Direction générale de l'Aviation civile

Service technique de l'Aviation civile

Octobre 2016

Méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées aéronautiques souples Guide technique



Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

www.stac.aviation-civile.gouv.fr

X

STAC

dgac

Direction générale de l'Aviation civile

Service technique de l'Aviation civile

Octobre 2016

Méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées aéronautiques souples Guide technique

Service technique de l'aviation civile Département Structures Adhérence

> 2º édition V1.2-Octobre 2016

Ce guide a été élaboré par un groupe de travail constitué de :

Jean-Maurice BALAY (IFSTTAR), Juliette BLANC (IFSTTAR), Régis BOST (STAC), Michaël BROUTIN (STAC), Lydie DELOFFRE (LRPC de Strasbourg), Bernard DEPAUX (STAC), Sandrine FAUCHET (STAC), Sébastien HERVÉ (LRPC Angers), Pierre HORNYCH (IFSTTAR), Arnaud MAZARS (LRPC de Toulouse), Damien MOUNIER (STAC), Hai Pham DOAN (STAC), Jean-Michel PIAU (IFSTTAR), Jérôme VARILLON (LRPC Clermont Ferrand) et piloté par Damien MOUNIER et Sandrine FAUCHET.

Le groupe de travail remercie le comité d'experts pour l'aide précieuse qu'il a apportée pour l'aboutissement et la validation de ce guide. Il était constitué de:

Mélissa ANDRÉ (Egis), Yasmina BOUSSAFIR (IFSTTAR), Fabrice BRETON (Eurovia), Sandrine BUYTET (Colas), Emmanuel DELAVAL (CETE Nord-Picardie), Michel DUNAND (Guintoli), Cyril FABRE (Airbus), Yann FERREIRA (ADP), Jérôme GARNIER DE BOISGROLLIER (Aéroport de Lyon), Emmanuel HELME-GUIZON (ADPi), Philippe LELIÈVRE (ADP), Ludovic PERISSE (Eiffage TP), Cédric RENAULT (CETE Nord-Picardie), Jérôme ROSSI (SNIA Aix en Provence), Cheikh THIAM (Egis), Jean-Claude VANISCOTE (Eiffage TP), Guillaume VOISIN (LRPC Rouen), Amandine ZIEGELMEYER (Colas).



Résumé

Le présent guide technique expose la méthode française rationnelle et performantielle de dimensionnement des chaussées aéronautiques souples neuves. Elle intègre les derniers développements du domaine de la mécanique des chaussées. La méthode est basée sur un modèle théorique de calcul – modèle linéaire élastique isotrope multi-couche – alimenté par des paramètres de comportement mécanique déterminés par des essais de laboratoire sur les matériaux de chaussées. La justification de la structure de chaussée repose sur un dimensionnement mécanique dont le résultat est la définition des épaisseurs des différentes couches de chaussées et de la nature des matériaux les constituant. Ce calcul est complété, dans un second temps, par une vérification au gel-dégel.

Ce document constitue un cadre de référence technique permettant d'appréhender au mieux et selon une démarche commune, les études de dimensionnement. C'est pourquoi, en plus de la méthode de dimensionnement proprement dite, ce guide aborde des éléments relatifs à la plate-forme support de chaussée, à la couche de surface et aux matériaux de chaussée.

Cette méthode a pour vocation d'être appliquée aussi bien sur les aérodromes français qu'à l'international, les spécificités locales (climat, géotechnique, mode de gestion des infrastructures...) pouvant être intégrées par le projeteur via différents paramètres.

Mots-clés

chaussée aéronautique, structure de chaussée, dimensionnement, matériaux hydrocarbonés, matériaux granulaires, lois d'endommagement, fatigue, déformations permanentes, gel-dégel

Summary

This technical guidance sets out a french design methodology for new flexible airport pavements. It is based on rational principles as well as material performances and it implements the last findings in pavement engineering. The methodology has been established from a theoretical model – multi-layer linear elastic isotropic – the inputs of which are mechanical behavior parameters. These ones are determined from laboratory tests on pavement materials. The validation of pavement structures is based on a mechanical design which results in the determination of pavement layers thickness and nature. This computation is then completed by frost-thaw verification.

This document constitutes a technical frame of reference which enables comprehending pavement design studies at best and with a unique approach. This is why elements relative to pavement foundation, surface course and pavement materials, are tackled complementarily to the design procedure itself.

The method has a vocation to be applied not only to the French airfields, but also abroad. Local specificities (climate, geotechnics, infrastructure management...) may be implemented by designers through various parameters.

Keywords

airfield pavement, pavement structure, design, asphalt materials, unbound materials, damage law, fatigue, permanent deformations, frost-thaw.

Liste des figures

Figure 1:	Vue aérienne de l'aéroport de San Francisco	14			
Figure 2:	Représentation schématique d'une structure de chaussée				
Figure 3:	Exemple de chantier				
Figure 4:	Enrobés hydrocarbonés et enduits superficiels pour chaussées aéronautiques – Guide d'application des normes (GAN) [3]	18			
Figure 5:	Représentation des familles de sections circulées considérées pour le dimensionnement	20			
Figure 6:	Modélisation de la structure de chaussée	21			
Figure 7:	Modélisation du sol support en fonction de la profondeur de substratum rigide	22			
Figure 8:	Représentation d'une grille de calcul située à l'interface couche de base/couche				
	de fondation, et d'un point de calcul $P(x_i, y_j, z_k)$	23			
Figure 9:	Exactitude relative par rapport au modèle de Burmister – Frontière du domaine de comparaison	23			
Figure 10:	Les deux modes d'endommagement considérés pour une structure de chaussée				
	aéronautique souple	24			
Figure 11:	Exemple de profil longitudinal de déformation pour un boggie six roues	27			
Figure 12:	Aéronef à l'atterrissage excentré par rapport à l'axe de piste	28			
Figure 13:	Exemple de profils de dommage (deux critères considérés) pour un A340-200	29			
Figure 14:	Représentation schématique de la RseR				
Figure 15:	Lois d'évolution du coefficient de calage k_c	34			
Figure 16:	Graphique permettant la vérification d'épaisseur minimale de couche de base	43			
Figure 17:	Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR [11]) - Traitement des sols				
	à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS [12])	45			
Figure 18:	Essai de flexion deux points	60			
Figure 19:	Éprouvettes après essai de gonflement	70			
Figure 20:	Coupe de la structure de chaussée considérée	75			
Figure 21:	Détermination du coefficient k_c à partir de la RseR	76			
Figure 22:	Configuration des atterrisseurs de l'Airbus A330-200 et sélection d'un atterrisseur				
	pour le calcul sans balayage	77			
Figure 23:	Cartes des déformations \mathcal{E}_{xx} , \mathcal{E}_{yy} , \mathcal{E}_{xy} et \mathcal{E}_{tmax} à la base de la grave bitume	78			
Figure 24:	Repérage de la position transversale (ligne rouge) pour le calcul du dommage sans balayage	79			
Figure 25:	Historique de déformation en traction à la base de la grave bitume pour $y_j = 4,65 m$	79			
Figure 26:	Profil transversal de dommage cumulé sans balayage	82			
Figure 27:	Repérage de la position transversale (ligne rouge) pour le calcul du dommage avec balayage	82			
Figure 28:	Schéma explicatif sur la dispersion latérale du trafic	83			
Figure 29:	Profil transversal de dommage avec balayage	86			
Figure 30:	Structure 3 – Profils transversaux de dommage en fatigue à la base de la grave bitume (vert) et en déformation permanente au sommet de la plate-forme (bleu) (1)	94			

Figure 31:	Vérification de l'épaisseur d'enrobé pour la structure retenue (1)	94
Figure 32 :	Structure 2 – Profils transversaux de dommage en fatigue à la base de l'enrobé à module élevé (vert) et en déformation permanente au sommet de la plate-forme (bleu)	101
Figure 33:	Vérification de l'épaisseur d'enrobé pour la structure retenue (2)	101
Figure 34:	Structure 3 – Profils transversaux de dommage en fatigue à la base de la grave bitume (vert) et en déformation permanente au sommet de la plate-forme (bleu) (2)	106
Figure 35 :	Profil transversal de dommage en déformation permanente au sommet de la plate-forme pour la vérification spécifique aux aires de stationnement et d'attente	106
Figure 36:	Vérification de l'épaisseur d'enrobé pour la structure retenue (3)	107
Figure B1:	Distribution latérale du trafic	126
Figure E1:	Effet de la température sur les valeurs de modules des différents enrobés	130
Figure E2:	Effet de la fréquence sur les valeurs de modules des différents enrobés	130
Figure F1:	Classement des matériaux de couche de forme traités aux liants hydrauliques suivant leurs performances mécaniques à 90 jours	133

Liste des tableaux

Tableau 1:	Correspondance entre les trois types de familles considérées pour le dimensionnement	
	et les différentes infrastructures aéronautiques usuelles	19
Tableau 2:	Exemples de valeurs de RseR pour différents trafics simples	30
Tableau 3:	Valeurs du coefficient k _s	35
Tableau 4:	Vitesse de déplacement des aéronefs en fonction du type de section	39
Tableau 5:	Valeur des écarts-types en fonction du type de section	40
Tableau 6:	Classes de portance à long terme au niveau de l'arase de la PST	47
Tableau 7:	Caractéristiques minimales pour les granulats constituant les graves non traitées	49
Tableau 8:	Caractéristiques minimales du mélange	50
Tableau 9:	Classes de portance à long terme de la plate-forme support	50
Tableau 10:	Modules associés aux classes de portance à long terme de la plate-forme support pour le dimensionnement des chaussées aéronautiques	52
Tableau 11:	Appréciation du niveau d'agression et de la qualité des caractéristiques de surface de chaussée	54
Tableau 12:	Extrait du GAN [3]- Produits utilisables en couche de roulement	55
Tableau 13:	Extrait du GAN [3]- Produits utilisables en couche de liaison (et de reprofilage)	56
Tableau 14:	Produits utilisables pour la constitution d'une chaussée aéronautique	57
Tableau 15:	Niveaux d'études de formulation selon le niveau de sollicitation	59
Tableau 16:	Écart type sur les épaisseurs à la mise en œuvre des couches en matériaux hydrocarbonés	61
Tableau 17:	Performances mécaniques des graves bitumes	62
Tableau 18:	Sensibilité du module des graves bitumes aux variations de température et de fréquence	62
Tableau 19:	Performances mécaniques des enrobés à module élevé	63
Tableau 20:	Sensibilité du module des enrobés à module élevé aux variations de température et de fréquence	63
Tableau 21:	Caractéristiques principales de composition des enrobés bitumineux	64
Tableau 22:	Performances mécaniques des enrobés bitumineux	64
Tableau 23:	Sensibilité du module de divers bétons bitumineux aux variations de température et de fréquence	65
Tableau 24:	Caractéristiques minimales des granulats constituant les graves non traitées	67
Tableau 25:	Caractéristiques mécaniques des graves non traitées	68
Tableau 26:	Niveau de protection contre le gel	69
Tableau 27:	Valeurs de A_n en fonction de la nature du matériau de la couche de forme	72
Tableau 28:	Valeurs de a_i et b_i en (°C.jour) ^{1/2} cm ⁻¹	73
Tableau 29:	Valeurs des modules des matériaux bitumineux	74
Tableau 30:	Valeurs des dommages cumulés le long d'un profil transversal	80
Tableau 31:	Valeurs des dommages pondérés pour chaque trajectoire 83	-84
Tableau 32:	Trafic retenu pour le dimensionnement (1)	86
Tableau 33:	Détermination de la classe de trafic par type d'aéronef (1)	87
Tableau 34:	Caractéristiques mécaniques des matériaux hydrocarbonés (1)	88
Tableau 35:	Valeurs de k_r en fonction de l'épaisseur de EB-GB 3	89

36:	Valeurs de k_c en fonction de la RseR (1)	89
37:	Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef	
	dans le matériau EB-GB 3	90
38:	Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef	
	au sommet du sol support (1)	91
39:	Trafic retenu pour le dimensionnement (2)	93
40:	Détermination des aéronefs considérés comme dimensionnants (couleur verte)	94
41:	Détermination de la classe de trafic par type d'aéronef (2)	95
42:	Caractéristiques mécaniques des matériaux hydrocarbonés (2)	96
43:	Valeurs de k_r en fonction de l'épaisseur de EB-EME 2	97
44:	Valeurs de k_c en fonction de la RseR (2)	97
45:	Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef	
	dans le matériau EB-EME 2	98
46:	Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef au sommet du sol support (1)	98
47:	Trafic retenu pour le dimensionnement (3)	100
48:	Détermination de la classe de trafic par type d'aéronef	100
49:	Caractéristiques mécaniques des matériaux	101
50:	Valeurs de k_c en fonction de la RseR (3)	102
51:	Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef dans le matériau EB-GB 3	103
52:	Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef au sommet du sol support (3)	103
53:	Définition des classes de trafic	114
54:	Définition des niveaux de sollicitation	114
C1 :	Valeurs de <i>u</i> associées au risque <i>r</i>	127
F1:	Conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme non traitée	131
F2:	Détermination de la classe mécanique des sables et graves traitées aux liants hydrauliques selon le mode de traitement	133
F3:	Classe de PF en fonction de la classe d'AR, des performances mécaniques du matériau traité et de l'épaisseur de la couche de forme	134
G1:	Performances requises à la mise en œuvre des chaussées	135
	36: 37: 38: 39: 40: 41: 42: 43: 42: 43: 43: 44: 45: 50: 51: 52: 53: 54: 54: 54: 71: F1: F2: F3: G1:	 36: Valeurs de k_c en fonction de la RseR (1) 37: Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef dans le matériau EB-GB 3 38: Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef au sommet du sol support (1) 39: Trafic retenu pour le dimensionnement (2) 40: Détermination des aéronefs considérés comme dimensionnants (couleur verte) 41: Détermination de la classe de trafic par type d'aéronef (2) 42: Caractéristiques mécaniques des matériaux hydrocarbonés (2) 43: Valeurs de k_r en fonction de l'épaisseur de EB-EME 2 44: Valeurs de k_c en fonction de la RseR (2) 45: Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef dans le matériau EB-EME 2 46: Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef au sommet du sol support (1) 47: Trafic retenu pour le dimensionnement (3) 48: Détermination de la classe de trafic par type d'aéronef 49: Caractéristiques mécaniques des matériaux 50: Valeurs de k_c en fonction de la RseR (3) 51: Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef dans le matériau EB-GB 3 52: Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef dans le matériau EB-GB 3 53: Détermination de la Classe de trafic par type d'aéronef 54: Otaleurs de k_c en fonction de la RseR (3) 51: Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef dans le matériau EB-GB 3 52: Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef au sommet du sol support (3) 53: Définition des classes de trafic 54: Définition des niveaux de sollicitation C1: Valeurs de u associées au risque r F1: Conditions de suclassement de portance des plates-formes avec couche de forme non traitée F2: Détermination de la classe d'AR, des performances mécaniques du matériau traité et de l'épaisseur de la couche de fo

