enum
```

Les données ACR sont stockées dans une structure de données Visual Basic :

```
Public Structure ACRdata
    Dim libACR() As Single
    Dim libACRthick() As Single
    Dim libSubCat() As String
    Dim libSubCatMPa() As String
Structure finale
```

Les quatre éléments de la structure des données ACR sont les suivants :

1. `ACRdata.libACR()` stocke les valeurs numériques de l'ACR après exécution.
2. `ACRdata.libACRthick()` stocke les valeurs d'épaisseur ACR après exécution.
3. `ACRdata.libSubCat()` stocke les désignations littérales des catégories de terrain de fondation.
4. `ACRdata.libSubCatMPa()` stocke les valeurs de module standard de la catégorie de terrain de fondation en MPa.

Chacun des éléments 1 à 4 ci-dessus est un tableau de longueur 5, de type de données déclaré comme indiqué ci-dessus. Dans chaque tableau, le premier élément du tableau `ACRData.array(0)` n'est pas utilisé, tandis que les quatre derniers éléments `ACRData.array(1)` à `ACRData.array(4)` correspondent respectivement aux catégories standard de terrain de fondation « D » à « A ». À titre de référence, les fragments de code Visual Basic suivants sont des exemples de signatures de fonctions utilisées dans la DLL. L'exécution de la fonction `CalculateACR` du programme appelant renvoie les valeurs ACR dans le tableau `ACRdata.libACR()`. La première signature de fonction s'applique à la majorité des types de trains où toutes les roues du train principal ont la même pression de pneu et la même charge. La deuxième signature de fonction est utilisée spécifiquement pour calculer l'ACR souple pour certaines configurations de train (par exemple la série Airbus A340) où le train d'atterrissage central a une combinaison pression de pneu/charge de roue différente de celle du train d'atterrissage de l'aile.

```
Public Overloads Function CalculateACR(ByVal PavementType As
clsACR.PavementType, _
ByVal gross_weight As Single, _
ByVal percent_gw As Single, _
ByVal wheels_number As Integer, _
ByVal tire_pressure As Single, _
ByVal CoordX() As Single, _
ByVal CoordY() As Single, _
ByVal SW() As Integer, _
ByVal Metric As Boolean) As ACRdata
```

```
Public Overloads Function CalculateACR(ByVal PavementType As
clsACR.PavementType, _
ByVal gross_weight As Single, _
ByVal percent_gw As Single, _
ByVal wheels_number As Integer, _
ByVal tire_pressure As Single, _
ByVal CoordX() As Single, _
ByVal CoordY() As Single, _
ByVal percent_gw2 As Single, _
ByVal wheels_number2 As Integer, _
ByVal tire_pressure2 As Single, _
ByVal CoordX2() As Single, _
ByVal CoordY2() As Single, _
ByVal Metric As Boolean) As ACRdata 'ACR for two gears
```

Voici un exemple de code Visual Basic pour déclarer des variables dans le programme appelant :

```
Dim ACRData As ACRCClassLib.clsACR.ACRdata
Dim PavementType As ACRCClassLib.clsACR.PavementType
Dim Gross_Wt, Percent_GW, Tire_Pressure As Single
Dim No_Wheels As Integer
Dim X1(), Y1() As Single
Dim SW() As Integer
Dim Metric As Boolean
```

2.3.3 Attribution de valeurs numériques aux variables d'entrée déclarées. La variable booléenne Métrique est VRAI pour les unités métriques, FAUX pour les unités des États-Unis. La figure A2-1 explique comment utiliser la variable SW(), qui indique au programme s'il faut inclure une roue donnée dans les limites de la grille de points d'évaluation (voir § 1.1.3.12). Dans ICAO-ACR, une valeur de 1 attribuée à SW signifie que la roue est incluse dans la zone de la grille des points d'évaluation de la déformation ; toute valeur différente de 1 est traitée comme 0. Il est à noter que *ACRCClassLib.dll* ne détermine pas le nombre correct de roues à inclure dans la grille de points d'évaluation de la déformation. Cette détermination doit être faite par le programme appelant, par référence aux orientations du § 1.1.3.12. Il est également à noter que la variable SW ne contrôle que le sous-groupe de roues du train principal qui définit la grille de points d'évaluation de la déformation, et non le nombre de roues utilisé pour déterminer l'ACR. *ACRCClassLib.dll* détermine la valeur ACR de toutes les roues qui lui sont transmises (No_Wheels). (Dans la figure A2-1, si toutes les roues 1 à 8 étaient attribuées à SW = 1, la différence des valeurs ACR calculées serait insignifiante. Cependant, le calcul prendrait beaucoup plus de temps.)

2.3.4 Fonction d'appel CalculateACR. Le fragment de code Visual Basic suivant appelle la fonction CalculateACR.

```
Dim RunACR As ACRCClassLib.clsACR
RunACR = New ACRCClassLib.clsACR()

ACRData = RunACR.CalculateACR(PavementType, Gross_Wt, Percent_GW, No_Wheels,
Tire_Pressure, X1, Y1, SW, Metric)
```

$$SW = \begin{cases} 1(\text{roues } 1 - 4) \\ 0(\text{roues } 5 - 8) \end{cases}$$

3. PROGRAMME ICAO-ACR

3.1 Le programme ICAO-ACR fonctionne comme un programme autonome qui calcule les valeurs ACR souples et rigides pour des configurations de train d'atterrissage arbitraires, en utilisant la DLL *ACRCClassLib.dll*. Pour plus de commodité, le programme comprend une bibliothèque de types d'aéronefs couramment utilisés. Pour les aéronefs de la bibliothèque, le programme ICAO-ACR sélectionne automatiquement le nombre correct de roues pour l'évaluation de l'ACR, c'est-à-dire toutes les roues du train d'atterrissage principal pour l'ACR souple et toutes les roues du bogie simple le plus exigeant pour l'ACR rigide.

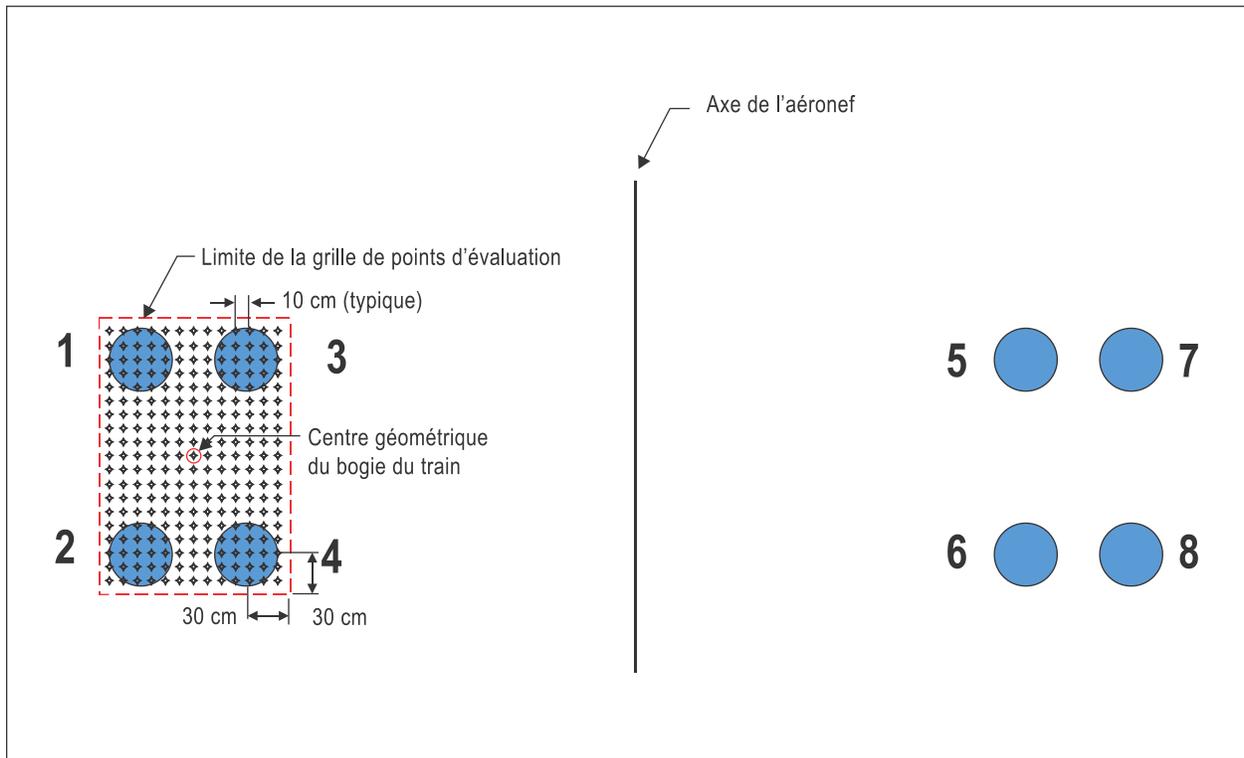


Figure A2-1. Explication de la variable SW pour les trains 2D

Appendice 3

MODÈLE D'ENDOMMAGEMENT POUR ACR SOUPLE

1. LOI D'ENDOMMAGEMENT ÉLÉMENTAIRE

1.1 La procédure ACR souple s'appuie sur le critère de rupture du terrain de fondation associé à la loi d'endommagement élémentaire :

$$\log_{10}(C_e) = (-0,1638 + 185,19 \varepsilon)^{-0,60586}$$

où C_e 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 .

1.2 Le dommage élémentaire D_e est alors défini comme suit :

$$D_e(\varepsilon) = \frac{1}{C_e(\varepsilon)}$$

2. CHARGES DE TRAINS À ESSIEUX MULTIPLES

2.1 Les trains d'atterrissage modernes comportent souvent des groupes de roues à plusieurs essieux qui produisent des profils de déformation complexes dans la chaussée, avec éventuellement plusieurs pics de déformation et aucun retour à zéro entre les pics. À titre d'exemple, la figure A3-1 décrit le profil de l'historique des déformations pour une structure de chaussée (c'est-à-dire la trace de toutes les valeurs de déformation le long d'un profil longitudinal sous le train d'atterrissage).

2.2 En raison de l'interaction entre les essieux en tandem, la déformation qui rend le CDF égal à 1,0 pour 36 500 passages de l'aéronef d'évaluation sera généralement différente de celle donnée par la loi d'endommagement élémentaire ci-dessus, qui est fondée sur le concept de cycles de charge. Par conséquent, l'équation ci-dessus ne peut pas être utilisée directement.

3. FORME INTÉGRALE CONTINUE DE LA LOI D'ENDOMMAGEMENT

3.1 Afin de prendre en compte les profils de déformation complexes induits par les charges sur les trains à essieux multiples, la loi d'endommagement élémentaire est étendue à une forme intégrale continue grâce à la loi de Miner et au facteur de pic simple équivalent (ESP) introduit par Jean Maurice Balay et Cyril Fabre (2009).

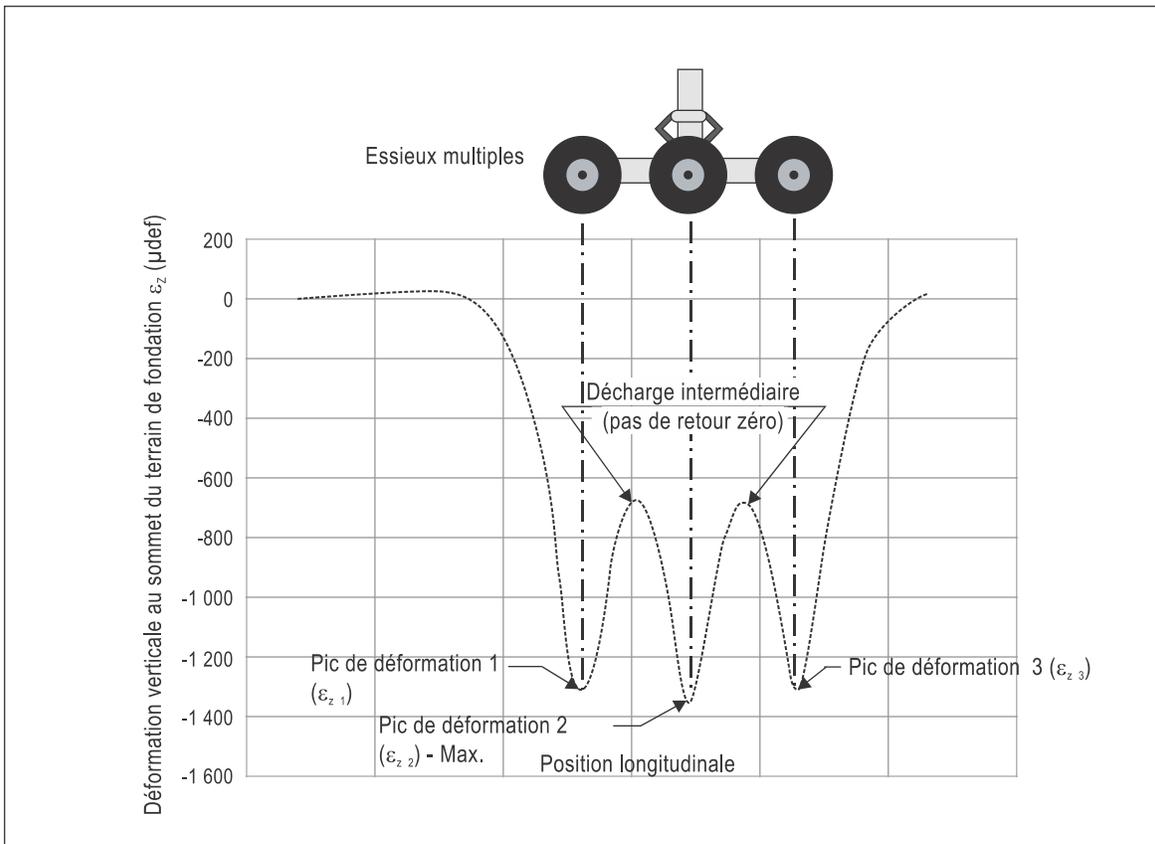


Figure A3-1. Exemple de réponse à la déformation induite par un train à essieux multiples

3.2 L'endommagement D_1 pour un seul passage de l'aéronef produisant un profil de déformation longitudinale $\varepsilon(x)$ est ensuite calculé comme suit :

$$D_1 = \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \left\langle \frac{dD_e(x)}{dx} \right\rangle dx = \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \frac{dD_e(\varepsilon)}{d\varepsilon} \left\langle \frac{d\varepsilon(x)}{dx} \right\rangle dx$$

où x désigne la position longitudinale le long du profil de déformation et $\langle z \rangle$ est la partie positive de z

$$\langle z \rangle = \begin{cases} 0, & z \leq 0 \\ z, & z > 0 \end{cases}$$

3.3 La position longitudinale x ne joue pas un rôle explicite dans cette équation ; par conséquent, toute autre paramétrisation à croissance monotone (p. ex. le temps) conduirait au même résultat.

3.4 Pour le cas spécifique d'un profil de déformation à pic simple avec une amplitude maximale ε_{max} , D_1 se réduit à la loi d'endommagement élémentaire $D_1 = D_e(\varepsilon_{max})$. Pour un profil de déformation arbitraire, il est donc possible de calculer une déformation équivalente à un pic simple ε_{eq} qui produirait le même dommage que le profil entier : $D_1 = D_e(\varepsilon_{eq})$.

3.5 Sur la base de cette équivalence, le rapport de pic simple équivalent (ESP) est alors défini comme le nombre de passages qui seraient nécessaires à un aéronef virtuel produisant un profil de déformation à pic simple de valeur maximale ε_{eq} pour causer le même dommage qu'un passage d'un aéronef virtuel produisant un profil de déformation à pic simple de valeur maximale ε_{max} , comme indiqué ci-dessous.

Note.— Pour un profil à pic simple, $\varepsilon_{eq} = \varepsilon_{max}$ et l'ESP est de 1.

$$ESP = \frac{C_e(\varepsilon_{eq})}{C_e(\varepsilon_{max})} = \frac{D_e(\varepsilon_{max})}{D_e(\varepsilon_{eq})} \leq 1$$

3.6 L'endommagement total D produit par N passages d'aéronefs est maintenant donné par l'équation suivante :

$$D = N \times D_e(\varepsilon_{eq}) = N \times \frac{1}{ESP} \times D_e(\varepsilon_{max}) = N \times \frac{1}{ESP} \times \frac{1}{C_e(\varepsilon_{max})}$$

3.7 Si la composante longitudinale du rapport passage/couverture (P/C) est utilisée, une expression équivalente de D est :

$$D = N \times \frac{1}{P/C} \times \frac{1}{C_e(\varepsilon_{max})}$$

3.8 Les rapports pic simple équivalent et P/C sont donc fonctionnellement équivalents ; ils représentent tous deux l'effet de répétition de la charge dû aux roues en tandem en l'absence de déviation latérale.