Sommaire

1. Introduction	_13
1.1. Contexte et objectifs	13
1.2. Domaine d'application	14
1.3. Phasage des études applicables à la conception des infrastructures aéronautiques	16
1.4. Organisation du document	17
2. Principe de la démarche de dimensionnement	19
2.1. Objet	19
2.2. Classement des infrastructures aéronautiques en vue de leur dimensionnement	19
2.3. La méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées aéronautiques	20
2.4. Calcul des sollicitations induites par les aéronefs dans la structure de chaussée	21
2.5. Lois et calculs des endommagements	24
2.5.1. La loi d'endommagement de Wöhler	24
2.5.2. Endommagement élémentaire et loi de Wöhler-Miner	26
2.5.3. Intégration continue de la loi de Wöhler-Miner et calcul des endommagements liés au passage d'un aérone	f _27
2.5.4. Détermination de l'endommagement élémentaire avec prise en compte du balayage	28
2.5.5. Détermination de l'endommagement cumulé pour le trafic projet	29
2.6. Quantification de l'agressivité d'un trafic: RseR	30
2.7. Coefficient <i>K</i> de la loi de fatigue pour les matériaux bitumineux	32
2.7.1. Coefficients relatifs à la loi de fatigue du matériau	33
2.7.2. Coefficient relatif au calcul structurel: le coefficient de plate-forme k_s	35
2.7.3. Le coefficient de risque k	35
3. Mise en œuvre de la démarche de dimensionnement des chaussées souples neuves _	_36
3.1. Données requises pour le dimensionnement des structures de chaussées neuves	36
3.1.1. Période de calcul et risque	36
3.1.2. Le trafic	36
3.1.3. Vitesse et balayage	38
3.1.4. Les données de températures pour la détermination du module des enrobés bitumineux	40
3.1.5. Caractéristiques mécaniques des matériaux	41
3.2. Mise en œuvre des différentes étapes du dimensionnement	41
3.2.1. Première étape : Pré-dimensionnement	41
3.2.2. Deuxième étape : Calculs d'endommagement de la structure et itérations sur l'épaisseur des couches	41
3.2.3. Troisième étape : Ajustement des épaisseurs calculées	42
3.2.4. Quatrième étape : Spécifique au dimensionnement des aires de stationnement et d'attente	44
3.2.5. Cinquième étape : Vérification de la tenue au gel-dégel	44
3.2.6. Sixième étape : Définition des profils longitudinaux et des coupes transversales	44

4. La plate-forme support de chaussée	45
4.1. Définition et documents de référence	45
4.2. Caractérisation de la partie supérieure des terrassements	46
4.2.1. Identification des matériaux et conditions d'emploi	46
4.2.2. Environnement hydrique	46
4.2.3. Classification de la partie supérieure des terrassements (PST)	46
4.2.4 Classes de portance de l'arase de terrassement	47
4.3. Couche de forme	48
4.3.1. Rôles et conception de la couche de forme	48
4.3.2. Les matériaux de couche de forme	49
4.3.3. Spécifications se rapportant aux constituants des graves non traitées	49
4.3.4. Spécifications se rapportant aux mélanges pour les graves non traitées	50
4.4. Classement des plates-formes support	50
4.5. Cas particulier des couches de forme traitées aux liants hydrauliques	51
4.6. Caractéristiques mécaniques de la plate-forme support en vue du dimensionnement des cl	haussées_52
4.6.1. Calcul des sollicitations dans la chaussée sous trafic	52
4.6.2. Déformations permanentes de la plate-forme	52
5. La couche de surface	53
5.1. Définition et documents de référence	53
5.2. Choix du type de couche de surface	53
5.3. Définition de la couche de surface	54
6. Les matériaux de chaussée	57
6.1. Matériaux bitumineux - Généralités	57
6.1.1 Cadre normatif	57
6.1.2 Propriétés intrinsèques du mélange – étude de formulation	58
6.1.3 Performances mécaniques pour le dimensionnement	60
6.1.4 Contraintes liées à la mise en œuvre	61
6.2. Grave-bitume	62
6.2.1 Mise en œuvre	62
6.2.2 Performances mécaniques	62
6.3. Les enrobés à module élevé	63
6.3.1 Mise en œuvre	63
6.3.2 Performances mécaniques	63
6.4. Les divers bétons bitumineux et autres enrobés à chaud normalisés	64
6.4.1 Mise en œuvre	64
6.4.2 Performances mécaniques	64
6.5 Matériaux bitumineux tièdes	66
6.6 Enrobés percolés	66
6.7 Les graves non traitées	66
6.7.1 Description faite par la norme	66

6.7.2 Spécifications se rapportant aux constituants	66
6.7.3 Spécifications se rapportant aux mélanges	67
6.7.4 Mise en œuvre	67
6.7.5 Spécifications sur les performances mécaniques	67
7. Vérification au gel-dégel	69
7.1. Les niveaux de protection	69
7.2. Caractérisation de la gélivité d'un sol	70
7.3. Le principe de la vérification au gel-dégel	70
7.4. Sensibilité au gel de la plate-forme de chaussée	71
7.4.1 Quantité de gel admissible en surface des couches gélives situées sous la plate-forme de chaussée	71
7.4.2 Protection thermique apportée par les matériaux non gélifs situés sous la plate-forme de chaussée	72
7.4.3 Quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme de chaussée	72
7.5. Protection thermique apportée par la structure de la chaussée	72
7.5.1 Quantité de gel transmise à la surface de la chaussée	72
7.5.2 Quantité de gel transmise au niveau de la plate-forme de chaussée	73
7.6. Comparaison de Q_t et Q_{PF}	73
8. Exemples d'application	74
8.1. Exemple détaillé de calcul du dommage	74
8.1.1 Description de l'exemple	74
8.1.2 Données associées	74
8.1.3 Calculs préliminaires	75
8.1.4 calcul du profil transversal de dommage sans balayage	78
8.1.5 Calcul du profil de dommage avec balayage	81
8.2. Exemple de dimensionnement d'une voie de circulation	86
8.2.1 Données	86
8.2.2 Calcul des endommagements	88
8.2.3 Conclusion	92
8.3. Exemple de dimensionnement d'une piste	93
8.3.1 Données	93
8.3.2 Calcul des endommagements	96
8.3.3 Conclusion	99
8.4. Exemple de dimensionnement d'un parking	100
8.4.1 Données	100
8.4.2 Calcul des endommagements	102
8.4.3 Vérification spécifique aux aires de stationnement	104
8.4.4 Conclusion	105
8.5. Exemple de vérification au gel-dégel	106
8.5.1 Données	106
8.5.2 Sensibilité au gel de la plate-forme	106
8.5.3 Protection thermique apportée par la structure de chaussée	106
8.5.4 Conclusion	107

GLOSSAIRE	_109
1. Infrastructures aéronautiques	109
2. Structures de chaussées	_110
3. Paramètres utilisés pour le dimensionnement des chaussées	_112
4. Paramètres utilisés pour la vérification au gel/dégel	_113
5. Concepts utilisés pour le dimensionnement des chaussées	_113
6. Paramètres issus du GAN [3]	_114
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	_115
SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS	_117
Annexe A: La loi continue de Wölher- Miner	_121
Annexe B: Calcul de la distribution de trafic en un point donné	_122
Annexe C: Paramètres S_N , S_h , r et coefficient de risque k_r	_123
C1. Le paramètre S_N	123
C2. Le paramètre S _h	123
C3. Le risque de calcul r	123
C4. Coefficient de risque k_r	124
Annexe D: Calcul de la température équivalente pour les matériaux bitumineux	_125
Annexe E: Susceptibilités à la température et à la fréquence des enrobés bitumineux	_126
Annexe F: Règles de dimensionnement des couches de forme	_127
F.1. Couche de forme en matériau non traité	127
F.2. Couches de forme traitées à la chaux seule	128
F.3. Couches de forme en matériaux traités aux liants hydrauliques éventuellement associés à la chaux	128
Annexe G: Phase travaux, critères de réception et dispositions constructives relatives au cloutage et à la protection superficielle des couches de forme	_131
G.1. Critères de réception	131
G.2. Cloutage et protection superficielle	133

1 Introduction

1.1 Contexte et objectifs

La méthode historique française de dimensionnement des chaussées aéronautiques est une méthode empirique, inspirée de la méthode américaine développée par l'*United States Army Corps of Engineers* s'appuyant sur la méthode *CBR* (*California Bearing Ratio*) pour les chaussées souples, et de la méthode *PCA* (*Portland Cement Association*) pour les chaussées rigides.

La méthode *CBR* suppose que la chaussée périt par excès de pression sur le sol support, la résistance du sol support étant qualifiée par l'essai de poinçonnement dit essai CBR. Elle détermine donc les dimensionnements des structures de chaussées acceptables vis-à-vis de ce risque.

La méthode *PCA* suppose que les dalles béton s'appuient sur un massif élastique de raideur donnée. L'épaisseur de dalle est définie de manière à ce que la contrainte maximale de traction du béton ne puisse être atteinte.

Ces méthodes empiriques ont été bâties sur la base d'essais permettant d'intégrer par interpolation l'effet des nombreux facteurs mis en jeu: épaisseurs des couches de matériaux, géométrie et charge des atterrisseurs, conditions climatiques, etc.

Elles trouvent cependant aujourd'hui leurs limites aussi bien vis-à-vis de l'évolution de la flotte aéronautique, faisant apparaître de nouvelles configurations d'atterrisseurs et de nouveaux niveaux de charges, que vis-à-vis de l'évolution de l'offre en matériaux avec des niveaux de performance accrus.

Face à ces constats, il est apparu nécessaire de réviser la méthode française de dimensionnement des chaussées aéronautiques, en l'orientant vers une approche de type « rationnelle », mieux à même de prendre en compte des situations réelles et nouvelles, et adaptable au renforcement des chaussées existantes. Cette amélioration passe par l'utilisation d'une méthode plus explicite basée sur un modèle élastique linéaire permettant de mieux intégrer les performances des matériaux et la silhouette des trains d'atterrissage des aéronefs constitutifs du trafic reçu.

Une telle méthode est utilisée en France depuis plus de 30 ans pour le dimensionnement des structures de chaussées routières. Elle est explicitée dans le guide technique SETRA-LCPC « Conception et dimensionnement des structures de chaussées » [1] de décembre 1994 et fait l'objet de la norme NF P 98-086 [2]. Les deux principaux aspects de la méthode sont les suivants:

Ies matériaux constitutifs des chaussées ont un comportement élastique linéaire (caractérisation des matériaux par leur module d'élasticité et leur coefficient de Poisson);

▶ les sollicitations admissibles par les différents matériaux sont évaluées sur la base de modèles d'endommagement sous chargements répétés dont les paramètres résultent d'essais en laboratoire, de tests en vraie grandeur sur chaussées expérimentales instrumentées et de retour d'expérience sur chaussées réelles en service.

Le parti a été pris de développer la méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées aéronautiques en s'inspirant de la méthode routière, avec pour objectif de la rendre adaptable à d'autres contextes, notamment climatiques, de manière à ce que cette méthode puisse être exportée.

L'objectif est de disposer à terme d'une méthode rationnelle de dimensionnement utilisable pour tout type de chaussées (souples, rigides et autres) et pour tous les cas de dimensionnement (construction neuve, réfection, renforcement). Il conviendra dans le futur d'examiner son intégration dans le cadre international de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) et de la classification *ACN/PCN (Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number*).

1.2. Domaine d'application

La démarche a été volontairement limitée dans un premier temps au cas des chaussées souples neuves, pour être par la suite étendue aux cas évoqués ci-dessus dont l'approche est plus complexe. Le présent guide marque l'aboutissement de cette première étape.



Figure 1 : Vue aérienne de l'aéroport de San Francisco.

La méthode proposée ici s'applique aux pistes, voies de circulation et aires de trafic (aires de stationnement). Concernant ces dernières, on notera toutefois que l'emploi d'une structure bitumineuse est fortement déconseillé lorsqu'il y a des risques de poinçonnement importants, associés aux niveaux de sollicitation NS3 ou NS4 au sens du « Guide d'application des normes » (GAN), Enrobés hydrocarbonés et enduits superficiels pour chaussées aéronautiques [3]. Dans ce cas la structure recommandée est de type rigide, dont le dimensionnement n'est pas traité dans le présent guide. Il n'aborde pas non plus le dimensionnement des chaussées aéronautiques légères, des accotements, des *RESA (Runway End Safety Area)* et des prolongements d'arrêt. La conception et la définition de ces structures pourront se faire conformément aux règles définies dans le document « Dimensionnement des chaussées, volume 1 » de 1983 [4], l'arrêté *TAC* [5] et son annexe, ainsi que le guide « Chaussées aéronautiques en béton hydraulique » de 2000 [6]. Pour ce qui concerne les accotements, on pourra également se reporter à l'« étude sur la capacité portante des accotements pour avions gros porteurs » [7].

Par définition, une chaussée souple aéronautique est constituée de matériaux bitumineux et se compose, de haut en bas:

- d'une couche de roulement en matériaux bitumineux,
- d'une couche de base en matériaux bitumineux,
- d'une couche de fondation, constituée d'une grave non traitée.

En plus des trois couches citées ci-dessus, une couche de liaison peut éventuellement être intercalée entre la couche de roulement et la couche de base. L'ensemble couche de roulement - couche de liaison forme la couche de surface. À noter également que l'ensemble couche de base - couche de fondation forme la couche d'assise. Toutes les couches situées au-dessus de la plate-forme constituent la structure de chaussée.



La figure 2 ci-dessous propose une représentation complète d'une structure de chaussée.

Figure 2: Représentation schématique d'une structure de chaussée.

Cette structure repose soit directement sur le sol support surmonté d'une éventuelle couche de réglage, soit sur une couche de forme traitée ou non. La mise en œuvre d'une couche de forme traitée ne permet pas de déroger au schéma structurel ci-dessus, en particulier pour ce qui concerne la mise en place d'une couche de fondation. Le paragraphe 4.5 précise ce point.

La plate-forme est confondue avec l'arase de terrassement dans les cas où aucune couche de forme n'est mise en œuvre.

Pour les cas où le trafic dimensionnant reste faible et peu agressif vis-à-vis de la chaussée considérée, la couche de base peut être réalisée en matériau granulaire, la structure de chaussée ne comportant alors qu'une seule couche en matériaux bitumineux (voire deux avec la couche de liaison). Cette alternative est envisa-geable lorsque l'agressivité d'un trafic, déterminée par le paramètre « Roue Simple Équivalente Rationnelle » (RseR), dont le principe de calcul est détaillé au paragraphe 2.6, satisfait les deux conditions suivantes :

- ✓ Trafic composé d'aéronefs des groupes 1 et 2 uniquement (au sens du GAN [3]),
- ✓ RseR < 10 t pour l'ensemble du trafic (calculée pour une structure avec couche de base hydrocarbonée).

Par méthode de dimensionnement, il faut entendre l'ensemble du processus conduisant à dimensionner une chaussée aéronautique pour une durée de service donnée et un trafic attendu. Le processus comprend le recueil des données de base, le choix des matériaux constitutifs de la chaussée, la modélisation de son comportement et la vérification de sa tenue aux sollicitations mécaniques et climatiques sur l'ensemble de sa durée de service.

Ainsi le présent guide explicite les étapes de la démarche de dimensionnement des chaussées souples neuves conduisant à la détermination des épaisseurs des différentes couches de la structure de chaussée en fonction du trafic et des conditions environnementales. Il précise de quelle manière les paramètres de calcul sont rattachés aux propriétés physiques et mécaniques des matériaux (valeurs normalisées dans le cas des solutions de base ou valeurs de laboratoire dans le cas des variantes). Il contient aussi de nombreuses considérations sur le choix des matériaux, qui doivent être conformes à la règlementation en vigueur, ainsi que sur la définition, la caractérisation et l'amélioration des plates-formes support de chaussée.

Enfin, on notera que ce guide s'attache à assurer la lisibilité de la méthode tant sur ses points forts que sur ses points faibles. En particulier, les données et retours d'expérience nécessaires au calage des lois d'endommagement des matériaux sont beaucoup moins nombreux dans le domaine aéronautique que dans le domaine routier. Les paramètres de calage introduits dans ce guide pourront donc faire l'objet de modifications dans ses versions à venir afin d'intégrer les enseignements tirés de son application.

1.3. Phasage des études applicables à la conception des infrastructures aéronautiques

Pour toute opération autre que les travaux d'entretien, les études d'infrastructures aéronautiques donnent obligatoirement lieu à la production de deux documents techniques successifs:

▶ le dossier d'Avant-Projet qui permet d'apprécier la faisabilité de l'opération en précisant sa conception générale, les dispositions principales des ouvrages à réaliser et son coût financier. Elle doit mettre en évidence les éventuelles difficultés techniques qui seront rencontrées dans la phase de réalisation,

▶ le dossier Projet établi après approbation de l'étude d'Avant-Projet. Il a pour objectif de préciser cette dernière, en proposant notamment des solutions techniques aux difficultés qui avaient été soulevées sans être étudiées. Le dossier Projet contient tous les éléments nécessaires à la définition complète des ouvrages de l'opération.



Figure 3: Exemple de chantier.

Ces deux niveaux d'études requièrent des calculs de dimensionnement de structures de chaussées. Les calculs, qu'ils soient en phase Avant-Projet ou en phase Projet, nécessitent le même type de données d'entrée. Elles sont relatives non seulement à la topographie, la climatologie, l'hydrogéologie, la géotechnique, mais aussi à la période de calcul et au risque de calcul retenus, au trafic et aux propriétés des matériaux constitutifs des chaussées.

Le degré de précision attendu de l'ensemble de ces données dépend du niveau d'étude.

En ce qui concerne les données hydrogéologiques et géotechniques, elles doivent être issues d'une étude spécifique réalisée par un bureau d'études spécialisé. Les reconnaissances de terrain doivent être menées en plusieurs phases, qui peuvent être définies en cohérence avec la norme NF P 94-500 [8], en fonction des questions qui se posent lors de la programmation, de la conception et de la construction du projet considéré. On distingue ainsi :

✓ les reconnaissances préliminaires pour l'implantation et le pré-dimensionnement des ouvrages;

✓ les reconnaissances pour le dimensionnement.

Les techniques de reconnaissance géotechnique associées au phasage du projet sont traitées dans l'Eurocode 7 - Partie 2 « Reconnaissances et essais » (NF EN 1997-2) [9]. On pourra également s'appuyer sur la note suivante : « Organisation des reconnaissances géotechniques des tracés routiers et autoroutiers » de 1981 [10].

Pour une étude d'Avant-Projet, le rapport géotechnique dans son volet « terrassement » doit se référer au guide technique LCPC-SETRA « Réalisation des remblais et des couches de forme » de 1992, (désigné par la suite « guide des terrassements routiers » ou « GTR »), réédité en 2000 [11] et si nécessaire au guide technique LCPC-SETRA « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques » de janvier 2000 (GTS) [12]. Il doit fournir entre autres, la caractérisation des matériaux en place selon la norme NF P 11-300 [13], les possibilités de réemploi des terres, la classe de plate-forme visée sous la chaussée. Le document doit également traiter de la nécessité ou non d'avoir recours à des traitements de terrain pour améliorer la classe de l'arase de terrassement et celle de la plate-forme de chaussée, sans pour autant définir précisément le traitement à mettre en œuvre. Ce rapport est établi à l'aide de données bibliographiques et d'un nombre réduit d'investigations *in situ*. Il présente une première approche du contexte géotechnique et peut formuler des hypothèses que les études suivantes s'attacheront à vérifier.

En ce qui concerne l'étude géotechnique du dossier Projet, le nombre et le choix des investigations (sondages, essais de laboratoire, etc.) seront définis en fonction des orientations constructives retenues au niveau de l'Avant-Projet. L'étude géotechnique doit préciser les données et entériner les conclusions fournies dans l'étude d'Avant-Projet. Elle définira la composition du traitement éventuellement nécessaire à l'amélioration de la portance de la plate-forme support de chaussée, en se référant au GTS [12].

Il doit résulter de ces études la définition de la nature de la couche de forme et de son épaisseur minimale, au regard de la valeur minimale de déformabilité de la plate-forme support de chaussée demandée par le projeteur, à court terme (pour préciser les critères de réception dans le cadre du marché travaux) et à long terme (pour les besoins spécifiques du dimensionnement) que ce soit pour l'arase ou pour la couche de forme, traitée ou non traitée.

L'approche peut être approximative pour une étude d'Avant-Projet mais elle se doit d'être fiable et précise pour une étude de Projet. Elle doit également définir les dispositions de drainage associées au dimensionnement des plates-formes et des arases, développées dans les guides techniques « Conception et dimensionnement des réseaux de drainage des aérodromes » STBA (2000) [14], « Drainage routier » LCPC-SETRA (2006) [15], complété par la note d'information SETRA N° 120 « Apport du drainage dans la conception des plates-formes support de chaussées » [16].

1.4. Organisation du document

La suite de ce document s'articule en sept chapitres, un glossaire et cinq annexes :

Chapitre 2: Principe de la démarche de dimensionnement

Ce chapitre débute par le classement des différentes aires aéronautiques auxquelles s'applique la méthode de dimensionnement. Il décrit ensuite la démarche de dimensionnement et introduit les lois d'endomma-gement et la notion de cumul des dommages.

Chapitre 3: Mise en œuvre de la démarche de dimensionnement

Ce chapitre décrit les données requises pour dimensionner la structure de chaussée et détaille la méthode rationnelle de calcul.

Chapitre 4: La plate-forme support de chaussée

Ce chapitre s'intéresse à la caractérisation de la plate-forme par analyse du sol support et d'une couche de forme éventuelle sur laquelle repose la chaussée.

Chapitre 5: La couche de surface

Ce chapitre reprend les principaux éléments inhérents aux couches de surface développés dans le GAN [3], avec notamment une présentation rapide de la démarche à suivre pour garantir la résistance des couches de surface aux différentes agressions qu'elles subissent.

Chapitre 6: Les matériaux de chaussée

Ce chapitre présente l'ensemble des textes et dispositions techniques existant en France et par lesquels sont codifiés et décrits les différents matériaux et produits des couches de chaussée.

Pour les divers matériaux élaborés sont données :

✓ une description des caractéristiques physiques et mécaniques des diverses classes de matériaux de référence pour lesquels la méthode de dimensionnement des structures de chaussées routières a été calée,

✓ et la manière dont les valeurs des paramètres de calcul sont déduites des résultats des essais mécaniques.

Chapitre 7: La vérification au gel-dégel

Ce chapitre énonce les principes de la vérification de la tenue au gel-dégel des chaussées, qui est une étape à part entière du processus de dimensionnement.

Chapitre 8: Des exemples d'application

La méthode rationnelle de dimensionnement des structures de chaussées aéronautiques neuves de type souple est abordée de façon pratique à l'aide de quelques exemples d'application. Le premier exemple illustre, en particulier, en détail les différentes étapes de calcul.

Glossaire

En fin de document, un glossaire rappelle les termes et définitions spécifiques au domaine aéronautique.

Annexes

Les annexes traitent du mode de calcul de certains paramètres (la distribution du trafic en un point donné, le risque de calcul, la température équivalente pour les matériaux bitumineux), des règles de dimensionnement des couches de forme et de leurs critères de réception.

Ce guide se veut *a minima* autoporteur. Ses rédacteurs ont donc pris le parti de reprendre parfois intégralement des passages issus de documents de référence. Pour les chapitres traitant de la couche de surface et des matériaux de chaussée, lorsque la compréhension du texte en dépend, des extraits du GAN [3] sont repris. Dans d'autres cas, ce document est seulement cité en référence afin de ne pas alourdir la rédaction du présent guide. Il n'en reste pas moins que la connaissance du GAN [3] et de son utilisation conjointe avec le présent guide sont nécessaires pour une bonne mise en application de la méthode de dimensionnement.



Figure 4: Enrobés hydrocarbonés et enduits superficiels pour chaussées aéronautiques – Guide d'application des normes (GAN) [3].

2. Principe de la démarche de dimensionnement

2.1. Objet

Le dimensionnement consiste à choisir les matériaux, à déterminer les épaisseurs des couches et à vérifier la tenue de la structure au gel-dégel. Dans le cas des chaussées souples, objet du présent guide, la démarche rationnelle de dimensionnement des chaussées s'applique au dimensionnement structurel des couches d'assises et s'opère vis-à-vis du mécanisme d'endommagement par fatigue des couches en matériaux hydrocarbonés et du mécanisme d'endommagement par déformations permanentes des couches en matériaux granulaires, y compris de la plate-forme de chaussée. En revanche, la méthode de dimensionnement ne prend pas directement en compte le mécanisme d'orniérage par fluage des matériaux hydrocarbonés. Le problème est traité par un choix adéquat des matériaux sur la base d'essais de laboratoire.

Le choix de la couche de surface (matériaux constitutifs, épaisseur) traité dans le chapitre 5 de ce guide, reste quant à lui empirique.

2.2. Classement des infrastructures aéronautiques en vue de leur dimensionnement

Les définitions des différents termes relatifs aux chaussées aéronautiques sont rappelées dans le glossaire (p109).

En termes de dimensionnement, les trois familles de sections suivantes sont introduites et considérées :

- les sections circulées à vitesse élevée,
- les sections circulées à vitesse modérée,
- les aires de stationnement et les sections circulées à faible vitesse.

Comme explicité dans le tableau 1 ci-dessous, chaque zone d'un aérodrome définie usuellement peut être rattachée à l'une de ces familles. À chaque famille est attaché le choix de valeurs numériques de deux paramètres (vitesse et amplitude de balayage), définis au paragraphe 3.1.3.

Sections circulées à vitesse élevée	Partie courante de la piste				
Sections circulées à vitesse modérée	Voie de desserte exploitée en mode « roulage » Voie de relation Entrée/sortie de piste 600 premiers mètres de la piste, intégrant le seuil Voie de circulation partie courante Voie de circulation raccordement				
Aires de stationnement et sections circulées à faible vitesse	Voie de desserte exploitée en mode « push-back » Aire de stationnement Raquette de retournement Aire d'attente (ou plate-forme)				

Tableau 1: Correspondance entre les trois familles de sections considérées pour le dimensionnement et les différentes infrastructures aéronautiques usuelles.



Figure 5 : Représentation des familles de sections circulées considérées pour le dimensionnement.

2.3. La méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées aéronautiques

La méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées aéronautiques, objet du présent guide reprend les bases de la méthode de dimensionnement des chaussées routières et autoroutières, telle qu'elle est décrite dans le guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussées » (SETRA-LCPC) [1] ainsi que dans la norme NF P 98-086 [2]. La transposition aux chaussées aéronautiques a nécessité diverses adaptations, décrites dans cette partie du guide et la suivante, tant en ce qui concerne la description des données nécessaires au calcul que le déroulement des calculs et le traitement des résultats.

La méthode comporte deux étapes. La première porte sur le dimensionnement mécanique de la structure, la seconde sur la vérification au gel-dégel.

Le dimensionnement mécanique consiste à vérifier que la structure choisie peut supporter le trafic d'aéronefs prévu pendant la période de calcul préalablement fixée.

Notons ici que l'expression « période de calcul » est jugée préférable à celle de « durée de vie », qui littéralement n'a guère de sens pour une chaussée. D'une part, en effet, les dégradations sur un linéaire de chaussée se développent de façon non homogène, d'autre part des considérations de sécurité et d'économie font que des opérations d'entretien seront toujours effectuées avant qu'il n'y ait destruction complète de la structure de chaussée. On ne peut donc véritablement parler de « fin de vie », ni de « durée de vie » d'une chaussée.

Le dimensionnement mécanique repose sur le calcul :

des sollicitations produites dans la structure par les différents aéronefs, en utilisant le modèle élastique linéaire isotrope multicouche,

de l'endommagement « individuel » généré, dans chaque matériau, par le passage de chacun des aéronefs. La loi d'endommagement est calée à partir d'essais de fatigue en laboratoire pour les matériaux bitumineux (entre autres) ou de façon empirique pour les matériaux granulaires non traités et les plates-formes. Dans les couches bitumineuses, l'endommagement est créé par le phénomène de fatigue alors que dans les sols et les matériaux granulaires non traités, il se fait par déformations permanentes,

▶ de l'endommagement total, obtenu par sommation de ces endommagements « individuels » sur toute la période de calcul, compte tenu du trafic considéré et des lois de probabilité de balayage¹. L'endommagement de la chaussée est alors défini comme la valeur maximale des endommagements totaux calculés pour chacune des couches.

¹ Densités de probabilité relative au positionnement latéral des aéronefs sur les différentes aires circulées.

La détermination des caractéristiques à prendre en compte dans le dimensionnement, en particulier les paramètres d'élasticité des matériaux, est précisée dans les chapitres suivants.

La méthode est assortie de coefficients d'ajustement qui interviennent dans l'expression des lois d'endommagement. Parmi ceux-ci intervient notamment le coefficient de calage issu de l'observation du comportement de chaussées expérimentales et de retours d'expérience. Ce paramètre permet d'intégrer aux résultats des calculs théoriques, d'une part les effets que le modèle ne peut représenter en raison des simplifications faites, d'autre part les biais liés à la description des propriétés des matériaux et à leur mise en œuvre.

L'application de la démarche de dimensionnement commence par un recueil de l'ensemble des données du projet (trafic aéronefs, période de calcul, etc.) et par le choix des paramètres de dimensionnement, notamment les caractéristiques de portance de la plate-forme, la nature des matériaux envisagés dans le cadre du projet et leur niveau de performance. En solution de base, les matériaux devront être sélectionnés parmi ceux faisant l'objet de normes produit à savoir les normes de la série NF EN 13-108 [17] pour les matériaux bitumineux et la norme NF EN 13-285 [18] pour les graves non traitées. La suite de la démarche consiste à appliquer la méthodologie décrite précédemment (calcul des sollicitations et des endommagements qui en découlent), en itérant sur les épaisseurs des différentes couches – ou de certaines de ces couches – afin d'obtenir un endommagement total de la chaussée aussi proche que possible de 1 par valeur inférieure.

L'ajustement des épaisseurs doit être fait de façon à :

- tenir compte des contraintes technologiques d'épaisseurs minimale et maximale des couches pour atteindre les objectifs de compacité et d'uni, qui dépendent de la nature des matériaux,
- Imiter le nombre d'interfaces et ainsi réduire les risques de défaut de liaison à ces niveaux,
- > tenir compte des autres critères du projet (technico-économiques, environnementaux, etc.).

2.4. Calcul des sollicitations induites par les aéronefs dans la structure de chaussée

Les calculs de sollicitations induites au sein de la structure de chaussée par les charges aéronautiques sont réalisés à l'aide d'un modèle élastique linéaire isotrope multicouche semi-infini, tel que représenté sur la figure 6.



Figure 6: Modélisation de la structure de chaussée.

Ce modèle décrit la structure de chaussée par une succession de couches, d'épaisseur finie et homogène. Le sol support est, quant à lui, représenté par une couche d'épaisseur infinie en profondeur, sauf contexte géologique particulier.