3.9 En substituant la loi d'endommagement élémentaire en D_1 , la forme intégrale peut être exprimée comme suit :

$$D_1 = bc * \ln(10) \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} [(a + b\varepsilon)^{c-1} * 10^{(a+b\varepsilon)^c}] < \frac{d\varepsilon(x)}{dx} > dx$$

où a, b et c sont les paramètres de la loi d'endommagement élémentaire :

$$\begin{aligned} a &= -0,1638 \\ b &= 185,19 \\ c &= -0,60586 \end{aligned}$$

3.10 On peut vérifier que la forme intégrale ci-dessus est équivalente à :

$$D_1 = \sum_{k=1}^n s_k D_e(\varepsilon_k)$$

où ε_k sont les extrema de déformation du profil longitudinal et s_k est un facteur caractérisant le type d'extremum :

$$s_k = \begin{cases} 1 & \text{si } \varepsilon_k \text{ est un maximum local} \\ -1 & \text{si } \varepsilon_k \text{ est un minimum local} \end{cases}$$

3.11 Il faut noter que pour le cas spécifique d'un profil de déformation à pic simple avec une valeur maximale ε_{max} , la forme intégrale se réduit à la loi d'endommagement élémentaire. $D_1 = D_e(\varepsilon_{max})$.

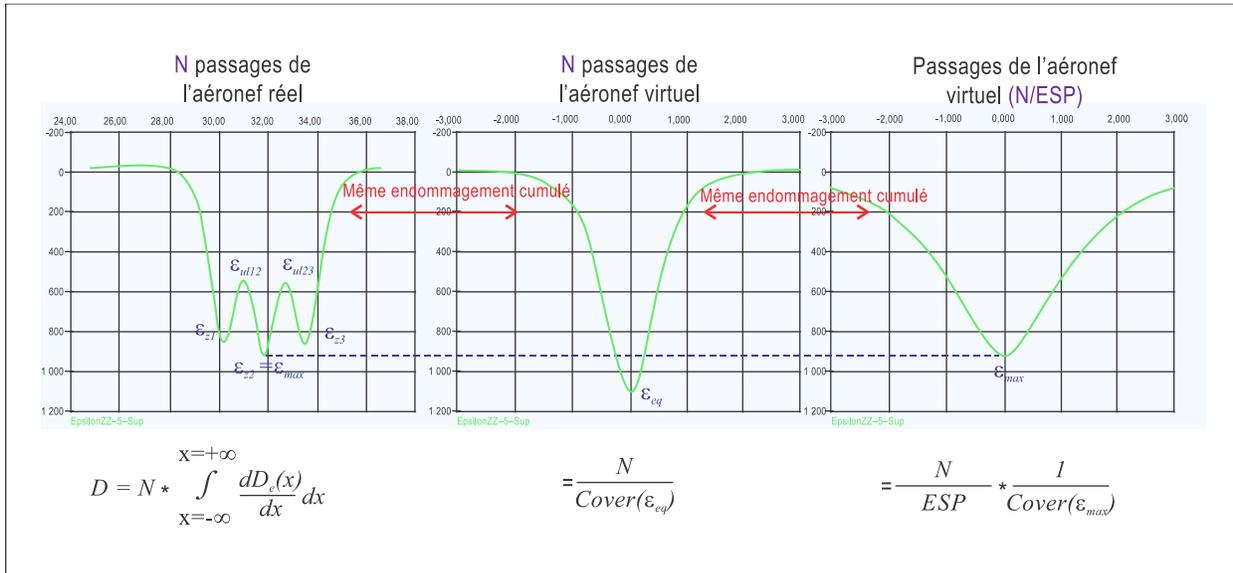


Figure A3-2. Relation entre ε_max, ε_eq et pic simple équivalent

4. MODÈLE D'ENDOMMAGEMENT POUR ACR SOUPLE

- 4.1 La forme intégrale continue de la loi d'endommagement est adoptée pour le calcul de l'endommagement de la chaussée dans la procédure ACR souple.
- 4.2 Cette procédure est appliquée dans le programme informatique ICAO-ACR.

Appendice 4

Page laissée intentionnellement en blanc

Appendice 5

Page laissée intentionnellement en blanc

Appendice 6

ORIENTATIONS RELATIVES À L'EXPLOITATION ET À L'ENTRETIEN DES CHAUSSÉES

Note.— Le Doc 9157 a été consacré aux questions de conception. Toutefois, la deuxième édition (1983) de sa partie 3 — Chaussées comprenait plusieurs sections d'éléments indicatifs axés sur l'exploitation et l'entretien. En raison de la nature non conceptuelle de ces sujets, ceux-ci relèvent davantage de documents tels que les Procédures pour les services de navigation aérienne — Aérodomes (PANS-Aérodomes, Doc 9981) ou le Manuel des services d'aéroport (Doc 9137). Cependant, afin de faciliter leur future relocalisation, les orientations en question ont été mises à jour et compilées dans le présent appendice, dont le contenu est le suivant :

- 1) *programme de gestion des chaussées (PMP) (déplacement possible vers le Doc 9137, partie 9, chapitre 1, nouvelle section 1.6) ;*
- 2) *méthodes permettant d'améliorer et de maintenir la texture superficielle des pistes (Doc 9157, deuxième édition, chapitre 5) et caractéristiques magnétiques des chaussées (nouveau) ;*
- 3) *protection des chaussées à revêtement d'asphalte (Doc 9157, deuxième édition, chapitre 6) ;*
- 4) *construction de revêtements de chaussée pendant les fermetures d'exploitation (Doc 9157, deuxième édition, chapitre 8).*

1. PROGRAMME DE GESTION DES CHAUSSÉES (PMP)

1.1 Dans l'Annexe 14, volume I, chapitre 10, l'exigence d'un programme d'entretien a été établie comme une norme, y compris l'entretien préventif, rendant ainsi la mise en place d'un programme d'entretien des chaussées (PMP) obligatoire.

1.2 La prolongation de la durée de vie des chaussées au moyen d'un programme régulier, pour une flotte d'aéronefs en constante évolution, nécessite des techniques d'entretien plus sophistiquées, telles que le PMP. À titre d'entretien préventif, il sera souhaitable de mettre en œuvre un PMP, s'il y a lieu, pour maintenir les chaussées/installations d'aérodrome dans un état qui ne porte pas atteinte à la sécurité, à la régularité ou à l'efficacité de la navigation aérienne.

1.3 Un PMP est un ensemble de procédures définies pour la collecte, l'analyse, la mise à jour et la publication de données sur les chaussées, afin d'aider les décideurs à trouver des stratégies optimales pour maintenir les chaussées en bon état de fonctionnement pendant une période donnée et au moindre coût. Un PMP devrait prendre en compte :

- a) les procédures d'inspection et l'évaluation de l'état ;
- b) les protocoles et procédures d'entretien ;
- c) la gestion et la supervision des travaux achevés ;

- d) la compétence nécessaire du personnel (facteurs humains).

1.4 En fonction de la complexité des aires non revêtues d'un aérodrome, un PMP comporterait au minimum les fonctions suivantes :

- a) l'inventaire des chaussées (évaluation de l'état des chaussées, historique des chaussées, trafic, coûts) ;
- b) l'évaluation de l'état de la chaussée [p. ex. ASTM D5340-12 Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys — PCI (méthode d'essai normalisée pour les relevés de l'indice de l'état de la chaussée d'aérodrome)].

1.5 Les fonctions supplémentaires pourraient comprendre :

- a) la modélisation pour prévoir les conditions futures — analyse (évaluation de l'aptitude au service, prévisions de performance, analyses économiques — budget/programmation) ;
- b) le rapport des performances de la chaussée (passées et futures) ;
- c) l'entretien et la réfection des chaussées (planification, programmation, budget et analyse des solutions de remplacement) ;
- d) la planification de projet.

2. MÉTHODES PERMETTANT D'AMÉLIORER ET DE MAINTENIR LA TEXTURE SUPERFICIELLE DES PISTES ET CARACTÉRISTIQUES MAGNÉTIQUES DES CHAUSSÉES

2.1 Objet

2.1.1 L'Annexe 14 recommande que la surface des pistes avec revêtement soit construite ou remise en état de manière à assurer un coefficient de frottement de surface égal ou supérieur au niveau de frottement minimal fixé par l'État. Les dispositions supplémentaires comprennent des spécifications recommandées pour la configuration des surfaces de piste en ce qui concerne les pentes transversales et longitudinales, l'uniformité et la texture de surface. Le présent chapitre fournit des indications sur les méthodes éprouvées permettant d'améliorer la texture et le drainage de la surface des pistes.

2.1.2 Le présent chapitre définit également les moyens d'atténuer les distorsions de champ magnétique potentiellement dangereuses induites par des masses métalliques dans ou sous les chaussées d'aérodrome et la magnétisation des mailles, des tirants et des goujons d'armature en acier par l'utilisation répétée de dispositifs magnétiques pour nettoyer la surface de la chaussée.

2.2 Considérations de base

Historique

2.2.1 Le phénomène de l'aquaplanage, auquel ont été imputés un certain nombre d'incidents et d'accidents d'aviation, est l'un des problèmes opérationnels par temps de pluie les plus importants et les plus potentiellement dangereux.

2.2.2 Pour atténuer l'aquaplanage, de nouvelles chaussées de piste ont été mises au point ; ces chaussées ont une texture superficielle et des caractéristiques de drainage supérieures. L'expérience a démontré que ces types de chaussée, tout en réduisant effectivement les risques d'aquaplanage, assurent un coefficient de frottement sensiblement plus élevé toutes les fois que de l'eau est présente sur la piste, que celle-ci soit simplement humide ou inondée.

2.2.3 Les méthodes décrites dans la présente section pour améliorer la texture et le drainage de la surface des pistes se sont avérées efficaces pour améliorer les performances de surface des pistes.

Critères fonctionnels

2.2.4 Une piste, considérée dans son ensemble, doit remplir les trois fonctions de base suivantes, à savoir :

- a) offrir une force portante adéquate ;
- b) faciliter le roulage ;
- c) présenter une bonne adhérence.

La première fonction en a) ci-dessus est remplie par la structure de la chaussée, la deuxième en b) par la forme géométrique de sa partie supérieure et la troisième en c) par la texture de la surface elle-même.

2.2.5 Ces trois critères doivent nécessairement être respectés si l'on veut construire une chaussée qui assure les fonctions exigées pour l'exploitation. De ce point de vue, cependant, le fait de présenter une bonne adhérence (troisième critère) est le plus important parce qu'il a une incidence directe sur la sécurité de l'exploitation, et éventuellement sur sa régularité et son efficacité. Le coefficient de frottement peut donc devenir un facteur décisif lorsqu'il s'agit de choisir le type et la forme de revêtement les plus appropriés.

2.2.6 L'attention des concepteurs et des gestionnaires de chaussées d'aérodrome est attirée sur le suivi des tendances des caractéristiques de frottement de surface figurant dans l'Annexe 14, volume I, chapitre 10. La figure A6-1 présente un concept de suivi des tendances des caractéristiques de frottement de la surface de piste.

2.2.7 L'objectif est de veiller à ce que les caractéristiques de frottement de la surface de l'ensemble de la piste restent égales ou supérieures à un niveau de frottement minimal spécifié par l'État.

2.2.8 Les critères fixés par l'État pour les caractéristiques de frottement des surfaces et les résultats des méthodes d'évaluation fixées par l'État ou convenues constituent la référence à partir de laquelle les concepts de surveillance des tendances sont réalisés et évalués.

2.2.9 L'attention des concepteurs et des gestionnaires des chaussées d'aérodrome est attirée sur les distorsions du champ magnétique éventuellement induites par les chaussées d'aérodrome, qui pourraient interférer avec les systèmes de navigation des aéronefs.

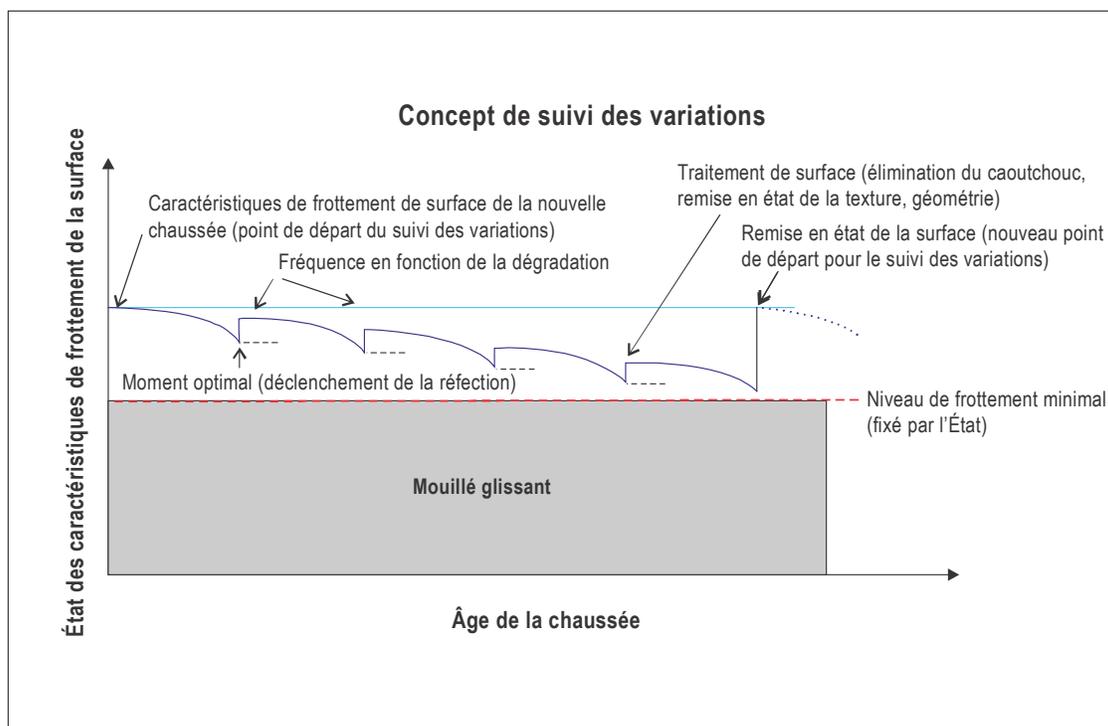


Figure A6-1. Concept de suivi des tendances

Identification du problème

2.2.10 Lorsqu'elles sont sèches et propres, les pistes ont généralement des caractéristiques de frottement comparables ; quels que soient le type de revêtement (asphalte/béton) et la configuration de la surface, les différences entre les coefficients de frottement sont peu significatives du point de vue de l'exploitation. De plus, le frottement dépend relativement peu de la vitesse de l'avion. Par conséquent, les conditions d'exploitation sur pistes sèches sont assez uniformes et aucun critère technique particulier concernant le frottement superficiel n'est nécessaire dans ce cas.

2.2.11 Par contre, lorsque la surface de la piste est plus ou moins mouillée (qu'elle soit simplement humide ou inondée), la situation est entièrement différente. Dans ce cas, le coefficient de frottement diminue considérablement par rapport au coefficient sur piste sèche et varie beaucoup selon le type de surface. Cette variation dépend du type de revêtement, des caractéristiques superficielles (texture) et des caractéristiques de drainage (forme). La réduction du frottement (qui est particulièrement évidente lorsque les aéronefs atteignent des vitesses élevées) peut avoir de graves répercussions sur la sécurité, la régularité et l'efficacité de l'exploitation. Ces répercussions sont d'autant plus graves que l'écart entre le frottement nécessaire et celui obtenu est grand.

2.2.12 La réduction du coefficient de frottement qui se manifeste lorsque la surface est mouillée et lorsque la vitesse de l'aéronef augmente s'explique par l'effet conjugué des pressions visqueuse et dynamique de l'eau dans la zone de contact entre le pneu et la surface. Ces pressions ont pour effet de réduire le contact « à sec », effet qui tend à s'aggraver à mesure que la vitesse augmente. Dans certaines conditions, la perte de contact est pratiquement complète et le frottement est négligeable : suivant le cas on parle alors d'aquaplanage visqueux, d'aquaplanage dynamique ou d'aquaplanage accompagné de dévulcanisation du caoutchouc. La figure A6-2 illustre la façon dont ces phénomènes touchent les différentes zones de contact entre la surface et les pneus et les changements de dimensions de ces zones en fonction de la vitesse.