En cas de présence d'un substratum rigide situé à une profondeur h_{sub} (comptée depuis l'arase de terrassement) comprise entre 2 et 6 m, le massif support est divisé en deux couches. L'une est d'épaisseur finie h_{sub} et l'autre, représentant le substratum, est d'épaisseur infinie. Le substratum est ici défini comme un horizon pouvant être considéré comme indéformable par rapport à la rigidité du sol qu'il supporte, et donc associé à une valeur de module élastique très élevée de l'ordre de 10 000 MPa.

Une étude spécifique est nécessaire lorsque le substratum est situé à une profondeur inférieure ou égale à 2 m car le caractère semi-infini du modèle de calcul n'est alors pas applicable.

Les différents cas de figure sont représentés avec la modélisation associée sur la figure 7 ci-dessous.



Figure 7: Modélisation du sol support en fonction de la profondeur de substratum rigide.

Pour chaque couche, le matériau est supposé élastique linéaire isotrope d'extension infinie dans le plan horizontal, caractérisé par un module *Young* noté *E* et un coefficient de Poisson noté *v*. Pour le dimensionnement des structures de chaussées neuves de type souple, les interfaces entre couches sont toutes considérées collées. Le calcul est effectué sous chargement statique.

Le trafic est usuellement décrit par les différents types d'aéronefs prévus sur la chaussée aéronautique et par leur fréquence de passage, avec distinction des décollages et des atterrissages. Les aéronefs sont décrits par la géométrie de leur train d'atterrissage, l'empreinte au sol de chaque roue étant assimilée, par défaut, à un disque circulaire. Le rayon des empreintes, les charges et les valeurs de pression à considérer sont celles qui figurent dans la base de données d'avions « Ficav » du service technique de l'Aviation civile.

Les sollicitations produites par chacun des aéronefs sont calculées dans des plans horizontaux (x, y), où x représente l'axe longitudinal de la charge roulante (supposé confondu avec l'axe de la chaussée) et y la direction transversale. Les plans (x, y) sont situés à la base des couches liées (pour l'évaluation des extensions horizontales intervenant dans le critère d'endommagement des matériaux bitumineux) et au sommet des couches non liées (pour l'évaluation des contractions verticales du critère de déformation permanente de ces matériaux), où les valeurs de sollicitations sont les plus importantes. Pour chacun de ces plans situés à la cote z_k , les sollicitations sont calculées selon une grille de points (x_i, y_j, z_k) séparés par un pas constant Δx suivant x et Δy (éventuellement égal à Δx) suivant y (figure 8). Δx , Δy sont fixés à des valeurs inférieures ou égales à 5 cm, tandis que les dimensions de la grille doivent être fixées de sorte que, sur ses contours, les déformations créées par l'aéronef soient négligeables (< 5% de la déformation maximale). Par convention, la cote $z_k = 0$ est prise au niveau de la surface de la chaussée.



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

Ces calculs doivent respecter les hypothèses suivantes:

- une description de la structure sous forme d'un empilement de couches d'extension horizontale infinie, d'épaisseurs infinies pour le sol et finies pour les autres,
- des conditions d'interface entre couches collées, c'est-à-dire assurant la continuité des déplacements dans les trois directions (hypothèse retenue pour les chaussées souples neuves),
- > une loi de comportement élastique linéaire isotrope pour chacun des matériaux constitutifs,
- une description des charges par des surfaces circulaires, soumises à des pressions verticales uniformes.

Ces calculs, par application du modèle de Burmister, peuvent être effectués au moyen de codes de calcul semi-analytiques permettant de tenir compte explicitement des extensions infinies, horizontales et verticales, du modèle de calcul multicouche.

Ces calculs peuvent également être effectués au moyen de codes aux éléments finis (2D axisymétrique² ou 3D) sur la base de maillages d'extension finie, mais suffisamment grande pour assurer une précision suffisante par rapport à la solution théorique de Burmister. L'exactitude relative à atteindre est fixée à 5 millièmes de la valeur maximale des sollicitations (déformations), intervenant dans le dimensionnement. Cette exactitude devra être respectée en tout point d'un rectangle débordant la géométrie du train d'atterrissage d'une distance au moins égale à trois fois l'écart-type S_{bal} du balayage transversal (figure 9). Les exemples traités dans le chapitre 8, à l'aide du modèle de Burmister, pourront servir de référence pour vérifier l'exactitude relative du code utilisé.

La suite de la méthode s'appuie sur les calculs des endommagements créés par le trafic aéronef à partir des historiques de déformations subis en tout point de coordonnées (y_j, z_k) de la chaussée lors du passage d'un aéronef. En faisant abstraction du temps physique (qui n'intervient pas explicitement dans les lois d'endommagement considérées ci-après), ces historiques peuvent être reconstitués à partir des valeurs discrètes et successives de déformation aux points (x_i, y_j, z_k) , pour *i* croissant.



Figure 9: Exactitude relative par rapport au modèle de Burmister – Frontière du domaine de comparaison.

² La linéarité du problème permet de restreindre les calculs aux éléments finis au cas d'une charge isolée et de déduire la réponse de la chaussée sous charges multiples par le théorème de superposition. Les calculs peuvent être alors menés en axisymétrique avec grande précision et rapidité, grâce à l'emploi de maillages 2D (coupe verticale) de grande extension et d'un grand nombre d'éléments.

2.5. Lois et calculs des endommagements

Les calculs d'endommagement s'appuient sur l'évaluation au sein de la structure de chaussée des sollicitations dont le principe de calcul est présenté au paragraphe précédent, ainsi que sur des lois d'endommagement, ces lois étant ramenées pour tous les matériaux à un même formalisme de type Wöhler-Miner.

Deux types d'endommagement sont considérés (figure 10):

▶ par fatigue, pour les matériaux bitumineux, conduisant à la fissuration progressive du matériau. Le calcul s'appuie alors sur les valeurs de déformations horizontales calculées à la base de la couche inférieure de matériaux bitumineux,

▶ par déformations permanentes d'origine élasto-plastique, pour les matériaux granulaires non liés. Le calcul s'appuie sur les valeurs de déformations verticales calculées au sommet de la plate-forme. En pratique, aucun calcul n'est effectué au sommet de la couche de fondation.



Figure 10: Les deux modes d'endommagement considérés pour une structure de chaussée aéronautique souple.

Dans les cas de faible trafic pour lesquels l'utilisation d'une couche de base en matériaux granulaires est possible (voir chapitre 1.2), les retours d'expérience montrent que le mode de rupture alors en jeu est la déformation permanente du sol; ainsi, l'endommagement par fatigue des matériaux bitumineux n'est plus considéré.

Nota: Par convention, les déformations sont considérées par la suite positives en extension dans les enrobés bitumineux et positives en contraction dans les matériaux granulaires.

2.5.1. La loi d'endommagement de Wöhler

Initialement, la loi d'endommagement de Wöhler s'applique aux essais de fatigue pratiqués en laboratoire sur éprouvettes de matériau, sollicitées de façon cyclique à amplitude de force ou déplacement constante.

Elle s'exprime, suivant le cas, en fonction de l'amplitude maximale théorique de contrainte (essai à force imposée) ou déformation (essai à déplacement imposé), atteinte sur l'ensemble du corps d'épreuve supposé homogène et dans son état initial intègre.

Par extension et sous réserve de quelques ajustements (voir paragraphe 2.7), l'utilisation de la loi de Wöhler est, dans la méthode de dimensionnement, transposée au cas des structures de chaussées, à travers le calcul des champs mécaniques dans le modèle multi-couche (déformations réversibles, contraintes) induits par les chargements appliqués. Cette généralisation permet de rendre compte des mécanismes de fatigue des matériaux bitumineux et des déformations permanentes dans les matériaux granulaires non liés.

En notant de manière générale, s_{max} l'amplitude de sollicitation maximale³ (déformation ou contrainte), la loi de Wöhler relie le nombre de cycles de sollicitation $N(s_{max})$ conduisant dans ces conditions à la « rupture⁴ » sous la forme :

$$N(s_{\max}) = \left(\frac{K}{s_{\max}}\right)^{\beta}$$
 ou encore $s_{\max} = K N^{b}$ $(b = -1/\beta)$

avec:

K constante

 β exposant positif supérieur à 1

 $b = -1/\beta$ scalaire négatif supérieur à -1 (-1 < b < 0) égal à la pente de la droite de fatigue d'équation log (s_{max}) = $a + b \log (N)$.

Dans le cas des matériaux bitumineux:

N se rattache à une diminution de la rigidité du matériau sollicité à la température de 10°C et à la fréquence de 25 Hz. Il est défini comme la valeur moyenne du nombre de sollicitations conduisant à la rupture, obtenue par définition lorsque la perte de raideur du matériau atteint 50 % (norme NF EN 12-697-24 [19]). La variable s_{max} correspond dans ce cas à l'amplitude maximale $\mathcal{E}_{t max}$ de la déformation d'extension calculée à la base de la couche structurelle⁵.

$$N(\varepsilon_{t\max}) = \left(\frac{K}{\varepsilon_{t\max}}\right)^{\beta} \text{ et } K = k_{\theta f} k_r k_s k_c 10^{\frac{\beta}{\beta}} \overline{\varepsilon}_6$$

avec:

 $\overline{\mathcal{E}_6}$ valeur de la déformation (μdef) à 10° cycles, déterminée expérimentalement en laboratoire à 10°C et 25 Hz, $k_{\theta\theta}$, k_r , k_s , k_c coefficients d'ajustement dont la signification est détaillée dans la suite.

Remarque: des études conduites conjointement par l'IFSTTAR et le Laboratoire Régional de Bordeaux (LRPC) ont montré que la droite de fatigue obtenue pour un nombre de répétition de l'ordre de 10⁵ à 10⁶ cycles de chargement (nombre de cycles du domaine routier) est extrapolable au domaine aéronautique dont l'ordre de grandeur du nombre de cycles est de 10⁴ cycles. Dans ce cadre, les paramètres issus des essais de fatigue sont donc considérés valables.

Le chapitre 6 fournit pour chacune des familles de matériaux bitumineux la valeur des $\overline{\mathcal{E}}_{6}$, des exposants β et des paramètres nécessaires aux calculs des coefficients d'ajustement. Suivant le contexte d'application de la méthode, K sera issu des normes produit (ex: étude de solutions de base) ou pourra être issu de mesures de laboratoire (ex: étude de variantes).

Dans le cas des matériaux granulaires non liés:

La loi de Wöhler est utilisée pour décrire les endommagements liés au cumul de déformations permanentes sous l'effet de la répétition de sollicitations en contraction.

Contrairement au cas des matériaux bitumineux, la loi utilisée par la suite n'est pas initialement issue d'essais de laboratoire, mais est directement tirée de nombreuses observations et mesures effectuées sur chaussées routières ou dans une moindre mesure, sur des chaussées aéronautiques circulées. Le nombre de cycles à « rupture » revêt un caractère fortement empirique, lié aux répercussions en surface des déformations à grand rayon, mais sans qu'il soit véritablement possible d'y associer un critère chiffré.

 ³ Valeur maximale à considérer à la fois par rapport aux variables d'espace et par rapport à la variable temps.
 ⁴ Suivant un critère prédéfini portant en général sur la rigidité globale du corps d'épreuve.

⁵ Cette déformation est la plus grande des valeurs propres de la sous-matrice $2X2\begin{bmatrix} \mathcal{E}_{xx} & \mathcal{E}_{xy} \\ \mathcal{E}_{xy} & \mathcal{E}_{yy} \end{bmatrix}$ extraite de la matrice complète 3x3 de déformation.

La variable s_{max} est prise ici comme égale à l'amplitude maximale (spatiale et temporelle) $\mathcal{E}_{zz max}$ de la déformation verticale réversible au sommet de la plate-forme, et la loi de Wöhler devient dans ce cas :

$$N(\varepsilon_{zz\max}) = \left(\frac{K}{\varepsilon_{zz\max}}\right)^{\beta}$$

Les valeurs de K et β sont considérées indépendantes du type de matériau et de son état hydrique, de la température et de la vitesse de sollicitation.

Les valeurs des coefficients K et β pour la plate-forme figurent dans le chapitre 4, paragraphe 4.6.1.2.

2.5.2. Endommagement élémentaire et loi de Wöhler-Miner

La loi de Wöhler-Miner permet de généraliser la loi de Wöhler au cas de sollicitations en grand nombre, d'intensité variable et se succédant de manière aléatoire. Elle repose sur la notion d'endommagement élémentaire, le postulat d'additivité de ces endommagements et le critère de rupture pour un endommagement cumulé égal à 1.

La loi de Wöhler exposée précédemment permet de définir l'endommagement élémentaire ΔD créé par un cycle de sollicitation d'amplitude \mathcal{E}_{max} comme :

$$\Delta D = \frac{1}{N(\varepsilon_{\max})} = \left(\frac{\varepsilon_{\max}}{K}\right)^{\beta}$$

avec $\mathcal{E}_{max} = \mathcal{E}_{t max}$ pour les matériaux bitumineux ou $\mathcal{E}_{max} = \mathcal{E}_{zz max}$ pour les matériaux granulaires

Dans le cas de sollicitations d'amplitude variable se succédant de façon aléatoire, la loi de Wöhler-Miner stipule alors :

> i) l'additivité des endommagements élémentaires créés par chacune d'entre elles, soit:

$$D = \sum_{i} n_i \Delta D_i = \sum_{i} \frac{n_i}{N(\varepsilon_{\max i})} = \sum_{i} n_i \left(\frac{\varepsilon_{\max i}}{K}\right)^p$$

avec:

 n_i = nombre de chargements d'amplitude $\mathcal{E}_{max i}$

D = endommagement atteint à l'issue de l'application des $N = \sum n_i$ cycles de sollicitation

ii) l'atteinte de la « rupture » du matériau, au sens du critère afférent à la loi de Wöhler, lorsque D = 1.

On vérifie immédiatement que dans le cas particulier de cycles de chargements tous identiques, les lois de Wöhler et de Wöhler-Miner conduisent au même nombre de cycles à « rupture ».

Outre la prévision de la rupture, il est à noter que la valeur de l'endommagement *D* peut être utilisée dans certaines applications (ex: études d'expertise, calages de coefficients matériaux,...) comme un indicateur théorique, continu, de l'état de santé d'un matériau ou d'une structure en fonction de l'historique de chargement, pouvant être mis en comparaison d'observations *in situ*.

2.5.3. Intégration continue de la loi de Wöhler-Miner et calcul des endommagements liés au passage d'un aéronef

L'expression précédente de l'endommagement n'est toutefois pas totalement adaptée à la prise en compte de groupements de charges roulantes (boggies), générant dans la chaussée des historiques de déformations complexes (souvent multi-pics et sans retour à zéro entre pics) pour lesquels la notion de cycle de sollicitation ne peut pas être véritablement appliquée.

Dans le cadre de la méthode de dimensionnement, l'application de la loi continue de Wöhler-Miner (voir annexe A) sous forme de loi intégrale permet d'étendre le formalisme en conséquence, et de calculer l'accroissement d'endommagement lié au passage d'un aéronef donné. Pour la sollicitation \mathcal{E} , associée à travers la loi de Wöhler au mécanisme d'endommagement envisagé, l'expression s'écrit:

$$\Delta D(y, z_k) = \frac{\beta}{K^{\beta}} \int_{-\infty}^{+\infty} \langle \varepsilon(x, y, z_k) \rangle^{\beta-1} \langle \frac{d\varepsilon}{dx}(x, y, z_k) \rangle dx$$

où $\mathcal{E}(x, y, z_k)$ est le profil longitudinal de la variable \mathcal{E} , calculé le long de la droite d'équation (y, z_k) , et <X> est la partie positive de la variable X.