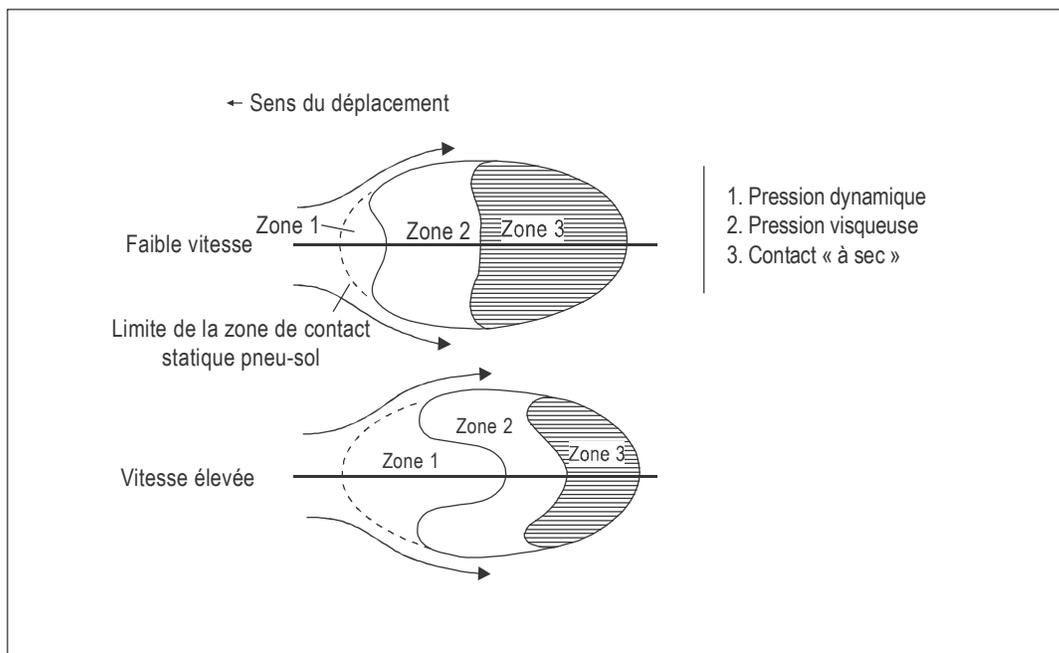


Figure A6-2. Zones de contact entre le pneu et la surface de la piste

Zones peintes sur la surface des chaussées

2.2.13 Les zones peintes sur les surfaces mouillées du revêtement de la piste peuvent être très glissantes. En outre, les aéronefs dont un train principal se trouve sur une surface peinte et l'autre sur une surface non peinte peuvent subir un freinage différentiel. Il est important de maintenir les propriétés antidérapantes des surfaces peintes au même niveau que celles des surfaces non peintes environnantes. Cela consiste généralement à ajouter une petite quantité de sable de silice au mélange de peinture.

Objectifs de la construction des chaussées

2.2.14 Étant donné ce qui précède, on peut formuler de la façon suivante les objectifs auxquels doit répondre la construction des pistes (ces objectifs s'appliquent aussi à l'entretien) :

Une piste devrait être construite et entretenue de façon à présenter une surface qui réponde de façon appropriée à tous les besoins fonctionnels, pendant toute la durée de vie prévue de la chaussée, notamment :

- a) assurer, dans toutes les conditions prévues d'humidité, des coefficients de frottement élevés et des caractéristiques de frottement uniformes ;
- b) réduire au minimum les risques d'aquaplanage sous toutes ses formes (visqueux, dynamique et de dévulcanisation). Des renseignements sur ces types d'aquaplanage figurent dans le Doc 9137, 2^e partie — État de la surface des chaussées.

2.2.15 Le niveau adéquat de frottement sur piste mouillée est étroitement lié aux caractéristiques de drainage de la surface de piste. Le besoin de drainage est, à son tour, déterminé par le taux local de précipitation. C'est cet élément,

variable localement, qui déterminera essentiellement les mesures techniques et les investissements nécessaires pour atteindre l'objectif. En général, plus le besoin de drainage est grand, plus il sera nécessaire d'interpréter et d'appliquer de façon stricte les critères techniques pertinents.

Critères de construction

2.2.16 Le problème du frottement sur piste mouillée peut être assimilé à un problème général d'écoulement de l'eau, qui peut se décomposer en trois éléments distincts :

- a) écoulement de surface (forme de la surface) ;
- b) écoulement dans la zone de contact entre la surface et le pneu (macrotecture) ;
- c) écoulement par pénétration (microtexture).

Ces trois éléments peuvent être modifiés de façon significative par les mesures techniques prises et doivent être réunis si l'on veut obtenir un frottement adéquat dans toutes les conditions possibles d'humidité (de la surface humide à la surface inondée).

Écoulement de surface

2.2.17 L'écoulement de surface est une nécessité fondamentale. Il sert à diminuer l'épaisseur de la nappe d'eau recouvrant la surface, en particulier dans la zone de passage des roues. L'objectif est de chasser l'eau de la piste, en particulier de la zone de passage des roues, suivant le chemin le plus court. L'écoulement de surface est principalement assuré par une pente appropriée (tant dans le sens longitudinal que transversal) et par la régularité de la surface. L'évacuation de l'eau peut aussi être améliorée par d'autres mesures, par exemple en pratiquant des rainures peu espacées dans le sens transversal ou en drainant l'eau dans les cavités d'une couche d'usure spécialement traitée (couche de frottement poreuse). Il importe cependant de bien comprendre que ces autres mesures (telles que le rainurage de la piste) ne peuvent compenser une mauvaise forme de la piste, qu'elle soit due au profil inadéquat de la pente ou à l'irrégularité de la surface. Cette considération peut être importante lorsqu'il faut décider de la méthode la plus efficace pour améliorer les performances de surface d'une piste existante.

Écoulement dans la zone de contact entre la surface et le pneu (macrotecture)

2.2.18 L'écoulement de l'eau dans la zone de contact (sous un pneu en mouvement) a deux objectifs :

- a) empêcher autant que possible les eaux résiduelles de surface de pénétrer dans la partie antérieure de la zone de contact ;
- b) chasser l'eau qui pénètre dans cette zone vers l'extérieur.

L'objectif est d'obtenir un taux élevé d'évacuation de l'eau sous le pneu, tout en évitant le plus possible l'accroissement de la pression dynamique. Il a été établi que cet objectif pouvait être atteint grâce à une surface à macrotecture ouverte.

2.2.19 Le drainage de la zone de contact est en réalité un processus dynamique qui dépend dans une grande mesure du carré de la vitesse. La macrotecture revêt donc une importance particulière si l'on veut assurer un frottement adéquat à grande vitesse. Du point de vue de l'exploitation, cet aspect importe surtout parce que c'est justement à grande vitesse que l'insuffisance du frottement a une influence cruciale sur la distance d'arrêt et la stabilité directionnelle de l'aéronef.

2.2.20 Il convient ici d'établir une comparaison entre les textures utilisées dans la construction des routes et des pistes. Les textures lisses des revêtements routiers permettent un drainage adéquat de l'empreinte des pneus d'automobile grâce aux sculptures des pneus, qui contribuent de façon importante à assurer le drainage de la zone de contact. Par contre, les pneus d'aéronefs ne peuvent être dotés de telles sculptures et ne portent que quelques rainures circulaires dont l'effet de drainage est nettement moindre. En outre, leur efficacité diminue relativement vite à l'usure. Toutefois, le facteur le plus important qui explique la nécessité de la macrotexture est la vitesse, qui est beaucoup plus élevée dans le cas des aéronefs. Tout cela peut expliquer pourquoi certaines surfaces de piste classiques, construites selon des spécifications semblables à celles des revêtements routiers (à texture relativement fermée) ont un coefficient de frottement en présence d'eau qui chute fortement lorsque la vitesse augmente, de sorte qu'elles présentent souvent un risque d'aquaplanage dynamique même lorsque la nappe d'eau est relativement peu épaisse.

2.2.21 On peut donner aux revêtements de béton de ciment la macrotexture voulue en utilisant l'une des nombreuses méthodes disponibles pour appliquer les caractéristiques de la macrotexture à la surface pendant le processus de finition, comme la finition à la brosse ou au balai ou la finition à la toile de jute. Dans le cas de l'asphalte, la macrotexture peut être obtenue par la sélection d'un granulats approprié (du point de vue de la taille, de la gradation, de la résistance au polissage et à l'usure et de la forme) ou en utilisant des surfaces à granulométrie ouverte.

2.2.22 Un critère supplémentaire de construction est que la texture de surface soit la plus uniforme possible. Cette condition est importante car elle permet d'éviter des variations trop grandes du coefficient de frottement, de telles variations pouvant diminuer l'efficacité du freinage antidérapant ou causer des dégâts aux pneus.

2.2.23 Les méthodes qui améliorent la macrotexture et/ou sont efficaces pour réduire le risque d'aquaplanage sont décrites à la section 2.3.

Écoulement par pénétration (microtexture)

2.2.24 Le but de l'écoulement par pénétration est d'établir un contact « sec » entre les aspérités de la surface et la sculpture du pneu en présence d'un film d'eau visqueux et mince. Les pressions visqueuses qui augmentent avec la vitesse ont tendance à empêcher un contact direct entre le pneu et la surface, sauf aux endroits où les aspérités percent le film visqueux. Ce genre de rugosité est appelé microtexture.

2.2.25 La microtexture est due aux petites aspérités des granulats de la surface et elle est difficilement discernable à l'œil nu, mais on peut l'évaluer au toucher. En conséquence, une microtexture adéquate peut être fournie par un choix judicieux de granulats à surface rugueuse. Cette condition élimine notamment tous les granulats polissables.

2.2.26 La macrotexture et la microtexture sont des éléments essentiels du frottement sur surface mouillée, c'est-à-dire que les deux doivent présenter les caractéristiques voulues pour assurer une adhérence satisfaisante dans toutes les conditions où de l'eau est présente sur la piste. Les effets combinés de la microtexture et de la macrotexture d'une surface sur le rapport entre le frottement sur piste mouillée et la vitesse sont illustrés à la figure A6-3 qui montre aussi que l'objectif défini au § 2.2.14 peut être réalisé par des moyens techniques.

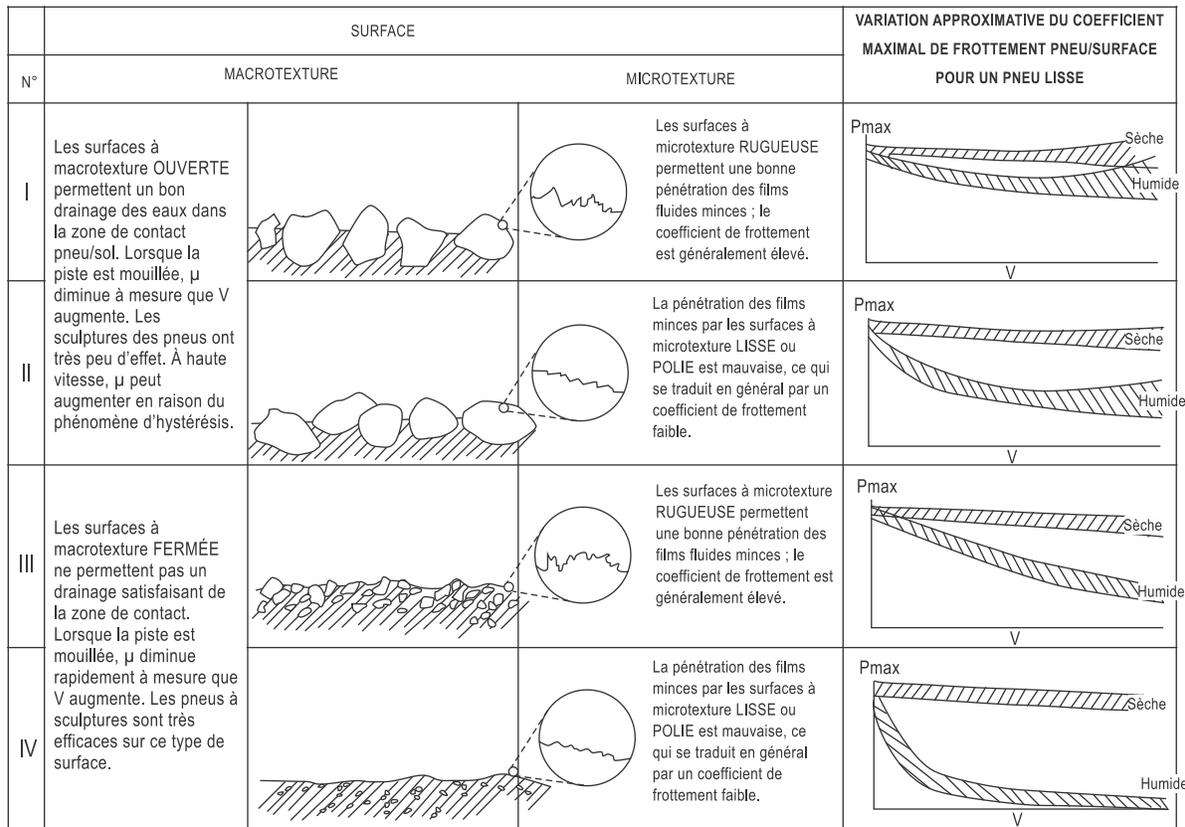


Figure A6-3. Effets de la texture superficielle sur le coefficient de frottement pneu/surface

2.2.27 L'une des principales difficultés concernant la microtexture est que celle-ci peut changer rapidement avec le temps (contrairement à la macrotexture) sans que l'on puisse s'en rendre compte facilement. Un exemple caractéristique de ce qui précède est l'accumulation dans la zone de toucher des roues de dépôts de caoutchouc qui couvriront en grande partie la microtexture sans obligatoirement altérer la macrotexture. Cette couche peut diminuer de façon appréciable le coefficient de frottement. On peut pallier cette difficulté en effectuant des mesures de frottement qui renseignent sur la qualité de la microtexture existante. Si l'on estime que la faible valeur du coefficient de frottement est due à l'altération de la microtexture superficielle, des méthodes sont disponibles pour redonner une microtexture satisfaisante aux surfaces existantes (voir section 2.3).

Spécifications minimales

2.2.28 Les spécifications techniques de base concernant la forme géométrique (pente longitudinale/pente transversale/régularité de la surface) et la texture (macrotexture) d'une surface de piste figurent dans l'Annexe 14, volume I.

Pentes

2.2.29 Toute nouvelle piste devrait être conçue de façon à présenter un profil transversal uniforme conforme aux recommandations de l'Annexe 14, volume I, relatives à la pente transversale et un profil longitudinal aussi horizontal que

possible. Une coupe transversale bombée à partir d'une crête centrale est préférable ; si pour une raison quelconque cela n'est pas possible, la pente uniforme devrait être soigneusement calculée pour tenir compte des vents dominants porteurs de pluie de façon à s'assurer que l'écoulement de l'eau de surface ne soit pas gêné par un vent soufflant à contre-pente (dans le cas d'une pente transversale uniforme, il peut s'avérer nécessaire à certains endroits de prévoir un drainage de protection le long du bord de piste le plus élevé pour empêcher que l'eau de ruissellement provenant des accotements ne déborde sur la surface de la piste). Un bon drainage est surtout nécessaire dans la zone de toucher des roues parce qu'un aquaplanage commencé à ce stade de l'atterrissage peut se poursuivre sur des nappes d'eau beaucoup moins profondes, plus loin le long de la piste.

2.2.30 Si les critères géométriques ci-dessus sont satisfaits, les incidents dus à l'aquaplanage seront réduits au minimum alors que tout écart augmentera la probabilité d'aquaplanage, quel que soit le coefficient de frottement de la surface de la piste. Ces remarques s'appliquent aussi aux projets de réfection importants et, de plus, il faudrait, chaque fois que cela est possible, profiter de toute réfection des surfaces pour améliorer les pentes afin de faciliter le drainage superficiel. Toute amélioration dans ce domaine, aussi minime soit-elle, est utile.

Uni

2.2.31 L'uni est un aspect de la forme de la piste qui doit également faire l'objet de beaucoup de soins, car il contribue aussi au bon roulage des aéronefs à grande vitesse.

2.2.32 Les dispositions relatives à l'uni figurent à l'Annexe 14, volume I, supplément A, section 5 et correspondent à une construction soignée. L'inobservation de ces spécifications minimales peut se traduire par un mauvais écoulement des eaux de surface et la formation de flaques. Cette situation peut se produire sur des pistes déjà vieilles à la suite d'un tassement inégal ayant entraîné une déformation permanente de la surface. Les spécifications relatives à l'uni ne s'appliquent pas seulement à la construction de revêtements neufs, mais doivent être respectées aussi longtemps que le revêtement existe. La déformation superficielle maximale tolérable devrait être l'un des critères essentiels de la conception des chaussées. Ce critère peut avoir une grande importance pour déterminer le type le plus approprié de construction et de revêtement.