Comme déjà mentionné, ce profil représente en effet l'historique paramétré en x de la sollicitation \mathcal{E} , en tout point (x, y, z_k) de la chaussée, lorsque la charge roule dans le sens inverse de l'axe des x.

En pratique, l'intégrale précédente peut être calculée en chaque profil (y_j, z_k) , soit numériquement à partir des valeurs discrétisées $\mathcal{E}(x_i, y_j, z_k)$ de $\mathcal{E}(ex: méthode des trapèzes suivant x)$, soit analytiquement à partir de la détection des maxima $(\mathcal{E}_{pic}(y, z_k))$ et minima $(\mathcal{E}_{creux}(y, z_k))$ relatifs de la fonction \mathcal{E} . L'intégrale précédente est aussi égale à l'expression suivante:

$$\Delta D(y, z_k) = \frac{1}{K^{\beta}} \left[\sum_{pic=premier}^{pic=fin} \varepsilon_{pic}^{\beta}(y, z_k) - \sum_{creax=premier}^{creax=fin-1} \varepsilon_{creax}^{\beta}(y, z_k) \right]$$

À titre d'exemple, la figure 11 illustre la contribution au dommage d'un signal avec succession de pics et de creux, se produisant au passage d'une charge multi-essieux (boggie six roues).



Figure 11: Exemple de profil longitudinal de déformation pour un boggie six roues.

L'endommagement associé à la composante longitudinale des déformations au passage d'une telle charge est donné suivant la formule précédente par:

$$\Delta D_{tridem} = \frac{1}{K^{\beta}} \left(\varepsilon_{t1}^{\beta} - \varepsilon_{u12}^{\beta} + \varepsilon_{t2}^{\beta} - \varepsilon_{u123}^{\beta} + \varepsilon_{t3}^{\beta} \right)$$

Au final, le calcul permet d'établir pour chaque aéronef et pour chaque plan z_k examiné, un profil transversal de dommage élémentaire décrit par l'ensemble des valeurs $\Delta D(y_j, z_k)$ pour *j* variant de 1 au nombre de lignes longitudinales de la grille.

Un exemple de calcul détaillé de dommage est proposé au chapitre 8 (exemple 1) et permet d'illustrer ces propos de façon concrète.

2.5.4. Détermination de l'endommagement élémentaire avec prise en compte du balayage

2.5.4.1. Définition du balayage

Par rapport à la trajectoire théorique centrée sur l'axe longitudinal de la section circulée à dimensionner, les différents passages d'un aéronef donné présentent un excentrement variable. Ce phénomène est désigné par le vocable « balayage transversal » ou plus simplement « balayage ». Une illustration de ce phénomène est donnée figure 12.



Figure 12: Aéronef à l'atterrissage excentré par rapport à l'axe de piste.

La distribution de ces excentrements sur toute la durée de calcul de la chaussée est assimilée à une distribution gaussienne (ou normale) centrée, d'écart type S_{bal} qui est dépendant notamment du type d'aéronef considéré et de sa vitesse au sol (valeurs données au paragraphe 3.1.3.2).

La discrétisation de cette loi de probabilité suivant le pas transversal $\Delta y = 5$ cm de la grille de calcul (définie au paragraphe 2.4) conduit à répartir les trajectoires sur n_b lignes $(y_j)_b$ de la grille auxquelles sont associés des pourcentages de trafic $(P_j)_b$ (voir annexe B).

La prise en compte du balayage transversal d'un aéronef vient minorer l'endommagement qui résulterait d'un trafic canalisé sur une trace unique : $\Delta D_{bal} < \Delta D$.

2.5.4.2. Calcul de ΔD_{bal}

Ce calcul est de nouveau basé sur le principe d'additivité des endommagements. Il consiste à sommer les profils d'endommagements $\Delta D(y, z_k)$ calculés en 2.5.3, décalés de la valeur $(y_j)_b$ et pondérés par leur probabilité d'occurrence $(P_j)_b$ de la loi de balayage :

$$\Delta D_{bal}(y_j, z_k) = \sum_{b=1}^{n_b} (P_j)_b \times \Delta D(y_j - (y_j)_b, z_k)$$

2.5.5. Détermination de l'endommagement cumulé pour le trafic projet

Au final, l'endommagement cumulé pour l'ensemble des avions est donné par la relation suivante, par application du postulat d'additivité des dommages de la loi de Miner:

$$D_{bal,cumulé}\left(y_{j}, z_{k}\right) = \sum_{a \notin ronef} N_{a \notin ronef} \Delta D_{bal,a \notin ronef}\left(y_{j}, z_{k}\right)$$

avec:

aéronef = indice relatif aux types d'aéronefs constituant le trafic considéré pour le dimensionnement,

 $N_{a\acute{e}ronef}$ = nombre de passages cumulés de l'aéronef considéré sur la période de calcul,

 $\Delta D_{bal, a \acute{e}ronef}(y_j, z_k)$ = profil d'endommagement correspondant à l'a \acute{e}ronef considéré, calculé suivant les principes décrits ci-avant.

Le résultat de ce calcul est une courbe de variation de l'endommagement cumulé en fonction de la position transversale par rapport à l'axe de la section considérée. Un exemple de ce type de courbes est présenté ci-dessous (figure 13).



Figure 13: Exemple de profils de dommage (deux critères considérés) pour un A340-200.

Les différentes étapes d'obtention de tels profils sont illustrées en détail sur l'exemple 1 du chapitre 8.

2.6. Quantification de l'agressivité d'un trafic: RseR

Le GAN [3] propose une classification des aéronefs en fonction de deux paramètres : pression des pneumatiques et nombre de roues d'un atterrisseur principal. Le produit de ces deux paramètres permet de définir des « Groupes » d'aéronefs (Groupe 1 à 5). Par ailleurs, le GAN [3] définit des « classes de trafic » résultant du croisement entre le groupe et le nombre de mouvements d'un aéronef.

L'utilisation de ces classes de trafic ne quantifie cependant pas de façon assez précise l'agressivité d'un trafic.

Le concept d'endommagement dont le principe de calcul a été exposé précédemment permet de définir une approche plus rationnelle pour caractériser l'agressivité d'un trafic. Cette approche repose sur la notion de « Roue Simple Équivalente Rationnelle » (RseR) dont un schéma explicatif est présenté figure 14, et dont la définition est la suivante:

La RseR associée à un trafic d'aéronefs et à une structure de chaussée est la charge simple non balayante⁶ (en tonnes) appliquée 10000 fois sur la structure avec une empreinte au sol de rayon égal à 0,20 m, qui donne la même valeur d'endommagement par fatigue des enrobés que l'ensemble du trafic.



Figure 14: Représentation schématique de la RseR.

La RseR ainsi définie est utilisée comme une donnée permettant de :

✓ Statuer sur l'éventuelle mise en œuvre d'une couche de base en matériaux granulaires (paragraphe 1.2)

✓ Vérifier que l'épaisseur de la couche de base n'est pas sous-dimensionnée au regard des pratiques actuelles (paragraphe 3.2.3)

✓ Définir le coefficient de calage pour les matériaux bitumineux (paragraphe 2.7.1.2)

Ces trois points étant directement liés aux matériaux bitumineux, il est choisi de définir la RseR vis-à-vis de l'endommagement par fatigue des enrobés plutôt que l'endommagement créé par déformations permanentes des matériaux granulaires. Ainsi, l'égalité des endommagements créés d'une part par le trafic réel, et d'autre part par la RseR est effectuée pour la fatigue des enrobés.

⁶ Le phénomène de balayage des aéronefs est défini au paragraphe 3.1.3.2

À titre d'illustration, le tableau 2 présente des valeurs de RseR pour différents trafics simples pour des structures dimensionnées à une température de 15°C et pour une section circulée à vitesse modérée (par exemple une voie de circulation) et pour un risque fixé à 5 %. Les matériaux utilisés pour ces exemples sont des enrobés EB-BBA 2 en couche de surface et EB-GB 3 en couche de base.

	Mrw (t)	Type atterrisseur principal	Mvts/j		Structure	associée		$\mathbf{D}_{\mathbf{r}} = \mathbf{D} \left(4 \right)$
			(pendant 10 ans)	BBA2	GB3	GNT	PF	KseK (t)
ATR 72-101	20,0	jumelage	1	6 cm	8 cm	25 cm	PF1	6,0
	20,0	jumelage	25	6 cm	12 cm	45 cm	PF1	11,5
	20,0	jumelage	50	6 cm	10 cm	30 cm	PF2	13,0
A320- 200	77,4	jumelage	1	6 cm	10 cm	33 cm	PF2	14,0
	77,4	jumelage	25	8 cm	14 cm	42 cm	PF2	28,4
	77,4	jumelage	50	8 cm	16 cm	50 cm	PF2	32,9
A300- 600R	171,4	boggie	1	6 cm	10 cm	34 cm	PF2	14,8
	171,4	boggie	25	8 cm	18 cm	53 cm	PF2	32,0
	171,4	boggie	50	8 cm	20 cm	62 cm	PF2	37,3
A340- 500	381,2	boggie	1	6 cm	12 cm	27 cm	PF2 ^{qs}	18,9
	381,2	boggie	25	6 cm	15 cm	53 cm	PF2 ^{qs}	34,9
	381,2	boggie	50	8 cm	18 cm	52 cm	PF2 ^{qs}	42,8

Tableau 2: Exemples de valeurs de RseR pour différents trafics simples.

Nota: Il est important de noter que la valeur de RseR est dépendante de la structure de chaussée considérée, et donc de l'épaisseur d'enrobés retenue, travaillant en fatigue. Ainsi, des valeurs différentes de RseR peuvent être trouvées pour un même trafic.

2.7. Coefficient *K* de la loi de fatigue pour les matériaux bitumineux

La méthode de dimensionnement prévoit deux types d'ajustements du coefficient K de la loi de Wöhler-Miner obtenu en laboratoire. L'un est attaché aux conditions de réalisation de l'essai de fatigue, l'autre est lié au calcul structurel.

Les corrections apportées à l'essai de fatigue tiennent compte :

de la transposition de la température de l'essai de fatigue, égale à 10°C, à la température équivalente considérée dans le dimensionnement,

de la dispersion des résultats d'essais de fatigue,

▶ d'un coefficient de calage, établi empiriquement, rendant compte du passage de l'échelle laboratoire au comportement *in situ* des chaussées.

Les valeurs de déformation, issues du modèle de chaussée élastique linéaire multicouche, sont considérées, quant à elles, affectées par deux effets :

- > la dispersion de l'épaisseur des couches bitumineuses inhérente à la réalisation des chantiers aéronautiques,
- I'hétérogénéité de capacité portante inhérente à la couche granulaire non liée située au-dessous de la couche bitumineuse faisant l'objet du calcul.

Globalement, ces différents ajustements se traduisent par l'expression suivante retenue pour le coefficient

$$K = 10^{\frac{6}{\beta}} k_{\theta f} k_s k_r k_c \overline{\varepsilon}_6$$

K de la loi d'endommagement:

▶ $\overline{\mathcal{E}}_6$ est la valeur de la déformation à 1 million de cycles (\mathcal{E}_6) (*en* µ*def*) déterminée expérimentalement en laboratoire à 10°C et 25 Hz,

• β est l'exposant déterminé à partir de l'essai de fatigue ($\beta = -1/b$), avec b la pente de l'essai de fatigue pour le matériau considéré,

• Le coefficient $k_{\theta f}$ permet de transposer les résultats d'essais de fatigue sur enrobés bitumineux réalisés à 10°C et 25 Hz, vers le comportement à la température équivalente du site géographique considéré (en France métropolitaine, 15°C) et à la fréquence *f*,

• Le coefficient k_s est un coefficient égal à 1 ou minorateur de la déformation admissible dans les enrobés bitumineux, fonction de la rigidité de la couche sous-jacente non liée,

• Le coefficient k_r tient compte à la fois de la dispersion des essais de fatigue et de la variation de l'épaisseur de la couche de base en matériaux bitumineux.

• Le coefficient de calage kc est fonction de la nature des matériaux bitumineux. Il permet de rendre compte des écarts observés entre les calculs et l'endommagement de chaussées réelles,

La suite de ce chapitre précise l'expression de ces coefficients.

2.7.1. Coefficients relatifs à la loi de fatigue du matériau

2.7.1.1. Correction en température et fréquence: $k_{\theta f}$

Le dimensionnement de la chaussée se faisant en général à une température θ_{eq} différente de 10°C (cf. paragraphe 3.1.4) et à une fréquence de sollicitation variable, une première correction porte sur la déformation \mathcal{E}_6 (10°C, 25 Hz) = $\overline{\mathcal{E}}_{6r}$ à partir de la relation ci-dessous :

avec:

$$\varepsilon_6(\theta_{eq}, f) = k_{\theta f} \ \overline{\varepsilon}_6$$

$$k_{\theta f} = \sqrt{\frac{E(10^{\circ}C, 10Hz)}{E(\theta_{eq}, f)}}$$

0Ù:

• $\mathcal{E}_6(\theta, f)$ est la valeur de la déformation admissible à 1 million de cycles *(en µdef)*, à la température θ (en °C) et à la fréquence f (en Hz),

▶ $E(\theta, f)$ est la valeur de la norme du module complexe ($E = |E^{\ddagger}|$) (en MPa) à la température θ (en °C) et à la fréquence f (en Hz). La carte de module $E^{\ast}(\theta, f)$ en fonction de θ et f peut être déterminée à partir des campagnes d'essais classiques (norme NF EN 12-697-26 [20]). À défaut, il est proposé d'utiliser les valeurs représentatives des tableaux 17, 19 et 22 du chapitre 6, issues des courbes de susceptibilité en température et fréquence présentées en annexe E.

Nota : le coefficient $k_{\theta f}$ devrait théoriquement faire intervenir le module E (10°C, 25 Hz) correspondant aux conditions expérimentales d'un essai de fatigue. Cependant, l'influence de la fréquence (10 Hz retenus au lieu de 25 Hz) est négligée ici, et ce de manière à assurer une continuité de la méthode de calcul avec le domaine routier dans le cadre duquel ce coefficient a été défini.

2.7.1.2. Coefficient de calage prédiction/observation k_c

Le coefficient de calage, noté k_{cr} corrige l'écart entre les prédictions de la démarche de calcul et l'observation du comportement de chaussées expérimentales. Ce coefficient intègre implicitement entre autres l'effet des écarts entre les sollicitations mécaniques subies par le matériau *in situ* et les sollicitations reproduites dans les essais de laboratoire (ex: état de contrainte biaxial avec rotation de contraintes créé par le passage d'une charge roulante au lieu de l'état uniaxial à direction de déformation constante des essais sur éprouvettes trapézoïdales, cinématique de chargement distincte de la courbe sinusoïdale imposée en laboratoire, existence de temps de repos entre charges de trafic, etc.).

Il est à noter que l'emploi des valeurs de k_c ne peut être dissocié du modèle de calcul proposé dans la présente méthode et du protocole d'essai de fatigue en flexion sur éprouvettes trapézoïdales de la norme NF EN 12-697-24 [19].