2.2.33 En ce qui concerne la prédisposition à la formation de flaques dues aux irrégularités de surface, les pistes dont les pentes transversales sont voisines du maximum autorisé sont beaucoup moins affectées que celles sur lesquelles ces pentes sont à peine marquées. Pour corriger le problème de façon efficace, il faut normalement refaire la surface et modifier le profil de la piste.

Texture superficielle

2.2.34 Les spécifications concernant la macrotexture superficielle sont mentionnées à l'Annexe 14, volume I, qui stipule que la profondeur moyenne de la texture ne devrait pas être inférieure à 1 mm pour les nouvelles surfaces. La valeur minimale pour la profondeur moyenne de la texture a été obtenue de façon empirique et correspond au minimum absolu nécessaire pour permettre un écoulement satisfaisant dans la zone de contact entre la surface et le pneu. Là où le taux et l'intensité des précipitations sont des facteurs critiques, une profondeur moyenne plus grande peut être nécessaire. Les surfaces pour lesquelles la profondeur moyenne de la texture est inférieure au minimum auront des caractéristiques de frottement insuffisantes en présence d'eau, surtout si la piste est utilisée par des aéronefs à vitesse d'atterrissage élevée. Il est par conséquent absolument nécessaire de remédier à cette situation. Les méthodes permettant d'améliorer les performances de surface des pistes sont données à la section 2.3.

2.2.35 Comme il l'a été dit ci-dessus, l'uniformité de la texture est aussi un critère important. À cet égard, il existe plusieurs types de surface qui présentent les caractéristiques voulues (voir section 2.3). Ces surfaces auront normalement une profondeur moyenne de texture supérieure à 1 mm.

2.2.36 La macrotexture d'une surface ne change généralement pas de façon significative avec le temps, sauf pour la zone de toucher des roues où l'on trouve des dépôts de caoutchouc. Par conséquent, un contrôle périodique de la texture superficielle sur les parties non contaminées de la piste ne sera nécessaire qu'à de longs intervalles.

2.2.37 En ce qui concerne la microtexture, il n'y a pas de mesure directe qui définisse techniquement le degré de rugosité de chaque granulat à l'échelle microscopique. Par conséquent, aucune spécification appropriée ne figure à ce sujet dans l'Annexe 14, volume I. Cependant, l'on sait par expérience qu'un bon granulat doit présenter une surface rugueuse aux arêtes vives qui permettent la pénétration du film d'eau. Il est aussi important que le granulat soit visible en surface et qu'il ne soit pas recouvert complètement d'un matériau lisse. Du fait que la microtexture est un élément essentiel du frottement sur surface mouillée, et ceci indépendamment de la vitesse, la microtexture d'une surface particulière peut généralement être évaluée par des mesures de frottement. Un manque de microtexture provoquera une baisse significative du coefficient de frottement à toutes les vitesses. Ce sera le cas même quand la surface sera simplement humide. Cette méthode plutôt qualitative peut être suffisante pour déterminer un manque de rugosité de la microtexture dans les cas les plus évidents.

2.2.38 Contrairement à la macrotexture, la microtexture peut subir une dégradation due à la circulation et aux intempéries sur une période relativement courte ; la microtexture peut aussi changer en fonction des conditions d'exploitation. En conséquence, des vérifications périodiques par mesure du coefficient de frottement doivent être effectuées assez fréquemment, surtout dans les zones de toucher des roues où les dépôts de caoutchouc masquent rapidement la microtexture.

Mesure du frottement de surface des pistes

2.2.39 L'Annexe 14, volume I, recommande que les surfaces de piste soient mesurées périodiquement à l'aide d'un dispositif de mesure du frottement en continu utilisant des caractéristiques d'auto-mouillage pour vérifier leurs caractéristiques de frottement quand elles sont mouillées. Ces caractéristiques de frottement ne doivent pas être inférieures aux niveaux minimaux spécifiés par l'État. Le tableau 3-1 du Doc 9137, 2^e partie, montre les critères utilisés dans certains États pour spécifier les caractéristiques de frottement des surfaces de pistes neuves ou remises en état, pour fixer des niveaux de planification de l'entretien et pour définir des niveaux de frottement minimaux.

2.2.40 Lors de la conception d'une nouvelle piste, l'application optimale des critères techniques de base pour la forme et la texture permet normalement d'obtenir un coefficient de frottement sur surface mouillée nettement supérieur au minimum spécifié. Si l'on envisage de s'écarter sensiblement des spécifications de base pour la forme ou la texture, il est conseillé, avant de faire un choix définitif, de mesurer le frottement de différents échantillons de surfaces mouillées de façon à déterminer l'influence relative de chaque paramètre. Le même principe s'applique si l'on envisage de modifier la texture superficielle d'une piste existante.

2.3 Amélioration des performances de surface des pistes

2.3.1 Les méthodes décrites dans la présente section sont fondées sur l'expérience acquise dans plusieurs États. Avant d'envisager d'appliquer une méthode particulière, il est important de procéder à une évaluation technique complète du revêtement existant ; il faut aussi que la méthode choisie s'applique aux types d'aéronefs qui vont utiliser la piste. Il convient de noter que des travaux de réfection ou la remise en état de la chaussée peuvent être parfois nécessaires avant l'application de la méthode d'amélioration si l'on veut que celle-ci soit efficace.

Rainurage des chaussées

2.3.2 Du point de vue opérationnel, il n'y a pas d'inconvénient à rainurer les surfaces existantes. L'utilisation d'aéronefs de tous types sur des revêtements d'asphalte rainuré depuis un certain nombre d'années indique qu'il n'y aura

probablement pas lieu d'introduire des limitations quant aux dimensions, au poids ou aux types d'aéronefs pour lesquels de tels revêtements donneront satisfaction. Une usure légèrement plus rapide des pneus dans certaines conditions d'utilisation n'a pu être confirmée.

2.3.3 Le rainurage peut se faire par fraisage des revêtements d'asphalte ou de béton de ciment Portland lorsqu'il s'agit de surfaces existantes ou de surfaces neuves suffisamment durcies (voir figure A6-4). Il est également possible de creuser des rainures ou de passer un peigne métallique sur un revêtement de béton de ciment Portland lorsqu'il est encore plastique. Avec les techniques actuelles, les rainures fraisées offrent une largeur, une profondeur et un parallélisme plus uniformes. Cette méthode est la plus efficace pour évacuer l'eau de la surface de contact entre le revêtement et le pneu. Il n'en demeure pas moins que le rainurage ou le traitement au peigne métallique sur surface plastique améliore aussi le drainage des revêtements superficiels. Ces méthodes sont moins coûteuses que le fraisage, surtout lorsque des granulats très durs entrent dans la composition du revêtement. Il faut par conséquent tenir compte du rapport coûts/avantages avant d'adopter la technique de rainurage appropriée à une piste particulière.

2.3.4 Les facteurs suivants doivent être pris en compte pour déterminer la nécessité de rainurer une piste :

- a) études de tous les accidents et incidents provoqués par l'aquaplanage sur la piste en question ;
- b) nombre de fois où la piste est mouillée (étude du taux et du niveau annuel des précipitations) ;
- c) pentes transversales et longitudinales, zones horizontales, creux, buttes ou toute autre caractéristique anormale ayant une influence sur l'écoulement des eaux ;
- d) qualité de la texture superficielle du point de vue de la glissance à sec ou en présence d'eau ; le polissage du granulat, la mauvaise qualité de l'enduit superficiel, une microtexture ou une macrotexture insuffisante et l'accumulation de contaminants, par exemple, peuvent entraîner une diminution du coefficient de frottement superficiel ;



**Figure A6-4. Rainurage d'une surface en asphalte
(l'échelle représente des intervalles de 2,5 cm)**

- e) contraintes topographiques, comme la présence d'un ravin en bout de piste ;
- f) nombre et longueur des pistes existantes ;
- g) effets des vents traversiers, surtout quand le coefficient de frottement est faible ;
- h) résistance et état du revêtement des pistes existantes.

Appréciation de l'état de la chaussée existante

2.3.5 Pour les surfaces en asphalte il faut vérifier si la couche d'usure est dense, stable et bien compactée. Si la surface montre des signes de désintégration ou si des particules de grandes dimensions provenant de granulats grossiers apparaissent à la surface, il faudra envisager d'autres méthodes ou procéder à une réfection du revêtement avant de rainurer la surface. Dans le cas des chaussées rigides il faudra s'assurer que la surface existante est en bon état, qu'elle ne s'écaille pas et qu'elle ne comporte ni éclats ni fractures « actives ». En dehors de l'état du revêtement lui-même, le rapport entre la pente transversale et la pente longitudinale revêt aussi une grande importance. Si la pente longitudinale est telle que l'eau s'écoule le long de la piste au lieu de s'évacuer rapidement par les drains de chaque côté, il peut arriver que les rainures se remplissent d'eau de ruissellement qui risque de favoriser l'aquaplanage si elle n'est pas évacuée rapidement. Pour la même raison, les surfaces comportant des dépressions doivent être réparées ou remplacées avant de procéder au rainurage.

Efficacité du traitement

2.3.6 Le rainurage transversal améliore la macrotecture de la surface de la piste, réduit l'épaisseur de la pellicule d'eau en cas de pluie et fournit un canal d'évacuation pour l'eau qui peut être piégée entre la surface de la chaussée et un pneu d'aéronef. Ces effets réduisent le risque d'aquaplanage des aéronefs dans des conditions humides. Le rainurage peut également améliorer les performances de freinage des aéronefs sur une piste mouillée par rapport à une piste mouillée non rainurée. Le rainurage présente toutefois des limites face à des eaux stagnantes profondes dues à de fortes pluies. En outre, l'accumulation de dépôts de caoutchouc dans les rainures réduira l'efficacité du rainurage, et l'élimination du caoutchouc doit être effectuée si nécessaire. L'amélioration liée au rainurage s'applique aux surfaces des chaussées en asphalte et en béton. Pour les chaussées en asphalte, la durée de cette amélioration dépend des propriétés de la couche d'usure en asphalte, du climat et du trafic.

Technique

2.3.7 La surface doit être rainurée perpendiculairement aux bords de la piste ou, le cas échéant, parallèlement aux joints transversaux si ceux-ci ne sont pas perpendiculaires à l'axe ; les rainures doivent être continues, d'un bord à l'autre de la piste. La machine utilisée à cette fin sera équipée de lames de scie diamantées capables de découper 0,5 m de largeur de multiples rainures parallèles en une seule passe, comme le montre la figure A6-5. Les machines à fraiser doivent comporter une citerne d'eau avec dispositif de projection sous pression. Les rainures ont en général 6 mm sur 6 mm avec un intervalle de 38 mm.



Figure A6-5. Rainurage au moyen de scies

2.3.8 Les rainures peuvent se terminer à 3 m du bord de la chaussée pour permettre le passage de l'équipement de rainurage. Il faut établir les tolérances pour l'alignement, la profondeur, la largeur et l'espacement des rainures. Les tolérances suggérées sont de ± 40 mm sur 22 m pour l'alignement, et de $\pm 1,5$ mm pour la profondeur ou la largeur moyenne. Les rainures doivent être interrompues à 75 mm au moins des joints transversaux. Les traits de scie diagonaux ou longitudinaux doivent être évités là où des câbles électriques sont installés. Les rainures peuvent couper les joints de construction longitudinaux. Il faut faire très attention lorsqu'on rainure à proximité de dispositifs d'éclairage et de câbles enterrés. Il est recommandé de réserver un dégagement de 60 cm de chaque côté des dispositifs d'éclairage pour éviter que la machine à rainurer ne les touche. Les contrats doivent spécifier la responsabilité de l'entrepreneur pour les dommages subis par les dispositifs d'éclairage et les câbles. Le nettoyage est extrêmement important et doit être continu pendant toute l'opération de rainurage. Les déchets recueillis doivent être enlevés au jet d'eau, par balayage ou par aspiration. Si on opte pour le jet d'eau, les spécifications doivent indiquer si c'est le propriétaire de l'aéroport ou l'entrepreneur qui est responsable de la fourniture de l'eau nécessaire aux opérations de nettoyage. Il faut éviter de déverser les déchets rassemblés au cours de l'opération de rainurage dans les égouts pluviaux ou les égouts sanitaires, car ces déchets finiraient par boucher les conduits. Si les déchets ne sont pas éliminés, cela peut créer des conditions dangereuses pour l'exploitation des aéronefs.

Détérioration des rainures

2.3.9 L'exploitant de l'aéroport devrait effectuer des inspections périodiques des rainures pour en mesurer la profondeur et la largeur afin de vérifier l'usure et les dommages. Lorsque 40 % des rainures de la piste ont une profondeur inférieure à la moitié de leur profondeur (1,5 ou 3 mm) et/ou largeur de conception sur une distance de 500 m, l'efficacité des rainures pour prévenir l'aquaplanage a été réduite, et une action corrective visant à rétablir la profondeur des rainures de 3 ou 6 mm est recommandée. Il se peut qu'il ne soit pas possible de rainurer à nouveau un revêtement en asphalte usé sans provoquer un risque de FOD ; il peut être nécessaire de refaire la surface et de rainurer sur toute la largeur.

Rainurage et traitement au peigne métallique des surfaces plastiques

2.3.10 On peut faire des rainures sur des revêtements neufs en béton de ciment Portland lorsqu'il est encore plastique. Le rainurage ou le traitement au peigne métallique de surfaces plastiques, comme illustré à la figure A6-6, peut être intégré aux autres opérations de construction du revêtement. Une section expérimentale devrait être construite pour évaluer le fonctionnement de l'équipement de rainurage, ou de traitement au peigne métallique, et pour établir une norme qui soit acceptable pour tout le revêtement.

Technique

2.3.11 Des tolérances devraient être établies pour l'alignement, la profondeur, la largeur et l'espacement des rainures effectuées sur surface plastique. Les tolérances suggérées sont les suivantes :

- a) $\pm 7,5$ mm sur 22 m pour l'alignement ;
- b) profondeur minimale 3 mm, profondeur maximale 9,5 mm ;
- b) largeur minimale 3 mm, largeur maximale 9,5 mm ;
- d) espacement minimal (d'axe à axe) 28 mm, espacement maximal 50 mm.

Les tolérances pour le traitement au peigne métallique devraient donner une configuration moyenne de 3 mm x 3 mm x 12 mm.

2.3.12 L'angle formé par la face verticale de la rainure et la surface du revêtement doit être droit, ou arrondi ou encore légèrement chanfreiné. Il faut disposer d'outils manuels dont la forme épouse la surface rainurée. L'entrepreneur devra fournir un « pont » pour permettre aux ouvriers de réparer les zones imparfaites. L'équipement devra être conçu et construit de façon à pouvoir suivre le profilé prévu et produire le fini désiré. S'il faut meuler le revêtement pour satisfaire aux tolérances spécifiées pour la surface, cette opération se fera parallèlement aux rainures.



Figure A6-6. Revêtement neuf texturé à l'aide d'un peigne métallique

Rainurage des intersections de pistes

2.3.13 Il faut d'abord décider sur laquelle des pistes il doit y avoir des rainures continues. Le choix de la piste préférée se fera normalement en fonction du drainage des eaux superficielles, sauf que, si ce critère ne donne plus de poids ni à l'une ni à l'autre des pistes, on envisagera d'autres critères pertinents.

Critères

2.3.14 Le drainage des eaux est le principal critère physique. Lorsque les caractéristiques de drainage sont semblables, que l'on raine l'une ou l'autre des pistes, il y a lieu de prendre en considération les critères opérationnels suivants :

- a) plage de vitesses de roulement ;
- b) aire de toucher des roues ;
- c) évaluation du risque.

Drainage des eaux superficielles

2.3.15 Le rainurage de la surface d'une piste est destiné principalement à améliorer le drainage des eaux superficielles. Pour cette raison, la piste préférée est celle sur laquelle l'orientation des rainures diffère le moins de la direction de la principale pente descendante dans la zone de l'intersection. On peut trouver la principale pente descendante sur un plan à courbes de niveau.

2.3.16 Le facteur ci-dessus est essentiel, car aux intersections, par conception, les pentes sont plutôt faibles (puisque la transition doit se faire sans à-coups pour les aéronefs roulant à grande vitesse) et pour cette raison des flaques d'eau peuvent s'y former.

2.3.17 Lorsqu'il y a lieu, on pourra envisager de prévoir des voies de drainage supplémentaires en travers de la piste secondaire là où se terminent les rainures afin que l'eau qui en provient ne s'accumule pas dans la zone de l'intersection.

Vitesse des aéronefs

2.3.18 Étant donné qu'aux valeurs élevées de la vitesse de roulement le rainurage est particulièrement efficace, il faudrait accorder la préférence à la piste sur laquelle, à l'intersection, la vitesse de roulement est souvent la plus élevée.

Aire de toucher des roues

2.3.19 Pourvu que le critère de vitesse ne soit pas applicable, il convient d'accorder la préférence à la piste sur laquelle l'intersection fait partie de l'aire de toucher des roues, car les roues se mettent rapidement en rotation grâce au rainurage en touchant la piste, surtout lorsque la surface est mouillée.

Évaluations du risque

2.3.20 Finalement, le choix de la piste primaire pourra se faire sur la base d'un jugement opérationnel portant sur le risque de roulage excessif (interruption du décollage ou de l'atterrissage) compte tenu des facteurs suivants :

- a) emploi de la piste (décollage/atterrissage) ;
- b) longueurs de piste ;
- c) aires de sécurité existant aux extrémités de piste ;
- d) cadences des mouvements ;
- e) conditions particulières d'exploitation.

Meulage au diamant du béton de ciment

2.3.21 L'opération de meulage au diamant pratiquée sur des revêtements existants en béton Portland (voir figure A6-7) ne paraît pas présenter d'inconvénients du point de vue de l'utilisation, et cette méthode de traitement semble appropriée pour tous les types d'aéronefs.

État de la chaussée existante

2.3.22 Il serait difficile de meuler de façon uniforme les revêtements de béton en mauvais état. Des chaussées présentant des joints endommagés ou malformés, ou sur lesquelles la laitance produit un écaillage important du revêtement, seront également difficiles à meuler. Si le revêtement existant est relativement exempt de ces défauts, il n'y a pas de restriction d'ordre technique à l'opération de meulage.



Figure A6-7. Béton de ciment Portland existant avant et après le meulage

Efficacité du traitement

2.3.23 Un meulage transversal du béton améliore de façon significative les caractéristiques de frottement de chaussées texturées lors de la construction au moyen de toile de jute ou par balayage. La durée de service de ce traitement dépend de la fréquence des mouvements d'aéronefs, mais en général le meulage reste efficace pendant la durée de service du revêtement en béton.

Extrémités de piste

2.3.24 Pour faciliter le lavage et le nettoyage des dépôts de carburant et d'huile, les extrémités de piste ne devraient pas être meulées. En outre, il semble que le souffle du moteur endommage davantage une surface meulée qu'une surface sans texture. La commande directionnelle d'un aéronef passant d'une voie de circulation à la piste peut être moins bonne, sans doute à cause d'une tendance des pneus à suivre la texture transversale de la piste. Enfin, on ne peut pas écarter entièrement la possibilité d'un accroissement de l'usure des pneus lors des virages.

Technique

2.3.25 Une zone d'essai acceptable doit être disponible aux fins d'inspection et il est recommandé que l'aérodrome fournisse cette zone pour déterminer la profondeur exacte que doit avoir la texture, car celle-ci tend à varier avec la qualité du béton. La piste devra être meulée transversalement par une passe unique d'un tambour (voir figure A6-8) comportant au moins 50 lames circulaires segmentées à diamants par tranche de 30 cm de largeur du tambour. Le tambour devra être réglé à 3 mm sur un bâti multiroues articulé avec roues montées sur vérin. Il devra être fixé de manière à obtenir une profondeur uniforme de meulage sur toute la surface de la piste et à garantir l'enlèvement de toute la laitance et la mise à nu du granulat. Il convient de noter que le traitement par meulage dégage une grande quantité de poussière, ce qui oblige à balayer et à laver la surface avant sa remise en service.

Couche de frottement poreuse

2.3.26 Une couche de frottement poreuse est une couche de roulement bitumineuse à texture ouverte, composée d'un granulat minéral et d'une substance bitumineuse, mélangé dans une centrale de malaxage, et appliqué sur une surface préparée, comme l'illustre la figure A6-9. Cette couche de frottement, spécialement conçue non seulement pour améliorer la résistance au dérapage, mais aussi pour diminuer les risques d'aquaplanage, présente une texture en « nid d'abeille » qui permet d'évacuer directement et rapidement l'eau de la surface du revêtement jusqu'à l'asphalte imperméable sous-jacent. Du fait de sa porosité et de sa durabilité, la couche de frottement poreuse présente pendant longtemps un coefficient de frottement sur surface mouillée constant et relativement élevé.

Limites d'emploi de la couche de frottement poreuse

2.3.27 Des couches de frottement de ce genre ne doivent être appliquées que sur de nouvelles pistes ayant un bon profil ou sur des pistes reprofilées de manière à approcher des critères définis plus haut pour les pistes neuves. Elles doivent toujours être posées sur des couches d'usure imperméables en asphalte de forte densité et à haute stabilité. Ces deux conditions sont nécessaires pour assurer l'évacuation rapide de l'eau au-dessous de la couche de frottement et sur l'asphalte imperméable jusqu'aux conduits de drainage de la piste. En outre, une attention particulière doit être accordée au nettoyage périodique de la surface pour maintenir sa porosité et il faut veiller à ne pas endommager la surface lors du déneigement et du déglçage.



Figure A6-8. Meulage au diamant du béton de ciment

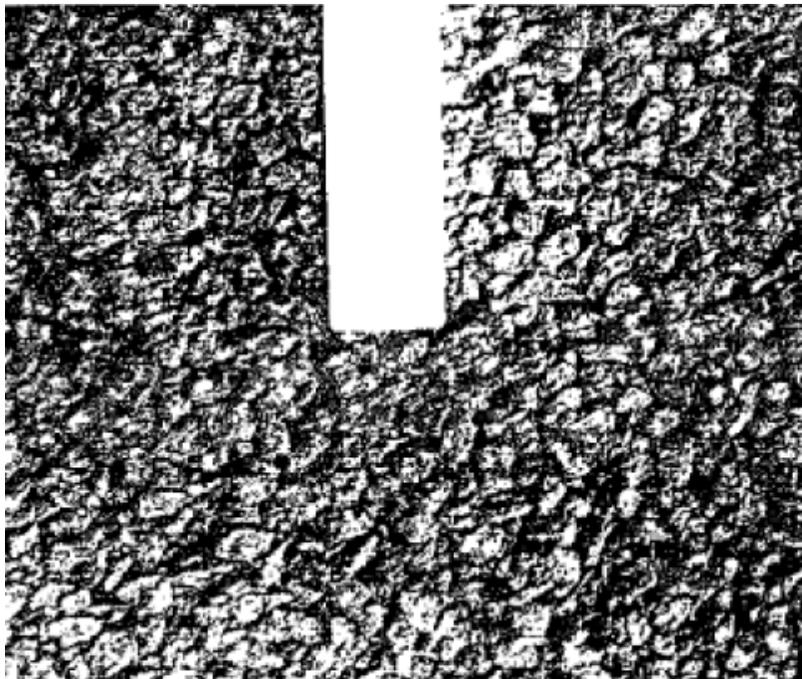


Figure A6-9. Revêtement par couche de frottement poreuse

Extrémités de piste

2.3.28 Il n'est pas recommandé de poser cette couche de frottement aux extrémités de la piste. Le carburant et le lubrifiant répandus obstrueraient les interstices et amolliraient le liant au bitume, tandis que la chaleur des réacteurs amollirait le matériau que le souffle pourrait ensuite éroder. En outre, l'érosion serait probablement plus profonde que sur un asphalte de densité normale et il convient de tenir compte du fait que le moteur risque d'être endommagé par suite de l'ingestion de particules arrachées à la piste. Enfin, une usure du revêtement pourrait se produire dans les virages au cours des premières semaines suivant l'application de la couche. Pour ces raisons, il est recommandé que les extrémités de piste soient faites de béton traité à la brosse ou rainuré ou encore d'asphalte dense.

Granulat

2.3.29 Le granulat est constitué de pierres, de gravier, ou de laitier concassés comprenant ou non d'autres matériaux inertes finement divisés. Il se compose de particules propres, résistantes et durables et ne doit pas comporter de masses d'argile, de matières organiques ou d'autres substances nuisibles. Le type et la qualité du matériau bitumineux dépendent de la situation géographique et des conditions climatiques. La température maximale de malaxage et les spécifications de contrôle doivent aussi être précisées.

Conditions météorologiques limites

2.3.30 Une couche de frottement poreuse ne doit être appliquée que sur une surface sèche, lorsque la température est au moins de 10 °C et en hausse (par temps calme), et quand il n'y a ni brouillard ni pluie.

Préparation des surfaces existantes

2.3.31 La réfection d'un revêtement existant en vue de le recouvrir d'une couche de frottement poreuse comprend les opérations suivantes : pose d'une couche bitumineuse, colmatage des joints et des fentes, réparation de la chaussée quand elle est détériorée et élimination des dépôts de graisse, d'huile ou de carburant. Juste avant l'application de la couche de liaison, la surface sous-jacente doit être débarrassée de tout matériau n'adhérant pas à la piste et nettoyée à l'aide de souffleuses, de balayeuses ou de balais, selon la méthode prescrite. Dans certains cas, une couche de liaison doit être posée sur la surface existante pour permettre à la couche de frottement de bien adhérer à celle-ci. Si on utilise de l'asphalte émulsionné, la couche de frottement poreuse peut être appliquée immédiatement. Par contre, si on utilise de l'asphalte de coupage, il faut attendre que la couche de liaison ait eu le temps de s'aérer avant de poser la couche de frottement poreuse.

2.4 Méthodes utilisées par les États

2.4.1 Usage de la France — béton bitumineux

[Béton bitumineux pour chaussées aéronautiques (BBA) pour la couche de roulement]

2.4.1.1 Le frottement de la surface de la piste mouillée peut être obtenu à partir d'une combinaison adéquate de macrotexture et de microtexture. Les granulats de concassage ou les granulats spécifiques à coefficient élevé de polissage accéléré du granulat (CPA) sont des moyens efficaces de fournir et de maintenir une microtexture élevée. Une macrotexture de surface de piste élevée peut être obtenue par un choix approprié de la granulométrie et du mélange de mortier. Les normes européennes définissent la composition, les caractéristiques de performance et les conditions d'essai des produits et enrobés bitumineux antidérapants (NF EN 13 108-1).

2.4.1.2 La norme NF EN 13 108-1 décrit huit types de matériaux pouvant être utilisés comme couches de roulement des chaussées d'aérodrome. Quatre d'entre eux, désignés sous le nom de béton bitumineux aéronautique (BBA), ont démontré des caractéristiques de surface élevées. Le BBA peut être classé en continu ou en discontinu, avec des granulats de 0/10 mm et 0/14 mm dans chaque catégorie, et peut être utilisé comme couche de roulement dans les nouvelles constructions et les revêtements. La figure A6-10 montre une texture de surface caractéristique d'un BBA 0/14 à gradient discontinu non rainuré.



Figure A6-10. Texture de surface en BBA 0/14

2.4.1.3 Le BBA 0/14 respecte les spécifications de profondeur moyenne de texture (PMT) pour les pistes et les voies de sortie rapide. Pour tout autre revêtement de chaussée d'aérodrome, le BBA 0/10 convient également. Les caractéristiques de surface inhérentes à ces produits peuvent annuler la nécessité opérationnelle d'un traitement spécial, tel que le rainurage (sans pour autant bénéficier d'un crédit spécifique pour les performances de l'avion). Ils sont donc prêts pour le trafic dès que le matériau refroidit à la température ambiante. Les pistes en BBA sont plus faciles à entretenir que les pistes en asphalte rainuré.

2.4.1.4 Le BBA est un moyen efficace de répondre aux exigences relatives aux valeurs de frottement et de texture des surfaces construites, sans traitement de surface supplémentaire. En outre, le frottement a tendance à augmenter au cours de la première année de service en raison de l'usure du liant bitumineux excédentaire due au trafic. Il est moins sujet à l'accumulation de caoutchouc que les matériaux rainurés. Néanmoins, le BBA retient l'humidité pendant une période plus longue que les pistes rainurées. En hiver, cela signifie que les agents de dégivrage doivent être appliqués plus fréquemment pendant les périodes de temps froid et humide.

2.4.2 Usage de la Chine — enrobé bitumineux à matrice granulaire (SMA) pour la couche de roulement

2.4.2.1 Les principales caractéristiques d'un enrobé bitumineux à matrice granulaire, également appelé enrobé à gros granulats ou enrobé SMA, sont sa surface rugueuse et sa grande profondeur de texture. La profondeur de texture d'une couche de roulement SMA-16 n'est pas inférieure à 1,2 mm et celle du SMA-13 n'est pas inférieure à 1,0 mm. L'adhérence d'une couche d'usure SMA est meilleure que celle d'une couche de roulement classique et convient à la

pose d'une couche d'usure de construction neuve ou d'une couche d'usure superposée à une chaussée existante. En 1996, la piste 18L/36R de l'aéroport international de Beijing a été la première chaussée d'un grand aéroport à être recouverte de SMA sur du béton détérioré. Compte tenu des avantages et de l'aspect pratique de cette couche de roulement, presque toutes les pistes en asphalte ont utilisé un revêtement SMA en Chine, en plus d'autres pays, comme le Royaume-Uni, la France, l'Allemagne, la Norvège et Singapour. La figure A6-11 montre une couche d'usure SMA.

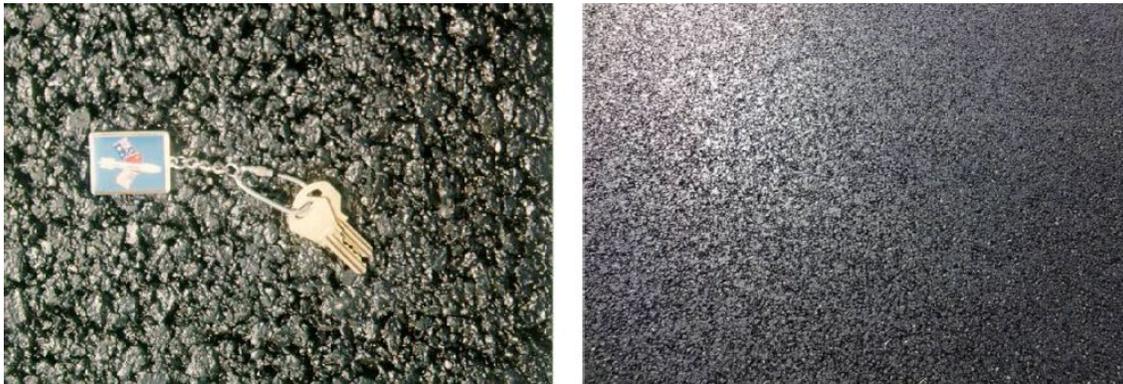


Figure A6-11. Couche d'usure SMA

2.4.2.2 Le SMA se distingue des enrobés à granulométrie dense par son squelette de granulats grossiers, constitué d'un nombre limité de tailles de particules, qui supporte la charge. Le mastic, composé d'une charge minérale, de fibres et d'un liant bitumineux, remplit les vides entre le squelette de granulats grossiers. En plus d'une bonne résistance au dérapage, la chaussée SMA présente les avantages suivants :

- a) sa teneur élevée en granulats grossiers fait que ceux-ci s'imbriquent pour former un squelette de pierre résistant à la déformation permanente et aux déversements de carburant et capable de s'adapter aux besoins d'un trafic intense ;
- b) l'amélioration des performances de la chaussée, notamment la résistance aux fissures à basse température, la capacité de résistance au vieillissement, la résistance aux dégâts causés par l'eau et la durabilité, en raison de ses caractéristiques fibreuses, de sa teneur en bitume plus élevée, de son film de bitume plus épais et de ses moindres vides d'air ;
- c) une teneur plus élevée en charge minérale améliore la capacité d'adhérence entre le bitume et le granulat.

2.4.2.3 La figure A6-12 présente les différentes compositions du béton bitumineux à granulométrie dense (asphalte classique), du SMA et de l'enrobé drainant (couche de frottement à granulométrie ouverte). Le tableau A6-1 présente les résultats comparatifs des performances des trois surfaces.