La forte variabilité des trafics aéronautiques en termes de charges conduit, contrairement au domaine routier, à adopter un paramètre k_c fonction de l'agressivité du trafic (via le paramètre RseR). La loi d'évolution considère les points suivants:

✓ pour des faibles trafics, les chargements à la roue des aéronefs sont du même ordre de grandeur que les charges routières (6,5 t pour un jumelage standard); ainsi, afin d'assurer la continuité de la méthode rationnelle entre ces deux domaines d'application, un coefficient de calage identique au domaine routier est préconisé (k_c = 1,3 pour la grave-bitume, k_c = 1 pour les enrobés à module élevé EB-EME 2),

✓ pour les forts trafics, les valeurs des coefficients de calage sont issues d'observations faites sur des études expérimentales menées par Airbus (A380 - *Pavement Experimental Programme* (PEP souple) [21] et *High Tire Pressure Test* (HTPT) [22]).

Les notions de « faible trafic » et « fort trafic » sont traduites en termes de *RseR*, utilisée pour définir les lois d'évolution $k_c = f(RseR)$. Celles-ci sont exprimées analytiquement ci-dessous, et de façon graphique sur la figure 15.

Pour les matériaux EB-GB 2, EB-GB 3 et EB-GB 4:

$$\begin{cases} k_c = 1,3 & \text{si } RseR < 10t; \\ k_c = \frac{7}{150}.RseR + \frac{5}{6} & \text{si } 10t \le RseR \le 25t; \\ k_c = 2 & \text{si } RseR > 25t; \end{cases}$$

Pour le matériau EB-EME 2 :

$$\begin{cases} k_c = 1 & \text{si } RseR < 10t; \\ k_c = \frac{1}{30}.RseR + \frac{2}{3} & \text{si } 10t \le RseR \le 25t; \\ k_c = 1, 5 & \text{si } RseR > 25t; \end{cases}$$



*Figure 15 : Lois d'évolution du coefficient de calage k*_c.
2.7.2. Coefficient relatif au calcul structurel : le coefficient de plate-forme k_s

Le coefficient k_s est un coefficient minorateur de K tenant compte de l'effet d'hétérogénéités locales de portance d'une couche granulaire de faible rigidité supportant les couches liées. Ce coefficient est fonction du module de la couche granulaire directement située en dessous de la couche de base bitumineuse. Le tableau 3 suivant rassemble les différents cas.

Module de la couche directement située sous la couche bitumineuse considérée	E < 50 MPa	50 MPa ≤ E < 80 MPa	80 MPa ≤ E < 120 MPa	<i>E</i> ≥ <i>120 MPa</i>
k _s	1/1,2	1/1,1	1/1,065	1

Tableau 3 : Valeurs du coefficient k_s .

2.7.3. Le coefficient de risque k_r

La démarche rationnelle de dimensionnement des chaussées revêt un caractère probabiliste, en raison de la dispersion sur la résistance en fatigue des matériaux bitumineux et de la dispersion à la mise en œuvre des épaisseurs de couches de chaussées, qui ont toutes deux un effet significatif sur la tenue dans le temps de la chaussée. Ceci conduit donc à introduire le coefficient de risque kr défini en fonction d'un risque de calcul r et des écarts types S_N et S_h des lois de probabilité normale S considérées pour rendre compte respectivement de la dispersion des essais de fatigue et de l'épaisseur des couches bitumineuses à la construction.

Le risque de calcul, qui fait partie des données du projet (cf. paragraphe 3.1.1), représente l'espérance au sens des probabilités, du linéaire de chaussée à reconstruire en l'absence de travaux de renforcement à l'issue de la période de calcul.

Son choix relève en pratique de la stratégie de la maîtrise d'ouvrage ou de son gestionnaire, sur la base notamment de critères socio-économiques et des exigences de maintien de niveau de service assignées à l'ouvrage.

La définition précise des paramètres S_N , S_h et r ainsi que le calcul de la fonction $k_r(r, S_N, S_h)$ sont décrits en annexe C.

Notons que cette approche probabiliste explicite ne s'applique qu'aux matériaux bitumineux et non aux matériaux non traités et au massif support. Pour ces derniers, la prise en compte du risque de dégradation intervient de manière implicite à travers le calcul de leurs sollicitations admissibles.

3. Mise en œuvre de la démarche de dimensionnement des chaussées souples neuves

3.1. Données requises pour le dimensionnement des structures de chaussées neuves

Les données nécessaires à l'application de la méthode de dimensionnement peuvent être classées en quatre catégories :

les données de nature stratégique (il s'agit des paramètres de calcul comme la période et le risque de calcul retenu),

les données de trafic,

les données climatiques et environnementales: il s'agit des données descriptives des conditions climatiques du site du projet ayant une influence directe sur le comportement mécanique de la chaussée et sur la vérification au gel-dégel,

les paramètres descriptifs des matériaux: cet ensemble correspond aux propriétés des matériaux de chaussée et de la plate-forme support qui sont nécessaires au calcul des champs de déformations au sein la structure de chaussée et au calcul des endommagements.

3.1.1. Période de calcul et risque

Ces paramètres sont à fixer par le maître d'ouvrage.

La période de calcul d'une chaussée aéronautique souple est généralement de 10 ans.

Le risque est à choisir en fonction de l'importance de l'aéroport. Il est proposé de le fixer en fonction de la classe de trafic (cf. glossaire, VI), au sens du GAN [3], prévue sur l'aéroport. Le risque pour un aéroport dont la **classe de trafic annuel est supérieure ou égal à CT3** (voir paragraphe 2.4.1 du GAN [3]) **peut être fixé à 2,5** %. Pour un aéroport dont la **classe de trafic annuel est inférieure à CT3**, ou supérieure à CT3 mais avec la possibilité de reporter le trafic sur une autre piste ou voie de circulation durant les travaux de maintenance ou de réparation, le **risque peut être choisi entre 5 et 10** %.

3.1.2. Le trafic

Les chaussées à dimensionner doivent être définies suivant la typologie indiquée dans le tableau 1 (paragraphe 2.2). Les données de trafic doivent alors être établies pour chacune des sections.

Deux sections sont distinctes lorsque:

- soit les charges qu'elles reçoivent sont différentes,
- soit, tout en étant soumises aux mêmes charges, leur fonction est différente,
- > soit le nombre de mouvements des différentes charges qu'elles reçoivent est différent.

3.1.2.1. Mode de description général du trafic

Le trafic prévu sur la section considérée est défini par la liste des aéronefs susceptibles de circuler sur la section, croisée avec leur nombre de passages prévu, sur la période de calcul envisagée.

Chaque aéronef est caractérisé par :

son type,

▶ le nombre de passages cumulés sur la période de calcul. Celui-ci peut être déterminé sur la base du trafic journalier ou hebdomadaire et du taux d'accroissement (géométrique ou arithmétique) prévisible sur toute la période de calcul,

▶ la géométrie de son train d'atterrissage et ses conditions de chargement: coordonnées dans le plan horizontal des centres des différentes roues qui le composent, masse supportée par chacune des roues et pression de contact pneu-chaussée (cf. paragraphe 3.1.2.2), assimilée en général à la pression de gonflage du pneumatique.

Ces derniers paramètres sont définis dans la base de données « Ficav » du STAC comportant les caractéristiques de 250 aéronefs les plus courants.

L'ensemble doit être complété par les données suivantes, différentes selon l'aéronef considéré et le type d'aire étudié :

- ▶ la vitesse de déplacement de l'aéronef (cf. paragraphe 3.1.3.1),
- ▶ le balayage transversal de l'aéronef, caractérisé par l'écart type de la distribution de ses trajectoires longitudinales, assimilée à une distribution normale centrée (cf. paragraphe 3.1.3.2).

Si ces informations (vitesse et balayage) ne sont pas connues avec précision par le projeteur, on pourra prendre à défaut, les valeurs indicatives fournies dans ce guide au paragraphe 3.1.3.

3.1.2.2. Masses des aéronefs

Parmi les masses fournies par les constructeurs d'aéronefs et dont la connaissance est utile pour le dimensionnement, figurent:

▶ la masse maximale pour les évolutions au sol portée au certificat de navigabilité (ou masse maximale au roulage Mrw) correspondant à la masse maximale de l'aéronef acceptable pendant les manœuvres au sol sur les aires de trafic.

▶ la masse maximale au décollage, Mtow, portée au certificat de navigabilité correspondant à la masse maximale de l'aéronef acceptable au décollage.

▶ la masse maximale à l'atterrissage, Mlw, portée au certificat de navigabilité correspondant à la masse maximale de l'aéronef acceptable à l'atterrissage.

▶ la masse à vide en ordre d'exploitation (ou masse à vide équipé, Mzfw) correspondant à la masse de l'aéronef vide avec ses équipements permanents, un aménagement de cabine et un équipage de référence.

La masse effective d'un aéronef est toujours comprise entre Mzfw et Mrw : elle est égale à la masse à vide en ordre d'exploitation augmentée de la masse du carburant et de la charge marchande.

La masse maximale au décollage peut être pratiquement confondue avec la masse maximale pour les évolutions au sol dont elle ne diffère que par la quantité de carburant consommée entre l'aire de stationnement et l'extrémité de piste.

Par contre, la masse à l'atterrissage diffère de la masse au décollage de la quantité de carburant consommée pendant le vol qui représente pour des étapes longues une fraction importante de la masse totale (pouvant atteindre 30 % de Mrw).

Pour le dimensionnement des chaussées, il est nécessaire de fixer les masses réelles au décollage et à l'atterrissage à considérer, pour l'ensemble des aéronefs constituant le trafic. La fourniture de ces informations au projeteur est du ressort du maître d'ouvrage.

L'épaisseur de chaussée souple calculée étant plus sensible aux variations de charges qu'aux variations du nombre de mouvements, il est important de recenser avec précision ces charges apportées par le trafic des aéronefs. Toutefois, la collecte de ces renseignements peut s'avérer délicate du fait de l'incertitude des prévisions de trafic, de l'évolution du matériel volant et de la variation de la charge marchande.

À défaut d'informations plus précises, on utilisera les masses fournies par les constructeurs d'aéronefs et portées au certificat de navigabilité :

- ▶ la masse maximale au roulage Mrw pour les décollages.
- la masse maximale à l'atterrissage Mlw pour les atterrissages.

Le cas échéant, ces valeurs peuvent être minorées en raison de contraintes d'exploitation, citons par exemple une longueur de piste insuffisante pour permettre le décollage à pleine charge de certains aéronefs.

3.1.2.3. Réduction éventuelle de la liste des aéronefs pris en compte

On peut faire le choix dans les calculs de dimensionnement de négliger les aéronefs les moins agressifs afin de simplifier et d'alléger l'opération de recueil des données. Seuls les avions dits « dimensionnants », c'est-à-dire influençant véritablement le dimensionnement de la structure en raison de leur masse et/ou de leur nombre de passages cumulés sur la période de calcul de la chaussée, sont alors pris en compte dans le calcul.

Cette sélection peut s'effectuer à partir du critère défini ci-dessous qui permet de juger rapidement de l'impact relatif de chaque avion et de sa fréquence sur le comportement des couches bitumineuses et du sol.

Pour chaque aéronef *j* du trafic considéré initialement, on considère la charge à la roue la plus élevée, *Prj*. On calcule le ratio :

$$r_j = \left(\frac{Pr_j}{Pr_{max}}\right)^5 \cdot p_j$$

avec:

- > Pr_i charge à la roue la plus importante pour l'aéronef j_i
- $Pr_{max} = max (Pr_i)$ charge à la roue la plus importante de tout le trafic,
- ▶ $p_j = \frac{n_j}{n_{tot}}$ pourcentage de trafic cumulé de l'aéronef *j* rapporté au trafic cumulé total, où:

 \checkmark n_i = nombre de passages de l'aéronef j_i ,

 \checkmark *n*_{tot} = nombre de passages total de tous les aéronefs.

Un aéronef est considéré comme **dimensionnant si** $r_i \ge 1\%$.

3.1.3. Vitesse et balayage

3.1.3.1. Vitesse de déplacement des aéronefs

Les vitesses de déplacement des aéronefs ont un impact sur le module effectif des enrobés bitumineux de par leur caractère viscoélastique et donc sur les champs de déformation induits dans les chaussées. Leurs vitesses, fonction de la section empruntée, nécessitent donc d'être précisées.

Sur les voies de circulation, la vitesse est généralement de l'ordre de 30 km/h pour tout type d'aéronefs.

Les vitesses pratiquées sur les pistes sont fonction du type d'aéronefs et de la position sur la piste. Pour leur dimensionnement, la vitesse retenue est de 100 km/h, bien que celle-ci puisse atteindre des valeurs largement supérieures, sauf pour les 300 premiers mètres pour lesquels une vitesse de 30km/h est considérée.

Sauf raison particulière, il est ainsi proposé de considérer les valeurs de vitesse suivantes (tableau 4), en fonction du type de section circulée défini dans le tableau 1 (paragraphe 2.2).

À ces vitesses sont associées des fréquences de sollicitation des couches bitumineuses, permettant de calculer le module de rigidité des enrobés selon l'équation ci-dessous. Cette équation repose sur une relation de proportionnalité entre vitesse et fréquence et sur le postulat suivant: à une vitesse de 100 km/h correspond une fréquence de 10 Hz⁷, autrement dit:

$$f(Hz) = \frac{V(km/h)}{10}$$

Ouvrage/section d'ouvrage	Vitesse de déplacement forfaitaire en km/h à considérer dans les calculs de dimensionnement
Sections circulées à vitesse élevée	100
Sections circulées à vitesse modérée	30
Aires de stationnement et sections circulées à faible vitesse	10*

*valeur fictive retenue pour le calcul. Voir ci-après « le cas particulier des sections à faible vitesse, des aires de stationnement ».

Cas particulier des sections à faible vitesse, des aires de stationnement :

Pour les aires de stationnement, l'emploi d'une structure bitumineuse est fortement déconseillé compte tenu des risques importants de poinçonnement. Cette situation correspond aux aires associées à un niveau de sollicitation NS3 ou NS4 (cf. glossaire, VI) au sens du GAN [3]. Dans ce cas la structure recommandée est de type rigide, dont le mode de dimensionnement n'est pas traité dans le présent guide.

Lorsque le recours à une chaussée souple est jugé pertinent, cette dernière est dimensionnée en considérant une vitesse de calcul de 10 km/h.

3.1.3.2. Balayage

Par rapport à la trajectoire théorique centrée sur l'axe longitudinal de la chaussée à dimensionner (pour les sections circulées à vitesses élevées et modérées), les différents passages d'un aéronef donné présentent un excentrement variable, dont il est important de tenir compte dans le cumul des endommagements. Celui-ci a en effet pour conséquence de minorer les endommagements d'un trafic non balayant.

La distribution de ces excentrements sur toute la période de calcul de la chaussée est assimilée à une distribution normale centrée définie par la donnée de son écart type S_{bal} . On appelle **amplitude du balayage transversal** la valeur correspondant à **deux fois l'écart-type de la variable excentrement**.

⁷ Cette formule diffère du cas routier (qui associe une fréquence de 10 Hz à des charges roulant à 70 km/h) en raison des épaisseurs de matériaux liés généralement plus élevées et des empreintes de contact plus grandes.

Tableau 4: Vitesse de déplacement des aéronefs en fonction du type de section.

Cette amplitude dépend du type d'aéronefs et de la section circulée. Elle est importante sur les sections à vitesse élevée, moyenne sur les sections à vitesse modérée et concentrée sur les sections à vitesse faible (dont les aires de stationnement). Sauf raison particulière, il est proposé d'utiliser les valeurs suivantes, indépendamment du type d'aéronefs:

Ouvrage/section d'ouvrage	Écart-type S _{bal} (en m)
Sections circulées à vitesse élevée	0,75
Sections circulées à vitesse modérée	0,5
<i>Aires de stationnement et sections circulées à faible vitesse</i>	0

Tableau 5: Valeur des écarts-types en fonction du type de section.