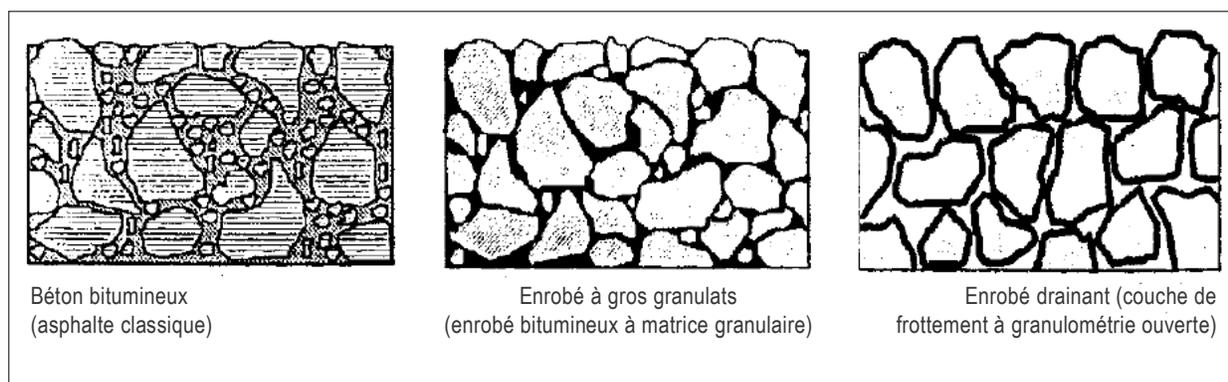


Figure A6-12. Béton bitumineux/SMA/enrobé drainant

Tableau A6-1. Résultats comparatifs des performances

Type de structure	Béton bitumineux à granulométrie dense	Enrobé à gros granulats (SMA)	Couche de frottement à granulométrie ouverte
Profondeur de la texture	0	+	+
Résistance au bruit	0	+	++
Résistance à la fatigue	0	0	0
Résistance à la déformation	0	++	++
Résistance aux fissures par réflexion	0	+	--
Résistance aux fissures à basse température	0	+	--
Résistance au désenrobage	0	++	--
Durabilité	0	++	--
Résistance à l'usure	0	+	--
Résistance aux déversements de carburant	0	+	0
0 : égal ou pas de changement + : augmentation - : diminution Les symboles simples et doubles représentent l'ampleur du changement.			

2.4.2.4 Les excellentes performances de l'enrobé SMA le rendent adapté à la plupart des climats, la variation des exigences de performance en fonction des différentes conditions environnementales étant prise en compte. Certaines performances doivent être prises en compte avec insistance, telles que les performances à haute température dans les climats chauds, la résistance aux fissures à basse température dans les climats froids et la capacité de résistance au vieillissement dû aux ultraviolets (UV) sur les plateaux.

2.4.2.5 Le SMA peut être appliqué sur les pistes, les voies de circulation et les voies de circulation d'aires de trafic. Dans des conditions de température élevée ou de trafic intense, des mesures de renforcement, telles que l'application de bitume modifié par polymère, de bitume à module élevé, d'asphalte lacustre et d'un agent anti-orniérage, devraient être mises en œuvre dans les zones de charge lourde (c'est-à-dire les positions d'attente, les voies de circulation d'extrémité de piste et les aires de demi-tour sur piste).

2.4.2.6 Il convient de choisir des pierres dures (telles que le basalte, la diabase, etc.) comme granulat grossier de la couche d'usure SMA afin qu'elle conserve une bonne adhérence. La valeur de concassage des granulats ne doit pas être supérieure à 20 %, la perte par abrasion à l'essai Los Angeles ne doit pas être supérieure à 30 % et le CPA ne doit pas être inférieur à 42 %. Pour supporter un trafic intense, il est nécessaire d'utiliser du bitume modifié dans les climats chauds ou froids. Le dosage raisonnable du modificateur doit se situer dans les limites suivantes : 4 à 6 % du poids du bitume pour le bitume modifié par polymère ; la teneur en asphalte devrait être de 5,7 à 6,0 % dans les climats froids, et de 5,5 à 5,7 % dans les climats chauds. Les fibres utilisées comme agent stabilisant du SMA comprennent des fibres de cellulose et des fibres minérales et chimiques, qui absorbent le bitume afin d'améliorer la résistance à l'eau et la résistance au vieillissement de l'enrobé. Habituellement, la teneur en fibres du SMA est de 0,3 à 0,5 % du poids de l'enrobé. Le tableau A6-2 indique la granulométrie recommandée de l'enrobé SMA.

Tableau A6-2. Exigences relatives à la granulométrie de l'enrobé SMA pour les aérodromes en Chine

Taille du tamis (mm)	Pourcentage de passage (%)	
	SMA-16	SMA-13
19	100	
16	90–100	100
13,2	60–80	90–100
9,5	40–60	45–65
4,75	20–32	22–34
2,36	18–27	18–27
1,18	14–22	14–22
0,6	12–19	12–19
0,3	10–16	10–16
0,15	9–14	9–14
0,075	8–12	8–12

2.4.2.7 L'enrobé SMA doit répondre aux exigences techniques indiquées dans le tableau A6-3.

Tableau A6-3. Exigences relatives aux propriétés de l'enrobé SMA pour les aérodrômes en Chine

<i>Indice</i>	<i>Critères</i>
Impacts de Marshall	75 sur chaque face
Stabilité, minimum (kN)	6,0
Fluage, 0,1 mm	20–50
Vides d'air de conception, %	3–5
Vides dans le granulat minéral (VGM), minimum, %	17
Teneur minimale en asphalte, %	5,5
Stabilité dynamique minimale Indice 1, nombre/mm	lors de l'utilisation d'asphalte modifié : 3 000 lors de l'utilisation d'asphalte non modifié : 1 500
Maintien de la stabilité de Marshall après immersion dans l'eau, % minimum	80
Coefficient de résistance à la traction, % minimum	75
Séparation du mastic de la masse granulaire (170 °C, 1 h), %, pas supérieur à	0,15
Essai d'abrasion Cantabro (-0 °C), %, pas supérieur à	20

2.4.2.8 Pour le SMA-16, l'épaisseur optimale après compactage est de 6 cm (le maximum est de 7 cm et le minimum de 5 cm). Pour le SMA-13, l'épaisseur optimale après compactage est de 5 cm (le maximum est de 6 cm et le minimum de 4 cm). L'enrobé SMA doit être réalisé dans des conditions de haute température répondant aux exigences indiquées dans le tableau A6-4.

Tableau A6-4. Température de construction des chaussées SMA pour les aérodrômes en Chine

<i>Processus</i>	<i>Lors de l'utilisation d'asphalte non modifié</i>	<i>Lors de l'utilisation d'asphalte modifié</i>		
		<i>SBS</i>	<i>SBR</i>	<i>EVA ou PE</i>
Température de chauffage de l'asphalte (°C)	150–160	160–165	160–165	150–160
Température de traitement de l'asphalte modifié sur site (°C)	–	165–170	–	160–165
Température de traitement de l'asphalte modifié, maximum (°C)	–	175	–	175
Température de chauffage du granulat (°C)	185–195	190–200	200–210	180–190
Température de mélange de l'enrobé SMA en usine (°C)	160–170	175–185	175–185	170–180

Processus	Lors de l'utilisation d'asphalte non modifié	Lors de l'utilisation d'asphalte modifié		
		SBS	SBR	EVA ou PE
Température de l'enrobé SMA, maximum (°C)	180	pas plus de 190		
Température de stockage de l'enrobé SMA (°C)	160	pas plus de 10 °C sous la température de mélange de l'usine		
Température du mélange SMA livré sur le chantier, minimum (°C)	155	pas plus de 15 °C sous la température de mélange de l'usine		
Température de répandage, minimum (°C)	150	160		
Température pendant le compactage initial, minimum (°C)	140	150		
Température à la fin du compactage, minimum (°C)	110	130		
Température à l'ouverture du trafic, maximum (°C)	50	50		

2.4.2.9 Lors du répandage d'une couche d'usure SMA, la largeur de pose d'une répandeuse ne devrait pas être supérieure à huit mètres. Afin d'éviter le joint de reprise, six à sept répandeuses sont disposées en échelon pour le répandage unique d'un revêtement sur toute la largeur d'une piste de 45 mètres de large. Le compactage devrait être effectué avec des rouleaux à roues en acier d'un poids minimal de 12 tonnes. L'emploi de rouleaux en caoutchouc est limité, car le bitume riche a tendance à adhérer aux pneus en caoutchouc et provoque un broyage excessif du mastic. Cependant, lorsque la température de la chaussée chute entre 80 °C et 100 °C, il est permis d'utiliser des rouleaux en caoutchouc pour un compactage supplémentaire afin de traiter les vides de la chaussée et d'empêcher la pénétration de l'eau.

2.5 Techniques d'élimination des contaminants sur les pistes

2.5.1 Selon le type et la fréquence du trafic des aéronefs sur la piste, la surface du revêtement de la piste peut accumuler des contaminants tels que de l'huile, du carburant et des dépôts de caoutchouc provenant des pneus des aéronefs. À mesure que les dépôts de caoutchouc s'accumulent dans la microtexture et la macrotexture, la valeur de frottement de la surface de piste peut tomber en dessous de la spécification établie par l'État, surtout lorsqu'elle est mouillée. Les méthodes ci-dessous sont utilisées pour l'élimination des contaminants sur les pistes.

Eau à haute pression

2.5.2 Une série de jets d'eau à haute pression est dirigée vers la chaussée pour éliminer les contaminants de la surface. Les contaminants peuvent être évacués de la piste ou ramassés par un camion aspirateur. La pression de l'eau peut varier considérablement en fonction de l'équipement de l'entrepreneur. Étant donné que l'élimination de l'eau à haute pression comporte de nombreux paramètres et que le traitement prolongé peut endommager la chaussée, le traitement étant particulièrement agressif pour les couches d'usure bitumineuses fissurées, il faut choisir avec soin un entrepreneur ayant de l'expérience, une expertise démontrée et des références.

Produit chimique

2.5.3 Les solvants chimiques ont été utilisés avec succès pour enlever le caoutchouc sur les pistes en béton et en asphalte. Les produits chimiques efficaces utilisés sur les pistes en béton ont une base d'acide crésylique et un mélange de benzène avec un détergent synthétique comme agent mouillant. Les produits chimiques alcalins sont généralement utilisés sur les chaussées en asphalte. Comme ces produits chimiques sont volatils et toxiques par nature, il faut faire preuve d'une extrême prudence pendant et après l'application. Si les produits chimiques restent trop longtemps sur la chaussée, les zones peintes et la surface peuvent éventuellement être endommagées. Il est également important de diluer correctement le solvant chimique qui est éliminé par lavage de la surface de la chaussée afin que l'effluent n'endommage pas la végétation environnante, les systèmes de drainage ou ne pollue pas les cours d'eau et les habitats naturels à proximité.

Impact à grande vitesse

2.5.4 Des particules abrasives (généralement de la grenaille d'acier) sont envoyées à une vitesse très élevée à la surface de la chaussée de la piste ; l'impact peut être ajusté pour produire une texture de surface souhaitée. L'abrasif est propulsé mécaniquement à partir des extrémités périphériques des lames radiales à grande vitesse, dans une roue en forme de ventilateur. L'ensemble de l'opération peut être propre pour l'environnement, car elle est autonome, recueille et recycle les particules abrasives, et ramasse tous les contaminants détachés et la poussière abrasive. L'équipement peut être autonome et mobile et peut donc être retiré rapidement de la piste si l'exploitation de l'aéroport l'exige. Dans tous les cas, un essai doit être effectué dans une zone non critique afin de vérifier l'adéquation des réglages de l'équipement, l'efficacité du nettoyage, l'absence de dommages à la texture de la surface de la chaussée et l'élimination complète de la grenaille d'acier, y compris dans les ouvertures/joints/fissures, etc., de la chaussée. Il est essentiel d'éliminer toutes les projections d'acier pour éviter les risques liés aux FOD.

Élimination mécanique

2.5.5 Le meulage mécanique qui utilise la technique de l'ondulation a été utilisé avec succès pour éliminer les dépôts de caoutchouc lourds sur les pistes en asphalte et en béton. Cette méthode (également appelée fraisage fin) permet d'enlever une couche superficielle en profondeur (3,2 mm à 4,8 mm) et améliore les propriétés de frottement de la surface.

2.6 Atténuation des distorsions du champ magnétique

2.6.1 La présence d'éléments métalliques massifs dans ou sous les chaussées et l'utilisation de dispositifs magnétiques pour retirer les éléments métalliques de la surface ont provoqué des distorsions locales du champ magnétique terrestre. Ces distorsions, également connues sous le nom d'anomalies magnétiques locales, peuvent interférer avec les systèmes de navigation des aéronefs et il a été établi qu'elles représentent un danger potentiel pour les opérations aériennes.

2.6.2 En référence aux *Instructions techniques pour la sécurité du transport aérien des marchandises dangereuses* (Doc 9284), et à l'instruction d'emballage 953 pour les marchandises portant le n° ONU 2807 — Masses magnétisées, les distorsions locales du champ magnétique déviant un compas situé à 4,6 m au-dessus du sol de plus de deux degrés (équivalent à 0,418 A/m ou 0,00525 gauss) peuvent exercer un effet considérable sur les compas magnétiques à lecture directe ou sur les unités de détection du compas principal.

2.6.3 Il existe quatre méthodes possibles pour supprimer ou atténuer l'effet des infrastructures aéroportuaires sur le champ magnétique terrestre :

- a) Chaque anomalie magnétique est démagnétisée individuellement, ce qui la rend magnétiquement neutre. Il s'agit d'une solution à court terme, car l'anomalie magnétique reviendrait après une période de quelques années.
- b) Chaque anomalie magnétique individuelle est dotée d'un système de démagnétisation permanent installé avec un capteur de champ magnétique individuel pour suivre la modification de l'effet magnétique de l'anomalie au fil du temps, et faire ajuster le système de démagnétisation en conséquence.
- c) Une feuille de matériau magnétiquement opaque (par exemple, une feuille de blindage magnétique) est placée sur la zone des anomalies magnétiques.
- d) L'enlèvement des éléments, tels que les grillages renforcés d'acier ou les éléments en acier massif, qui provoquent les anomalies magnétiques.

3. PROTECTION DES CHAUSSÉES EN ASPHALTE

3.1 Objet

3.1.1 L'entretien comprend les travaux préventifs et tous les travaux réguliers ou périodiques nécessaires pour conserver les chaussées d'aérodrome existantes en bon état. Le remplacement de parties individuelles et la réparation de portions d'une chaussée sont considérés comme des travaux de réparation mineurs. L'entretien préventif typique et régulier ou périodique des chaussées comprend : le nettoyage de routine, le remplissage et/ou le scellement des fissures ; le rapiéçage de la chaussée ; l'application d'un enduit d'étanchéité ; le nivellement des bords de la chaussée ; l'entretien des systèmes de drainage de la chaussée ; la restauration du marquage de la chaussée. L'entretien et la réparation en temps utile des chaussées sont essentiels pour maintenir une capacité de charge adéquate, préserver un frottement suffisant de la surface dans toutes les conditions météorologiques et fournir une bonne qualité de roulement nécessaire à l'exploitation sûre des aéronefs et réduire au minimum les risques liés aux FOD.

3.1.2 Le présent chapitre décrit la protection des chaussées en asphalte contre deux types de dégradation de la chaussée : le vieillissement climatique et la désintégration dus à l'oxydation environnementale ; les déversements d'hydrocarbures (carburant et lubrifiants), qui peuvent être évités ou réduits au minimum par la participation anticipée du personnel de l'aérodrome à la protection de la surface des chaussées en asphalte.

3.2 Vieillissement climatique et désintégration dus à l'oxydation environnementale

3.2.1 Le vieillissement climatique et la désintégration de la surface de la chaussée sont causés par l'oxydation due à l'exposition à l'environnement, ce qui entraîne le problème des FOD produits par la chaussée. Les lieux concernés sont toutes les chaussées qui reçoivent le trafic des aéronefs (pistes, voies de circulation et aires de trafic) ainsi que les chaussées immédiatement adjacentes, telles que les accotements et les voies de circulation des véhicules.

3.2.2 Entre 70 et 90 % de la détérioration et de la rupture des chaussées en asphalte résultent de l'exposition à l'environnement et de la dégradation du liant bitumineux (oxydation). L'oxydation se produit lorsque la surface de la chaussée est exposée à l'oxygène de l'air et de l'eau, qui attaque le liant de l'asphalte en le faisant durcir et devenir fragile et provoque sa « décomposition ». Les rayons ultraviolets du soleil exacerbent ce processus, que l'on appelle souvent le « vieillissement ».

3.2.3 L'asphalte (également appelé bitume) provient des fractions restantes du processus de raffinage du pétrole brut. Les progrès technologiques dans le processus de raffinage permettent d'extraire et de séparer de plus en plus de résines et d'huiles de haute valeur, laissant moins de ces résines et huiles pour l'asphalte. Par conséquent, les fractions restantes sont enrichies et conçues pour répondre aux propriétés physiques nécessaires pour les liants bitumineux, réduisant ainsi leur résistance à l'exposition aux effets environnementaux.

3.2.4 Le liant bitumineux (la « colle » qui lie les granulats entre eux) se décompose sous l'effet de l'oxydation due aux intempéries, ce qui entraîne une détérioration de la surface de la chaussée. Le granulat est littéralement « décollé » ; d'abord le granulat fin, ce qui est considéré comme une dégradation due aux intempéries, puis le granulat grossier, qui est considéré comme une dégradation qui prend la forme d'une désintégration. Ces dégradations entraînent le détachement des granulats et de morceaux de chaussée, ce qui est considéré comme des FOD générés par la chaussée.

Traitement

3.2.5 Ce problème peut être considérablement réduit si l'oxygène de l'air et de l'eau ne peut pas entrer en contact avec le liant bitumineux de la surface de la chaussée. Des enduits protecteurs ont donc été mis au point pour former une barrière entre l'environnement et la surface de la chaussée, ce qui permet de réduire au minimum les effets de l'oxydation.

Enduits protecteurs

3.2.6 Des enduits liquides (« enduits d'étanchéité ») destinés à lutter contre l'oxydation ont été mis au point par l'incorporation d'au moins 20 % d'asphalte naturel (connu sous le nom de gilsonite, d'uintahite, de pierre d'asphalte, etc.) dans l'asphalte raffiné, qui est utilisé comme scellant d'asphalte émulsifié, généralement décrit comme une couche d'étanchéité en asphalte émulsifié. Ce matériau doit être appliqué à l'aide d'un équipement d'épandage d'asphalte. Sur les petites surfaces, le matériau peut être appliqué à l'aide de pulvérisateurs manuels ou en le versant sur la surface et en l'étalant à l'aide de raclettes ou de brosses.

3.2.7 L'asphalte raffiné émulsifié peut être remplacé par un asphalte à base de solvant en incorporant au moins 40 % d'asphalte naturel.

Note.— La réglementation locale en matière d'environnement doit être prise en considération si l'on envisage d'utiliser des produits d'asphalte à base de solvants.

3.2.8 D'autres couches d'étanchéité à base d'émulsion d'asphalte modifié, comme un polymère modifié sans incorporation d'asphalte naturel, ont également été utilisées ; toutefois, pour obtenir les résultats souhaités, ce matériau doit être appliqué en deux fois au moins, la deuxième couche étant appliquée immédiatement après que la première soit sèche au toucher (et la troisième, si elle est utilisée, après que la deuxième couche soit sèche au toucher).

3.2.9 Les matériaux de revêtement sous forme d'émulsion peuvent être étendus et prémélangés avec des granulats fins pour former une boue et être appliqués comme un coulis d'étanchéité.

Gains et préoccupations en matière de protection

3.2.10 Les couches d'étanchéité réduisent l'adhérence à leur application, mais s'améliorent et obtiennent généralement des résultats acceptables aux essais de frottement dans les 24 à 48 premières heures, ce qui doit être pris en compte lorsque l'application se fait sur une piste ou une voie de sortie rapide. Les traitements à base de solvants permettent généralement d'obtenir des résultats acceptables aux essais de frottement dans un délai de deux à trois heures. L'adhérence continuera à s'améliorer pour atteindre une adhérence similaire à celle d'avant l'application, généralement dans un délai d'une semaine à trois mois.

3.2.11 Pour l'application d'un traitement de surface par couche d'étanchéité sur la piste et la voie de sortie rapide, il faut prévoir l'application d'un granulats approprié pour maintenir un frottement initial adéquat de la surface pendant les premières heures ou les premiers jours. Lorsque des granulats doivent être appliqués, ils doivent être épandus par un camion épandeur d'asphalte équipé d'un épandeur de granulats monté sur le camion épandeur qui peut appliquer du sable sur l'émulsion en un seul passage sans traverser l'émulsion humide.

3.2.12 Les taux d'application des couches d'étanchéité varient d'un endroit à l'autre et en fonction de l'état, de l'âge, etc., de la chaussée. Par conséquent, des essais par zones ou sections pour chaque emplacement doivent être effectués afin de donner à l'entrepreneur et au technicien l'occasion de déterminer la qualité du mélange en place, la quantité réellement nécessaire, ainsi que les performances de l'équipement. Il en va de même pour étayer l'acceptation de l'adhérence si l'application doit se faire sur une piste ou une voie de sortie rapide.

3.2.13 La décision d'appliquer ou non un traitement, en particulier sur une piste, est une question d'équilibre entre le risque d'incidence négative sur l'adhérence et le risque de génération de FOD depuis la surface. Les facteurs à prendre en compte sont l'état de la surface asphaltée existante, les conditions météorologiques, la distance de décollage interrompu requise par rapport à la distance utilisable pour l'accélération-arrêt (ASDA) et le moment de la réfection de l'asphalte. Les résidus des multiples traitements antérieurs, même plusieurs années après leur application, doivent être pris en compte, car ils peuvent contribuer aux problèmes de frottement.

3.3 Dégradation due au déversement de carburants et de lubrifiants

3.3.1 Les carburants et les lubrifiants contiennent des solvants qui dissolvent efficacement le liant bitumineux et réduisent temporairement sa dureté lorsqu'ils entrent en contact avec la surface d'un revêtement bitumineux. Les lieux concernés sont les zones où les aéronefs sont régulièrement avitaillés en carburant, garés ou entretenus. Les zones d'atterrissage et de roulage ne seront pas concernées, car même les déversements dus à des accidents d'aéronef seront réduits au minimum par le nettoyage et un seul déversement durcira sans laisser de dommages permanents.

3.3.2 Étant donné que la gravité des dommages provoqués par le carburant répandu sur les chaussées asphaltées est liée à l'exposition à la pénétration des solvants, il faut se préoccuper de la fréquence des déversements à un endroit donné, du temps pendant lequel le carburant ou l'huile déversés restent à la surface ou à l'intérieur de la chaussée, ainsi que de l'emplacement et de l'importance du déversement. Un seul déversement de carburant, voire plusieurs déversements à un même endroit, à des intervalles suffisamment longs pour permettre l'évaporation du carburant et le durcissement de la chaussée, n'ont ordinairement pas d'effets nuisibles appréciables sur cette dernière. Cependant, il faut s'attendre à ce que la chaussée soit tachée et ramollie pendant un certain temps avant que les solvants ne s'évaporent et que l'asphalte ne retrouve sa dureté.

3.3.3 Les déversements peuvent être dus à des opérations de routine comme l'arrêt des moteurs, la vidange des réservoirs de carburant pour en retirer les dépôts, l'utilisation systématique de solvants pour nettoyer les moteurs ou les éléments du circuit hydraulique, etc. Plus couramment, la présence de flaques sur la chaussée est due aux opérations d'avitaillement, à un déversement d'huile ou de fluide hydraulique, ou à l'accumulation d'huile de lubrification des moteurs due à des fuites ou à un manque de précautions dans la manipulation.

3.3.4 Dans les zones où les déversements se répètent, ou dans lesquelles le carburant ou l'huile déversés séjournent longtemps sur la chaussée, l'action dissolvante ramollit l'asphalte et réduit son adhésion au granulats de surface. L'effet des déversements peut se traduire par un gonflement du revêtement, des empreintes de pneus, la présence de traces d'asphalte sur les zones adjacentes, la désagrégation de la surface et l'usure de la chaussée qui peut à son tour entraîner la présence de matériaux libres sur la surface. Dans les zones d'entretien et de travail, l'asphalte collé aux outils, aux chaussures et aux habits, ainsi que le sable peuvent être introduits dans les systèmes mécaniques.

Traitement

3.3.5 La meilleure solution consiste à éviter les déversements, ce qui est possible dans beaucoup de cas de déversements habituels et dans certains cas de déversements accidentels. La vidange des réservoirs de carburant pour éliminer les dépôts peut se faire dans un récipient et non sur la chaussée. De même, on peut utiliser des bacs aux endroits où il y a des fuites d'huile, ainsi que pour la purge ou l'entretien des circuits hydrauliques. De la même façon, il est possible de recueillir le carburant qui s'échappe lors de l'arrêt des réacteurs ou les petites quantités qui peuvent déborder au moment de l'avitaillement.

3.3.6 L'enlèvement du carburant ou de l'huile déversés et la réduction de l'exposition par un nettoyage constituent le deuxième volet de la solution au problème. Il existe plusieurs façons de nettoyer et d'éliminer le carburant ou l'huile déversés sur la chaussée, de l'essuyage d'un petit déversement au moyen de détergents à l'utilisation d'un procédé d'aspiration avec un équipement approprié, qui peut être utilisé pour enlever le carburant déversé et éventuellement en récupérer une partie, en passant par l'utilisation de matériaux absorbants, qui peuvent également ramasser le carburant et l'huile, dont on se débarrasse ensuite par un moyen convenable.

Note.— La réglementation locale en matière d'environnement doit être prise en considération pour l'enlèvement et l'élimination des contaminants.

Enduits protecteurs

3.3.7 Les déversements ne peuvent pas créer de problèmes si l'on empêche le carburant ou l'huile déversés de venir en contact avec la surface de chaussée asphaltée. Des enduits protecteurs résistant à l'action des carburants et des huiles ont donc été mis au point pour former une barrière entre les carburants ou les huiles d'une part et la chaussée d'autre part.

3.3.8 De minces recouvrements de revêtement d'asphalte chaud résistant au carburant ou d'autres matériaux qui aident à réduire au minimum les effets des déversements peuvent être appliqués pour protéger les revêtements d'asphalte. Sauf dans le cas de certains matériaux très particuliers, on utilise les méthodes classiques d'application.

3.3.9 Certains États ou localités peuvent encore autoriser un revêtement liquide à base de brai de goudron de houille, qui est utilisé comme enduit protecteur émulsifié et constitue l'ingrédient de base de différents enduits protecteurs à base de « goudron de houille » offerts dans le commerce. Les matériaux de revêtement sous forme d'émulsion peuvent être étendus et prémélangés avec des granulats fins pour former une boue et être appliqués comme un coulis d'étanchéité.

Note.— Les réglementations ou interdictions locales en matière d'environnement doivent être prises en considération si l'on envisage d'utiliser des produits à base de goudron de houille sur les surfaces de la chaussée.

Gains et préoccupations en matière de protection

3.3.10 La longévité et la résistance à l'usure peuvent varier selon les matériaux et le nombre de couches, le nettoyage et la préparation de la surface, l'entretien de l'enduit protecteur et bien entendu, l'exposition aux déversements et la circulation.

3.3.11 Pour le revêtement liquide à base de goudron de houille, certaines formules ou méthodes d'application peuvent aboutir à une couverture imparfaite de la surface par l'enduit. Des bulles d'air peuvent se former au moment de l'application ou après le durcissement de l'enduit et former des trous dans celui-ci lorsqu'elles éclatent ; l'enduit peut aussi se contracter et se fissurer. Un nettoyage insuffisant de la surface peut causer une mauvaise adhérence et le décollement de l'enduit. En outre, les fissures préexistantes dans le revêtement de la chaussée tendront à se propager dans l'enduit protecteur.

3.3.12 Lorsque du carburant peut s'infiltrer par les trous ou les fissures de l'enduit, à travers les zones dénudées, ou par les fissures qui se sont propagées à partir des couches sous-jacentes de la chaussée, ou lorsqu'une chaussée saturée de carburant n'a pas été refaite, l'application d'un enduit aggravera la situation plutôt qu'elle ne l'améliorera car, en plus de ne pas empêcher l'accès du carburant ou de l'huile déversée à l'asphalte, le revêtement inhibe grandement l'évaporation et le durcissement du déversement.

3.3.13 Les enduits et les coulis d'étanchéité assurent une protection contre les déversements et résistent bien à la formation de bulles d'air, au décollement ou à l'usure. Les coulis de goudron de houille sont toutefois sujets aux fissures causées par la contraction et à la propagation des fissures à partir des couches sous-jacentes de la chaussée. Les enduits décrits précédemment ne présentent pas ces problèmes inhérents tant qu'ils sont correctement compactés et que leur teneur en vides est d'environ 2 %.

4. CONSTRUCTION DE REVÊTEMENTS D'ASPHALTE PENDANT LES FERMETURES D'EXPLOITATION

4.1 Introduction

Sur bien des aéroports, il est pratiquement obligatoire du fait du nombre et de la fréquence des décollages et atterrissages de réparer des aires de mouvement, partie par partie, pendant les courtes périodes de fermeture des opérations de trafic. Le présent chapitre fournit des orientations concernant les procédures à mettre en œuvre par les personnes ayant un rôle à jouer dans les réparations à court terme, c'est-à-dire le directeur d'aéroport, le directeur de projet, le concepteur, l'inspecteur, les techniciens chargés de l'essai des matériaux et les entrepreneurs, afin que les travaux soient menés de la façon la plus sûre et efficace possible sans perte de revenus, sans inconvénients pour les passagers et sans retards des systèmes de la circulation aérienne.

4.2 Rôle de l'administration aéroportuaire

Coordination du projet

4.2.1 Un projet de construction en heures creuses est essentiellement un projet très visible exigeant qu'une étroite coordination soit assurée avec tous les éléments de l'aéroport pendant la phase de planification et de conception et pratiquement tous les jours pendant la période d'exécution des travaux. Une fois qu'un projet de réfection d'une chaussée de piste a été retenu par l'aéroport, il importe que des personnes désignées par l'administration aéroportuaire, les usagers et l'administration de l'aviation civile de l'État se réunissent pour étudier la façon dont les travaux de construction doivent être menés. Le personnel clé ci-après devrait participer à toutes les réunions de planification :

- a) pour l'administration aéroportuaire : directeur de projet, directeurs de l'exploitation, de la planification, de l'ingénierie et de la maintenance ;
- b) pour les compagnies aériennes : chefs d'escale et représentants du siège s'il y a lieu ;
- c) pour l'administration de l'aviation civile : représentants des services de la circulation aérienne et des services d'information aéronautique.

4.2.2 L'ordre du jour de ces réunions devrait comprendre ce qui suit :

- a) fixation de l'horaire des travaux. Comme il importe de faire vite en cas de construction en heures creuses, il faudrait accorder à l'entrepreneur le maximum de temps pour construire le revêtement

pendant chaque séance de construction. Une période de huit heures est généralement considérée comme convenable. Il faudrait prendre des dispositions afin que les travaux soient effectués pendant une période où ils ne perturberont que le minimum de vols réguliers. Le choix d'une période spécifique devrait être l'objet d'une coordination avec des représentants des compagnies aériennes et d'autres organismes au cours des premières réunions de planification. En choisissant de bonne heure l'horaire des travaux, on permet aux compagnies aériennes de modifier les horaires futurs selon les besoins en fonction de ces travaux. Il est indispensable d'ouvrir et de fermer la piste à l'heure fixée, sans exception, puisque ni les horaires des compagnies aériennes ni ceux de l'entrepreneur ne peuvent avoir d'effet si la piste n'est pas disponible au moment fixé ;

- b) établissement de facteurs opérationnels au cours des travaux de construction et établissement de critères acceptables :
 - 1) désignation des zones de travail ;
 - 2) mouvements d'aéronefs ;
 - 3) aides (visuelles et non visuelles) de navigation touchées ;
 - 4) sûreté et itinéraires des camions ;
 - 5) inspection et besoin d'ouvrir la zone à l'exploitation ;
 - 6) mise en place et enlèvement de barrières délimitant la zone de construction ;
 - 7) marquage et signalisation des chaussées temporaires ;
 - 8) jours de la semaine où les travaux auront probablement lieu ;
 - 9) émission de NOTAM et d'avis ;
- c) voies de communication et éléments de coordination. Il est essentiel que le directeur de projet soit la seule personne à assurer la coordination du projet. Il faut examiner les méthodes et voies de communication auxquelles on aura recours pour établir que la piste est disponible au début de chaque séance de construction et déterminer l'état de la piste avant de l'ouvrir à la circulation ;
- d) aspects particuliers de la construction, y compris les aires de circulation temporaires et d'autres détails indiqués dans le présent chapitre ;
- e) plan d'exception à exécuter en cas de défaillance anormale ou de désastre imprévu ;
- f) coordination des mesures avant enquête nécessaires pour déterminer l'épaisseur et la qualité de l'échantillon de chaussée concerné ;
- g) assurance que la conception est réalisée par un personnel compétent, y compris la définition des tâches et du flux de travail et l'établissement d'un plan d'assurance de la qualité.