Récapitulatif des données concernant le trafic, nécessaires au dimensionnement.

Pour chaque aéronef, il est nécessaire de connaître :

✓ son type,

✓ le nombre de passages cumulés sur toute la période de calcul en distinguant les décollages et les atterrissages,

 \checkmark la géométrie de ses atterrisseurs et les conditions de chargement de son train d'atterrissage complet: coordonnées dans le plan horizontal des centres des différentes roues qui le composent, masse supportée par chaque roue et pression de contact pneu-chaussée, assimilée en général à la pression de gonflage du pneumatique,

✓ la masse maximale au roulage Mrw (portée au certificat de navigabilité) pour les décollages, sauf information plus précise,

✓ la masse maximale Mlw de l'aéronef acceptable à l'atterrissage, portée au certificat de navigabilité, sauf information plus précise,

🗸 sa vitesse,

✓ l'amplitude de balayage.

3.1.4. Les données de températures pour la détermination du module des enrobés bitumineux

Les données climatiques et d'environnement permettent de tenir compte des variations des performances mécaniques des enrobés en fonction de la température (module, résistance en fatigue) et d'établir la vérification au gel-dégel de la structure.

Les données relatives à la vérification au gel-dégel des chaussées seront détaillées dans le chapitre 7.

Les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux (module, résistance en fatigue) étant notamment fonction de la température, cette dernière doit être prise en compte au mieux dans le dimensionnement des structures de chaussées souples aéronautiques.

Sa définition est la suivante: pour un aéronef donné, la température équivalente est définie comme la température constante conduisant au même endommagement que les endommagements cumulés calculés aux températures réelles.

La démarche utilisée pour le calcul de la température équivalente est présentée en annexe D.

Si l'on dispose de données détaillées (sur une période suffisamment longue pour être représentative) relatives aux variations de températures du site du projet et au trafic, il est possible de les utiliser pour le calcul de **la température équivalente**. Celle-ci est fonction de la structure de chaussée, du critère d'endommagement considéré et du type d'aéronefs.

En l'absence de données, il est défini une température constante pour les calculs de dimensionnement à partir des types de climats définis au chapitre 2.4.2 du GAN [3].

Pour un certain nombre de villes situées en France métropolitaine ou dans les DOM-TOM, l'annexe B du GAN [3] indique le type de climat à prendre en compte. Pour des régions d'implantation non référencées dans cette annexe, le projeteur pourra soit définir le type de climat auquel se rattache le projet, en fonction des critères du chapitre 2.4.2 du GAN [3], ou procéder à une étude spécifique de température équivalente.

Pour les climats de type océanique, méditerranéen ou continental (France métropolitaine et Saint Pierre et Miquelon), la température équivalente est prise égale à **15°C**. Pour les climats de type tropicaux (territoires d'outre-mer), la température équivalente est prise égale à **25°C**, excepté pour la Guyane pour laquelle une température de **28°C** peut être retenue.

3.1.5. Caractéristiques mécaniques des matériaux

Pour la détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux, on se reportera au chapitre 4 pour les matériaux de la plate-forme et au chapitre 6 pour les matériaux constitutifs de la chaussée proprement dite.

3.2. Mise en œuvre des différentes étapes du dimensionnement

La partie suivante décrit les différentes étapes à suivre pour effectuer un calcul de dimensionnement.

Dans le cadre de l'élaboration du présent guide, un logiciel spécifique, développé conjointement par l'IFSTTAR et le STAC, a été programmé pour mettre en œuvre toutes ces étapes de façon automatique.

3.2.1. Première étape: Pré-dimensionnement

Une fois les données nécessaires au calcul réunies, on procède :

- > à un premier choix de la couche de roulement, selon les principes exposés dans le chapitre 5,
- ▶ au pré-dimensionnement de la structure par référence à des situations comparables.

3.2.2. Deuxième étape: Calculs d'endommagement de la structure et itérations sur l'épaisseur des couches

3.2.2.1. Calculs d'endommagement de la structure à épaisseurs de couche données

Cette étape est basée pour l'essentiel sur les éléments vus au chapitre 2.

Pour un jeu d'épaisseurs donné, on effectue les calculs dans un repère (x, y, z), où x est l'axe longitudinal de la chaussée (sens de déplacement de l'aéronef), y est l'axe transversal et z l'axe vertical.

Les calculs sont discrétisés suivant une grille (x_i , y_j) pour chaque plan de cote z_k , faisant l'objet d'un critère d'endommagement, à savoir à la base de la couche inférieure de matériaux liés et au sommet de la plate-forme.

1) Pour chaque plan z_k , on enchaîne les sous-étapes suivantes.

Pour chaque aéronef constitutif du trafic, le calcul de l'endommagement s'effectue en trois sous étapes :

▶ calcul en tout point (x_i, y_j) de la déformation principale majeure \mathcal{E}_l^8 (extension horizontale si bas de couche liée) et de la déformation \mathcal{E}_{zz} (contraction verticale si sommet de couche non liée). Le calcul est effectué pour un aéronef donné, les valeurs de module de rigidité des couches de la structure de chaussée étant ajustées au préalable en fonction de sa fréquence de sollicitation et de sa température.

▶ calcul du profil transversal ΔD (y_j , z_k) de l'incrément d'endommagement créé par l'aéronef en l'absence de balayage, pour chacun des critères de dimensionnement considérés. Le calcul repose sur l'intégrale continue de l'endommagement selon le principe de Miner, introduite au chapitre 2. Il s'appuie également sur les coefficients d'ajustement détaillés dans ce même chapitre.

• calcul du profil $\Delta D_{bal}(y_p, z_k)$ pour chaque aéronef tenant compte de son balayage

⁸ Cette déformation est la plus grande des valeurs propres de la matrice 2x2 : $\begin{cases} \mathcal{E}_{xx} & \mathcal{E}_{xy} \\ \mathcal{E}_{yy} & \mathcal{E}_{yy} \end{cases}$

2) Pour la période de calcul, calcul de l'endommagement cumulé:

$$D_{bal,cumulé}\left(y_{j}, z_{k}\right) = \sum_{a \notin onef} N_{a \notin onef} \Delta D_{bal,a \notin onef}\left(y_{j}, z_{k}\right)$$

et détermination de l'endommagement maximal par plan z_k :

$$D_{\max,cumulé}(z_k) = \underset{y_j}{Max} \{ D_{cumulé}(y_j) \}$$

Un dimensionnement est alors dit « admissible » si chacune des valeurs $D_{max, cumulé}(z_k)$ est inférieure à 1.

3.2.2.2. Itérations sur les épaisseurs de couche

En général, l'étape précédente est répétée en ajustant les épaisseurs des couches, de manière à obtenir une solution admissible quasi-optimale, en fonction des données et contraintes du projet (coûts directs et indirects, contraintes d'exploitation,...).

Une telle solution pourra conduire à « saturer au mieux » l'un ou plusieurs des critères, en recherchant à satisfaire une ou plusieurs égalités de type $D_{max, cumulé}(z_k) = 1$.

3.2.3. Troisième étape – Ajustement des épaisseurs calculées

Les épaisseurs des couches déterminées à l'issue de l'étape 2 sont ensuite ajustées afin de :

- ▶ tenir compte des contraintes technologiques d'épaisseurs minimale et maximale (fonction du type de matériau) pour atteindre les objectifs de compacité et d'uni (définies dans le chapitre 6),
- réduire les risques de défauts de liaison aux interfaces en réduisant le nombre d'interfaces.

De plus, afin d'éviter de retenir une structure de chaussée ayant une épaisseur de matériaux hydrocarbonés trop faible, le graphique ci-dessous (figure 16) donne, **à titre indicatif**, des valeurs d'épaisseurs minimales de matériaux bitumineux à mettre en œuvre en couche de base, reflétant les pratiques actuelles. Ces épaisseurs dépendent du paramètre RseR.

Il est important de préciser que ces valeurs d'épaisseurs minimales peuvent être adaptées en fonction des critères de mise en œuvre, de l'épaisseur de la couche de surface retenue, ainsi que de la formulation des matériaux hydrocarbonés de couche de base (granulométrie).

Les relations ci-dessous traduisent les équations des courbes utilisées pour réaliser cette vérification. Les valeurs de e_{mini} sont données en centimètres, et dépendent du type de matériau (GB ou EME).

Pour les matériaux EB-GB :

$$\begin{cases} e_{mini} = 8 & \text{si } RseR < 10t; \\ e_{mini} = \frac{2}{5}.RseR + 4 & \text{si } 10t \le RseR \le 30t; \\ e_{mini} = 16 & \text{si } RseR > 30t; \end{cases}$$

Pour le matériau EB-EME 2 :

$$\begin{cases} e_{mini} = 6 & \text{si } RseR < 10t; \\ e_{mini} = \frac{3}{10}.RseR + 3 & \text{si } 10t \le RseR \le 30t; \\ e_{mini} = 12 & \text{si } RseR > 30t; \end{cases}$$



Figure 16: Graphique permettant la vérification d'épaisseur minimale de couche de base.

Ce graphique ne s'applique pas dans les cas où :

• le calcul de dimensionnement conduit à une épaisseur de couche de fondation inférieure aux valeurs minimales indiquées au paragraphe 6.7.4.

> la couche de base est constituée de matériaux granulaires (condition de faible trafic avec aéronefs du groupe 1 ou 2 et RseR<10 t).

3.2.4. Quatrième étape: spécifique au dimensionnement des aires de stationnement et d'attente

Pour les aires de stationnement et d'attente (voir figure 5), il sera effectué un calcul complémentaire dans lequel les matériaux hydrocarbonés de la couche de surface et de la couche de base seront modélisés comme une grave non traitée, associée à un module de 800 MPa, afin de tenir compte du caractère statique des sollicitations. Le paramètre K intervenant dans la loi d'endommagement associée aux matériaux de la plate-forme est porté à 24000.

On doit alors vérifier que l'endommagement par déformations permanentes au niveau de la plate-forme est inférieur à 1. Dans le cas contraire, les calculs sont repris depuis l'étape 1 avec de nouvelles hypothèses sur les épaisseurs des couches.

3.2.5. Cinquième étape: Vérification de la tenue au gel-dégel

La vérification de la tenue au gel-dégel est une opération distincte menée en fin d'étape 3 (étape 4 pour les aires de stationnement et aires d'attente). Les principes et la démarche de cette vérification sont exposés dans le chapitre 7. Dans le cas où cette vérification s'avère négative, les épaisseurs des couches devront être revues en conséquence.

3.2.6. Sixième étape: Définition des profils longitudinaux et des coupes transversales

La définition de la structure de chaussée s'achève avec celle des profils longitudinaux et des coupes transversales conformément aux préconisations des règles Aviation Civile en vigueur (arrêté TAC du 10 juillet 2006 et son annexe [5], annexe 14 de l'OACI, pour l'aviation civile internationale [23]).

4. La plate-forme support de chaussée

Ce chapitre rappelle les grandes lignes concernant la caractérisation de la plate-forme sur laquelle repose la chaussée. Ses caractéristiques influencent les sollicitations mécaniques des couches de chaussée. Elles constituent des données d'entrée nécessaires à la méthode rationnelle de dimensionnement.

4.1. Définition et documents de référence

Les structures de chaussée sont construites sur un ensemble constitué :

du sol support (déblai ou remblai, sol en place ou rapporté) désigné dans sa zone supérieure (sur 1 m d'épaisseur environ), par le terme Partie Supérieure des Terrassements (PST), et dont la surface constitue l'ARase de terrassement (AR);

d'une couche de forme, située entre la PST et les couches de chaussées et dont la surface constitue la Plate-Forme (notée PF). Cette couche a pour fonction d'homogénéiser les caractéristiques du support, d'atteindre et de pérenniser la géométrie et les performances mécaniques, hydrauliques et thermiques prises comme hypothèses dans la conception et le calcul de dimensionnement de la chaussée.

Lorsque la qualité du sol support répond aux exigences d'une couche de forme, la plate-forme se confond avec l'arase de terrassement et peut se limiter, si nécessaire, à une simple couche de réglage.

La démarche de conception et de dimensionnement des structures constituant la plate-forme support de chaussée est développée dans le GTR [11] et pour les couches de forme traitées à la chaux et/ou au liant hydraulique, dans le GTS [12].

Le GTR [11] propose une classification des sols et matériaux rocheux, à comportement identique pour un réemploi en terrassement. Cette classification est reprise dans la norme NF P 11-300 [13]. Pour chacune des classes définies, le GTR [11] définit des conditions d'utilisation et de compactage permettant d'obtenir les caractéristiques de la structure visée, en remblai ou en couche de forme.

Le GTS [12] concerne quant à lui les techniques d'amélioration des sols par traitement à la chaux et aux liants hydrauliques. Il définit notamment les études à réaliser pour la conception des couches de forme obtenues par traitement des matériaux du site, en complément du GTR [11].



Figure 17: Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR [11]) - Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS [12].

Ainsi le GTR [11] et le GTS [12] (figure 17) proposent une démarche intégrée pour la conception et le dimensionnement de la couche de forme qui conduit à une définition de performance à long terme de la plateforme support de chaussée, hors dimensionnement au gel. La suite de ce document en rappelle les grands principes et précise les hypothèses, modèles et données nécessaires à la description des sols support et des couches de forme pour le dimensionnement des structures de chaussées en liaison avec les chapitres 2 et 3.

4.2. Caractérisation de la partie supérieure des terrassements

Le dimensionnement de la couche de forme et de la structure de chaussée est basé, en premier lieu, sur la caractérisation mécanique des sols constituant la PST.

4.2.1. Identification des matériaux et conditions d'emploi

L'identification des matériaux est faite par référence à la norme de classification des sols, matériaux rocheux et sous-produits industriels (NF P 11-300 [13]) fondée sur:

- des paramètres descriptifs de la granularité et de l'argilosité,
- I'état hydrique à la mise en œuvre et éventuellement dans le long terme,
- des paramètres de comportement, tirés d'essais mécaniques, pour apprécier le caractère évolutif des matériaux dans le temps.

À partir de cette classification et de la situation météorologique au moment des travaux, le GTR [11] précise les conditions d'emploi (en l'état ou moyennant traitement) des matériaux du site, ainsi que les modalités de mise en œuvre.

4.2.2. Environnement hydrique

Selon les conditions hydrologiques (présence de nappes, infiltrations d'eau) et en fonction des dispositions constructives du projet (tracé, géométrie, dispositifs de drainage et d'assainissement), l'état hydrique des sols supports, et par là même, les caractéristiques mécaniques des matériaux sensibles à l'eau, fluctuent dans le temps.

Les dispositions de drainage doivent faire l'objet d'une attention particulière et d'une réalisation soignée. Les pathologies les plus fréquemment observées, en termes de durabilité, sont liées à un défaut de gestion des eaux vis-à-vis des structures. Leur conception est précisée dans le guide technique – « Conception et dimensionnement des réseaux de drainage des aérodromes » STBA (2000) [14], le guide technique SETRA « Drainage routier », 2006 [15] et dans la note d'information du SETRA N° 120 « Apport du drainage dans la conception des plates-formes support de chaussées » [16]. Elle doit également prendre en compte les contextes réglementaires et législatifs associés, tels que par exemple : la Loi sur l'Eau, la Directive Cadre Européenne sur l'Eau, etc., auxquels le projeteur se rapportera et qui ne sont pas détaillés dans le présent document.