Rôle du directeur de projet et de l'ingénieur de chantier

4.2.3 Il est essentiel que l'administration aéroportuaire choisisse un directeur de projet compétent pour le charger de surveiller toutes les phases du projet, de la planification jusqu'à la vérification finale des travaux achevés. Les

qualifications du directeur de projet pourraient être évaluées par des organisations internationales. La personne choisie devrait avoir de l'expérience dans la conception et la gestion de projets de construction de chaussées d'aérodrome et bien connaître le fonctionnement de l'aéroport. Le directeur de projet devrait être l'autorité suprême en ce qui concerne tous les aspects techniques du projet, et devrait être chargé de le coordonner avec l'exploitation de l'aéroport. Afin qu'il y ait continuité et coordination appropriée avec tous les éléments de cette exploitation, le directeur de projet devrait être la seule personne en contact avec des éléments de l'administration aéroportuaire, quels qu'ils soient. Ses fonctions devraient comprendre les suivantes :

- a) planification et conception :
 - 1) établir de façon claire et concise des voies de communication ;
 - 2) faire partie de l'équipe de sélection de l'ingénieur concepteur ;
 - 3) coordonner la conception du projet de manière à respecter les contraintes budgétaires applicables ;
 - 4) assurer la coordination aéroport-compagnies aériennes en ce qui concerne l'examen de la conception, y compris l'horaire des travaux, les besoins de l'exploitation des aéronefs, les examens techniques et l'établissement de procédures de coordination de tous les travaux ;
 - 5) présider toutes les réunions ayant trait au projet ;
- b) construction :
 - 1) assurer la gestion complète de la construction, des inspecteurs étant prévus en nombre adéquat pour observer les travaux effectués par l'entrepreneur et élaborer des documents à ce sujet ;
 - 2) communiquer avec le service météorologique, le service d'exploitation de l'aéroport et le contrôle de la circulation aérienne, avant le début des travaux, pour établir que les conditions météorologiques et la circulation aérienne permettent aux travaux de se dérouler comme prévu, et obtenir la confirmation du fait par le contremaître ;
 - 3) communiquer chaque jour avec le contremaître nommé par l'entrepreneur, pour s'entendre avec lui sur l'ampleur des travaux à effectuer, afin que la piste puisse être ouverte chaque matin à l'heure spécifiée. Il s'agit plus particulièrement des endroits où la chaussée sera réparée ou remplacée ;
 - 4) effectuer, en compagnie du personnel du service d'exploitation de l'aéroport, une inspection de la zone de construction, avant son ouverture à la circulation, pour s'assurer que toutes les surfaces ont bien été balayées, que les aires de circulation temporaires sont correctement construites et que des marques ont été apposées aux fins de la sécurité des aéronefs.

Le directeur de projet doit contrôler pendant toute la durée de la construction que les règlements et les normes minimales nationales sont respectées (p. ex. en Allemagne, ZTV-Asphalt, chapitre 5 ou ZTV-Béton, section 3.5 ou l'usage des États-Unis mentionné au chapitre 4 du présent manuel).

4.2.4 Un ingénieur de chantier, de préférence un ingénieur du génie civil, sera très utile au projet et au directeur de projet. Les fonctions de cet ingénieur devraient comprendre les suivantes :

- a) élaborer de la documentation sur les travaux exécutés pendant chaque séance de construction ;
- b) veiller à ce que tous les essais soient accomplis et à ce que des résultats soient obtenus pour chaque séance de construction ;

- c) prévoir l'inspection qui doit avoir lieu pendant chaque séance de construction ;
- d) observer la façon dont les clauses du marché sont respectées et signaler toutes anomalies au directeur de projet ainsi qu'à l'entrepreneur ;
- e) tenir un journal des travaux de construction.

Essais

4.2.5 À la fin de chaque phase de travail et avant le début de l'exploitation, un essai d'acceptation doit être effectué et les résultats doivent être vérifiés avant le début de l'exploitation. Normalement, ces procédures exigent du personnel supplémentaire chargé de veiller à ce que les essais soient accomplis correctement et à temps.

4.2.6 L'examen de la qualité des matières premières est effectué conformément à la réglementation nationale. Les normes minimales doivent en l'occurrence être respectées (p. ex en Allemagne, TL-asphalte ou TL-béton). Pour l'installation d'un béton à durcissement rapide et la surveillance au moyen de détecteurs (ordinateur de contrôle), voir la norme néerlandaise NEN 5970.

Inspection

4.2.7 L'ampleur et la qualité de l'inspection effectuée représentent l'un des plus importants aspects de n'importe quel projet de construction ou de rénovation de chaussée. Comme l'aéroport juge utile d'accepter des aéronefs chaque fois que la piste est ouverte à la circulation, il faut faire des essais de réception pendant chaque séance de construction. Il est recommandé de prévoir au minimum le personnel ci-après, en plus du directeur de projet et de l'ingénieur de chantier, pour s'assurer que les clauses du marché sont respectées.

- a) **Inspecteur de centrale de matériaux (asphalte, béton).** Un inspecteur et un aide auxquels il incombe principalement de faire des essais de contrôle de qualité, y compris le triage des granulats, des essais d'échantillons d'asphalte prélevés dans les trémies et des essais Marshall (p. ex. le prélèvement d'échantillons du réservoir de gaz et les essais Marshall), les essais d'affaissement, la lecture d'un ordinateur de contrôle et l'essai de résistance à la compression.
- b) **Inspecteur pour la répandeuse ou l'épandage manuel.** Un inspecteur par machine et/ou boîte à main. Deux inspecteurs devraient accompagner chaque répandeuse. Il leur appartiendrait de ramasser les bordereaux de livraison, de vérifier la température du matériau livré, de vérifier les méthodes de contrôle du nivellement et de vérifier les techniques de répandage de l'asphalte ainsi que la régularité des joints de construction.

Note.— Il est recommandé d'effectuer un essai sur le terrain avant les travaux de construction afin de tester les conditions d'installation et le matériau.

- c) **Inspecteur de compactage.** Il devrait incomber à l'inspecteur de compactage de s'assurer que les rouleaux se succèdent dans l'ordre voulu et, à l'aide d'un appareil de mesure de compacité, d'obtenir sur place, pour les fournir à l'entrepreneur, des données de compactage optimales.
- d) **Équipe de levé.** Pour que le travail soit bien fait, on doit connaître les niveaux définitifs à chaque séance de construction. Un géomètre professionnel indépendant et son équipe devraient enregistrer les niveaux du revêtement exécuté, à intervalles maximaux de 8 m dans le sens longitudinal et 4 m dans le sens transversal, et communiquer les résultats au directeur de projet à la fin de chaque séance de construction.

- e) **Inspecteur des travaux de réfection de chaussée.** L'inspecteur des travaux de réfection de chaussée sera chargé de faire l'inspection de tous les travaux de réfection de chaussée et de préparation de la surface avant le répandage.
- f) **Inspecteur électricien.** L'inspecteur électricien veille au respect des clauses du marché.

4.3 Considérations relatives à la conception

4.3.1 Les plans et les clauses du marché de travaux de réfection de chaussée et de répandage d'un nouveau revêtement en heures creuses devraient être suffisamment détaillés pour permettre de déterminer aisément les limites des travaux de réfection, les niveaux définitifs et l'épaisseur du revêtement. Ces plans et clauses doivent être utilisés par l'entrepreneur et le personnel d'inspection pendant chaque séance de construction, et être clairs et précis à tous égards.

Levé topographique

4.3.2 Un réseau complet de repères doit être mis en place sur le côté de la piste ou de la voie de circulation, à intervalles d'environ 125 m en vue d'une étude par section. Cette étude devrait se faire à intervalles d'environ 8 m dans le sens longitudinal et de 4 m dans le sens transversal. Il faut faire preuve d'une prudence extrême en matière de nivellement, car les cotes servent à déterminer l'épaisseur du revêtement d'asphalte. Le concepteur ne devrait pas songer à utiliser les niveaux indiqués sur des levés ou des dessins conformes à l'exécution qui ont été réalisés en hiver, puisqu'il a été démontré que les cotes peuvent varier d'une saison à l'autre. Ce facteur est particulièrement critique dans le cas des revêtements d'asphalte exécutés en une seule passe de répandeuse.

4.3.3 Après que l'on a déterminé les niveaux définitifs et la pente transversale de la piste, il faut faire figurer dans les plans un tableau des niveaux, que l'entrepreneur utilisera pour préparer ses soumissions et pour mettre en place les fils de guidage. Ce tableau devrait comprendre une colonne indiquant la cote actuelle de la piste, une colonne indiquant le niveau définitif du revêtement et une colonne indiquant l'épaisseur de celui-ci. Les niveaux devraient être indiqués tous les 8 m dans le sens longitudinal et tous les 4 m dans le sens transversal. C'est là un élément jugé indispensable à l'élaboration de plans relatifs à des marchés de construction en heures creuses.

Détails particuliers

4.3.4 Les plans devraient comprendre des détails relatifs à ce qui suit :

4.3.4.1 **Aires de circulation temporaires.** À la fin de chaque séance de répandage d'enrobés à chaud, il faudra construire une aire temporaire pour raccorder le nouveau revêtement à la chaussée existante. C'est seulement lorsque l'épaisseur du revêtement ne dépasse pas 4 cm que l'on peut se dispenser de construire une aire. Lorsque la construction du nouveau revêtement exige plusieurs passes de répandeuse, les aires devraient être espacées de 150 m minimum. On devrait autant que possible commencer les travaux à l'une des extrémités de la piste et se diriger vers l'autre extrémité, dans le sens même de la majorité des décollages et atterrissages, de manière que la pente soit descendante pour la plupart des aéronefs. Voir les figures A6-13 et A6-14.

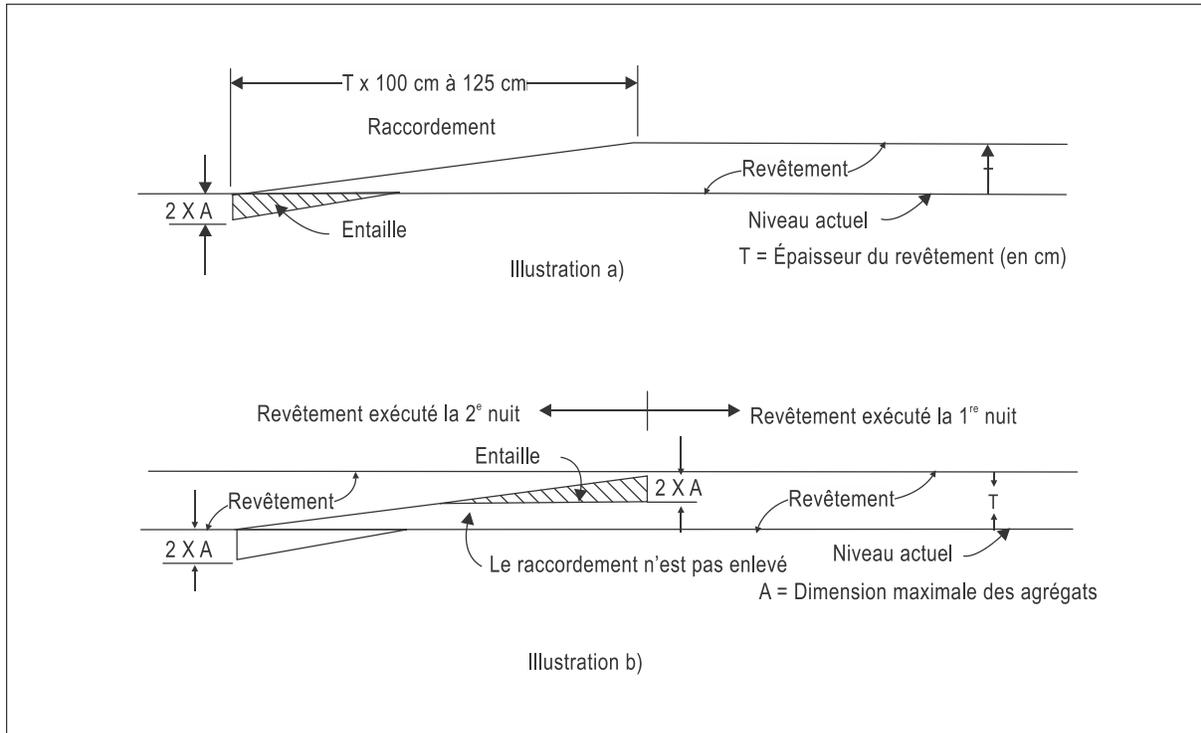


Figure A6-13. Construction d'une aire temporaire à l'aide d'une reprofileuse

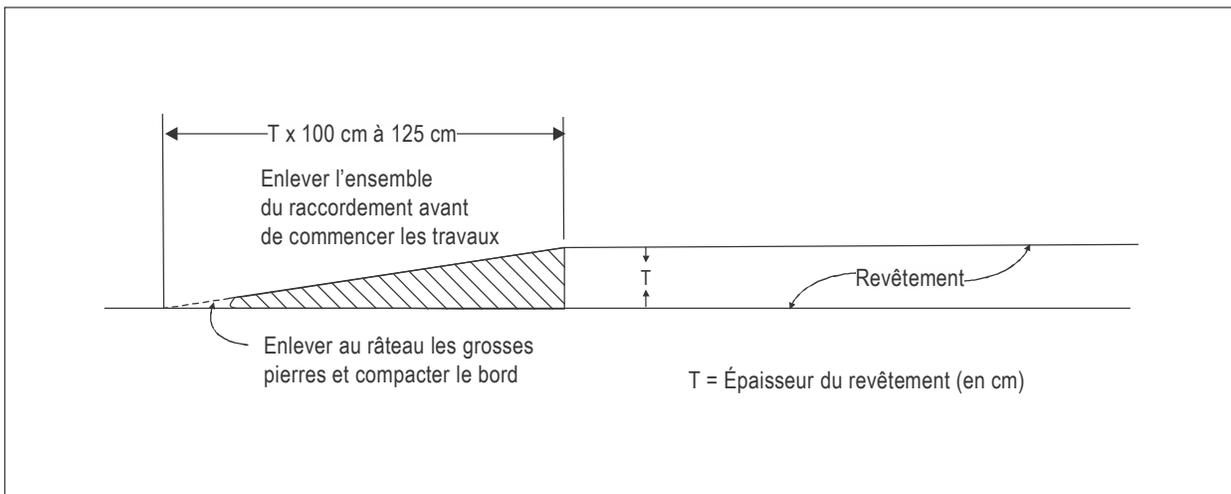


Figure A6-14. Construction d'une aire temporaire sans reprofileuse

4.3.4.2 **Feux encastrés.** Les plans doivent, le cas échéant, comporter des détails sur la façon d'enlever et de remettre en place les feux encastrés. Ils devraient indiquer la façon d'enlever le feu même et la rallonge, de placer une plaque au-dessus de la base du feu, de remplir le logement d'enrobé à chaud en attendant que la construction du revêtement soit achevée, de faire un levé exact, d'enlever une carotte de 10 cm pour marquer le centre de ladite plaque, et d'exécuter le carottage définitif à l'aide d'une machine appropriée. On pourra ensuite remettre le feu en place avec une nouvelle rallonge, à la bonne hauteur.

4.3.4.3 **Marques de piste.** À l'occasion de travaux de construction de revêtement de piste en heures creuses, on a jugé acceptable, si l'information est convenablement publiée dans un NOTAM, de n'apposer que les marques axiales et les numéros de piste sur le nouveau revêtement en attendant d'achever la dernière couche d'asphalte et de pouvoir apposer les marques définitives. Dans certains cas, lorsqu'on a recours au reprofilage à froid ou des revêtements formés de multiples couches, on peut omettre un maximum de trois marques axiales consécutives afin que les différentes couches collent mieux les unes aux autres.

4.3.4.4 **Construction avec du béton.** Outre le renouvellement de la chaussée par de l'asphalte, il est possible d'utiliser un matériau en béton. Grâce au développement du mélange de béton, la fabrication de béton à durcissement rapide est désormais applicable. À cette fin, une recherche préalable sur la formulation du béton devrait être effectuée afin de permettre une construction complète dans le délai imparti (minimum dix heures). Pendant la pose, la résistance minimale à la compression requise peut être déterminée à l'aide de détecteurs (ordinateur de contrôle).

4.3.4.5 **Portée de l'étude préalable.** L'étude préalable de la structure et du sol de fondation doit inclure dans les paramètres la durabilité, la sensibilité à l'environnement forestier et la sensibilité à l'eau. L'étendue dépend des exigences spécifiques du pays (par exemple, en Europe, Eurocode 7). Il est également recommandé d'effectuer un calcul de la PCR avant la réfection de la chaussée.

ISBN 978-92-9265-997-4



9 789292 659974