4.2.3. Classification de la partie supérieure des terrassements (PST)

À partir des éléments précédents (nature et état des matériaux au moment de la mise en œuvre, et environnement hydrique), sept cas de PST sont définis et décrits dans le GTR [11].

Dans le cas de matériaux de classe D2 (grave alluvionnaire, sable), n'apparaissant pas dans les tableaux du GTR [11], on se reportera au cas de la PST n° 6, pour les matériaux justifiant un module supérieur à 120 MPa à la mise en œuvre et à long terme (sinon cas de PST n° 5).

Le cas des matériaux B3 est plus complexe : bien que présentant une argilosité assez faible, avec 0,1 < VBS < 0,2, leur insensibilité à l'eau doit être vérifiée. La définition du cas de PST à prendre en compte est laissée à l'appréciation du géotechnicien.

4.2.4. Classes de portance de l'arase de terrassement

La description de la PST est complétée par la déformabilité à long terme sur l'arase de terrassement, pour laquelle on distingue quatre classes, notées ARO à AR4 (tableau 6).

Module (MPa)	20	50	120	200
Classe de l'arase	ARI	AR2	AR3	AR4

Tableau 6: Classes de portance à long terme au niveau de l'arase de la PST.

Dans le cas de PST n° 0 (classe d'arase AR0), il est nécessaire d'améliorer d'abord la situation (par purge, drainage, etc.) pour se ramener à un module à long terme supérieur à 20 MPa avant d'établir la plateforme support de chaussée.

Les dispositions de drainage de la PST (voir chapitre 4.2.2) participent à la qualité et à la pérennité de la portance de cette dernière. Suivant le contexte hydrogéologique du site (déblais, présence d'une nappe etc.), le drainage peut descendre à 0,50 m voire 1,00 m sous le niveau de l'arase. Des dispositions spécifiques (épis, transitions remblai/déblai) peuvent également être définies par l'étude géotechnique.

Commentaires:

1) Les modules définis dans le tableau 6 correspondent **aux valeurs à long terme** prises en compte dans les calculs de dimensionnement des structures. Dans la pratique, elles peuvent varier sensiblement sur chantier, à la réception de l'arase, suivant les conditions de réalisation et la période où sont réalisés les essais.

Ainsi, elles ne peuvent en théorie être confirmées à partir d'essais de chargement à la plaque, à la Dynaplaque, ou de la mesure de la déflexion sous l'essieu de 130 kN, que si les sols sont insensibles à l'eau ou que l'état hydrique au moment de l'essai est représentatif des conditions hydriques défavorables qui peuvent être rencontrées dans la chaussée en service. Dans le cas contraire, les recommandations pour la rédaction du CCTP peuvent conduire à retenir des valeurs de réception plus élevées.

2) Les exigences minimales requises à la réception peuvent être adaptées en fonction des conditions hydrogéologiques (risque de baisse de portance au cours de la période de calcul), des contraintes de traficabilité et de chantier ou des choix de structure de couche de forme:

▶ dans le cas AR1, une portance minimale de 30 à 35 MPa pourra être imposée pour des exigences de traficabilité,

▶ dans le cas AR1, une portance minimale de 35 à 40 MPa pourra être imposée dans le cas du choix d'une couche de forme traitée,

▶ dans le cas AR2, une portance minimale de 80 MPa pourra être imposée pour s'assurer d'une qualité des matériaux rocheux utilisés en arase ou d'une qualité du traitement à la chaux ou aux liants hydrauliques,

▶ enfin, une portance minimale de réception supérieure aux valeurs du tableau 6 pourra être définie par le géotechnicien, par exemple de 30 à 40 MPa pour les cas PST1, PST2 ou PST3, pour anticiper une éventuelle chute de portance à long terme suivant les conditions hydriques du chantier.

3) Dans le cas où il y a possibilité de pénétration du front de gel au-delà de la couche de forme, il appartient au projeteur, au bureau d'études géotechniques ou à l'entreprise d'apporter des éléments permettant d'évaluer la sensibilité au gel (au sens de la norme NF P 98-234-2 [24]) des sols qui constituent la PST.

4.3. Couche de forme

4.3.1. Rôles et conception de la couche de forme

La couche de forme est un élément de transition permettant d'adapter les caractéristiques des matériaux de remblai ou du terrain en place aux fonctions essentielles d'une plate-forme support de chaussée. Ces fonctions se déclinent à court et long terme de la façon suivante:

à court terme (lors de la réalisation de la chaussée) la couche de forme doit garantir des caractéristiques minimales vis-à-vis:

✓ de la traficabilité, pour assurer, pendant la saison prévue pour l'exécution des travaux de chaussée, la circulation des engins approvisionnant les matériaux de l'assise,

- ✓ du nivellement pour garantir la régularité de l'épaisseur des couches et l'uni de la chaussée terminée,
- ✓ de la déformabilité (portance) pour permettre le compactage correct des couches de chaussée,

✓ de la résistance au gel si nécessaire afin d'assurer la protection du sol support.

Les critères de réception de la couche de forme au regard de la traficabilité, du nivellement et de la déformabilité sont définis en annexe G.

• à long terme (vis-à-vis de l'ouvrage en service) la couche de forme a pour fonction :

- d'homogénéiser des caractéristiques du support,
- ✓ de maintenir dans le temps une portance minimale,
- ✓ de contribuer au drainage,
- ✓ de protéger le sol support vis-à-vis du gel si nécessaire.

La plate-forme est caractérisée par une classe de portance à long terme (cf. paragraphe 4.4.1).

Selon les cas de chantier (nature des sols, climat, environnement hydrogéologique, trafic de chantier, etc.), la couche de forme peut être :

▶ inexistante ou réduite à une mince couche de réglage, lorsque les matériaux constituant le remblai ou le sol en place, traité ou non, ont eux-mêmes les qualités requises,

• constituée d'une ou plusieurs couches de matériaux différents (matériaux en place ou rapportés, traités ou non) incluant éventuellement un géotextile.

La conception de la couche de forme est définie dans le GTR [11] et dans le cas des couches de forme traitées, dans le GTS [12]. En fonction du cas de PST et de la nature du matériau retenu pour la constituer, ces documents préconisent l'épaisseur à mettre en œuvre afin de garantir ses fonctions à court et long terme, à l'exception du gel qui doit faire l'objet d'un dimensionnement spécifique (chapitre 7).

4.3.2. Les matériaux de couche de forme

Certains matériaux pourront être employés en couche de forme en l'état, d'autres pourront être rendus aptes moyennant une modification de leur nature et/ou de leur état afin de satisfaire à des critères concernant :

- I'insensibilité à l'eau,
- la dimension des plus gros éléments,
- la résistance sous circulation des engins de chantier,
- I'insensibilité au gel, le cas échéant *

(*) Suivant l'indice de gel pris en référence, des structures de chaussées épaisses peuvent suffire pour assurer la protection au gel/dégel pour des indices modérés. Dans le cas général, il est souhaitable de retenir par principe un matériau insensible au gel (au sens de l'essai de gonflement, NF P 98-234-2 [24]) et à la gélifraction (au sens de l'essai de résistance au gel des granulats, NF P 18-545 [25]), le choix contraire devant être justifié par une analyse spécifique vis-à-vis de la pénétration du gel.

Les conditions d'usage et de mise en œuvre des matériaux de couche de forme sont définies dans le GTR [11] et le GTS [12].

Toutefois, pour les matériaux granulaires non traités, il est recommandé d'utiliser des critères plus restrictifs en retenant des matériaux conformes aux normes NF EN 13-285 [18] et NF EN 13-242 [26], en les assimilant à une classe GTR [11] équivalente avec un objectif de densification *q3*. Cette approche sécuritaire permet de garantir la pérennité de la couche de forme au regard de l'effet des charges aéronautiques élevées.

Pour certains matériaux locaux spécifiques, déchets ou sous-produits industriels, il existe des possibilités de valorisation en remblai voire en couche de forme en se référant à des guides techniques régionaux et à la note d'information n° 114 du SETRA sur la conduite d'une planche d'essai de compactage [27].

4.3.3. Spécifications se rapportant aux constituants des graves non traitées

Les granulats utilisés pour les graves non traitées doivent être de préférence conformes aux catégories choisies dans la norme NF EN 13-242 [26], sauf étude géotechnique particulière. Cette norme est codifiée selon sa déclinaison française NF P 18-545 [25].

Les caractéristiques minimales pour les granulats constituant les GNT sont ainsi rappelées dans le tableau 7 ci-dessous :

Usage	Caractéristiques minimales selon NF P 18-545 [25]		Classes de trafic					
		CT1	CT2	СТЗ	CT4	CT5		
	Granularité	0/63	0/63	0/63	0/63	0/63		
Couche	Résistance mécanique des gravillons	Code E	Code E	Code E/D*	Code D	Code D		
de forme	Caractéristiques de fabrication des gravillons	Code IV	Code IV	Code IV/III*	Code III	Code III		
Caractéristiques de fabrication des sables		Code c	Code c	Code c/b*	Code b	Code b		
	Angularité des gravillons	Ang 4	Ang 4	Ang 3/Ang 2*	Ang 2	Ang 2		

*Si des aéronefs du groupe 4 ou 5 sont accueillis avec un trafic supérieur à 1 mouvement par jour, on considérera :

- ✓ un code D pour la résistance mécanique des gravillons
- ✓ un code III pour les caractéristiques de fabrication des gravillons
- \checkmark un code b pour les caractéristiques de fabrication des sables
- ✓ Ang 2 pour l'angularité des gravillons

4.3.4. Spécifications se rapportant aux mélanges pour les graves non traitées

Les caractéristiques minimales recommandées du mélange sont rappelées dans le tableau 8 ci-dessous :

	Caractéristiques minimales selon NF EN 13-285 [18]
Code	GNT 1
Désignation	0/63 mm
Teneur en fines	UF12 LF2
Dimensions maximales	OC_{80}
Fuseaux de spécifications	G_B

Tableau 8: Caractéristiques minimales du mélange.

Dans le cas où les GNT mises en œuvre risquent de subir le gel, on doit s'assurer :

• de préférence, de l'insensibilité au gel du mélange appréciée, en laboratoire, par l'essai de gonflement au gel (NF P 98-234-2 [24]),

• de la résistance au gel des granulats telle que spécifiée dans la norme NF P 18-545 [25]).

4.4. Classement des plates-formes support

La portance à long terme de la plate-forme support de chaussée est déterminée à partir du couple (PST-AR)/ couche de forme.

Les classes de portance à long terme de la plate-forme support sont indiquées dans le tableau 9.

Module (MPa)	50	80	120	200
Classe de plate-forme	PF2	PF2 ^{qs}	PF3	<i>PF4</i> *

*La classe de plate-forme PF4 est indiquée pour mémoire, car en pratique, compte tenu des spécificités et des contraintes associées aux sollicitations aéroportuaires, elle n'est pas recherchée pour ce type d'application

 Tableau 9: Classes de portance à long terme de la plate-forme support.

Commentaires:

Ces valeurs correspondent aux modules à long terme. Elles peuvent varier sensiblement à la réception de la plate-forme, suivant les conditions de réalisation du chantier et la période où sont réalisés les essais :

a) Pour les couches de forme granulaires, elles ne peuvent en théorie être confirmée à partir d'essais de chargement à la plaque (NF P 94-117-1 [28]), à la Dynaplaque (NF P 94-117-2 [29]), ou de la mesure de la déflexion sous l'essieu de 130 kN, que si les matériaux de la PST sont insensibles à l'eau ou que l'état hydrique au moment de l'essai est représentatif des conditions hydriques défavorables qui peuvent être rencontrées dans la chaussée en service. Dans le cas contraire, les recommandations pour la rédaction du CCTP peuvent conduire à retenir des valeurs de réception plus élevées.

b) Pour les couches de forme traitées aux liants hydrauliques, ces valeurs de module ne peuvent en aucun cas être mesurées par des mesures de module de déformabilité à la plaque ou à la Dynaplaque. Le module d'une couche de forme traitée est défini par l'étude et par les contrôles en continu qui garantissent l'obtention de la qualité finale, tels que définis dans la note d'information SETRA N° 118 « éléments clés de l'assurance qualité des couches de formes traitées », 2009 [30].

Connaissant la classe de portance de l'arase de terrassement, ARi, et le matériau de couche de forme, le classement de la plate-forme s'effectue ainsi:

▶ lorsque la couche de forme a au moins l'épaisseur préconisée par le GTR [11], ce dernier précise dans des tableaux la classe de la plate-forme,

▶ lorsque la couche de forme a une épaisseur inférieure à l'épaisseur préconisée, la classe de la plate-forme à retenir est celle de l'arase de terrassement.

Les règles de dimensionnement des couches de forme au regard des classes de plate-forme visées sont exposées dans le GTR [11] et le GTS [12]. L'annexe F en rappelle les grands principes.

Dans le modèle élastique linéaire, la présence éventuelle d'une **couche de forme** est prise en compte à travers la classe de plate-forme et n'est donc **pas individualisée en tant que couche de chaussée**.

4.5. Cas particulier des couches de forme traitées aux liants hydrauliques

Le retour d'expérience français actuel quant à l'usage de couches de forme traitées aux liants hydrauliques dans le domaine aéronautique est limité.

Interdire leur usage face à ce constat n'est pas satisfaisant, d'autant plus que le recours à ces structures peut s'avérer intéressant dans le cadre de l'application d'une politique de développement durable et d'économie des ressources naturelles.

Il semble raisonnable aujourd'hui d'autoriser la mise en œuvre de ces structures sous réserve d'appliquer quelques principes de précaution, traduits ici en termes d'épaisseur minimale de couche de fondation en matériaux granulaires, de dispositifs de drainage, et de dispositions limitant les remontées de fissures anarchiques dans le corps de chaussée (pré-fissuration par exemple).

Les liants hydrauliques confèrent à la couche de forme une rigidité élevée. Au regard de l'importance des charges aéronautiques, cette dernière est susceptible d'être sollicitée de façon importante. Si elle se dégrade dans le temps et si l'épaisseur de la couche de fondation est faible (épaisseur technologique minimale) les risques de sur-sollicitation de la couche de base et donc de détérioration de la chaussée sont élevés. Ce risque est accru en cas d'utilisation d'un matériau bitumineux rigide du type EME en couche de base. Ainsi dans le but de limiter ces risques et au stade des connaissances actuelles, la règle de précaution suivante est proposée :

Les couches de fondation des chaussées reposant sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques doivent présenter une **épaisseur minimale de 20 cm** quelles que soient la classe de plate-forme et la classe de trafic (au sens du GAN [3]).

Enfin, le recours aux couches de forme traitées doit impérativement s'accompagner de la mise en œuvre d'un **dispositif de drainage** de façon à éviter tout emprisonnement d'eau dans les couches de matériaux non traités.

4.6. Caractéristiques mécaniques de la plate-forme support en vue du dimensionnement des chaussées

La méthode de dimensionnement des chaussées est calée en retenant les caractéristiques mécaniques correspondant aux conditions hydriques les plus défavorables pour la chaussée (périodes de gel et dégel exclues), en intégrant l'effet des drainages éventuels. Ainsi, le calcul est réalisé en situation dégradée, souvent rencontrée en période hivernale, sans prendre en compte la période estivale, plus favorable: les variations saisonnières des conditions hydriques ne sont donc pas prises en compte dans le calcul.

4.6.1. Calcul des sollicitations dans la chaussée sous trafic

La classe de plate-forme intègre le fonctionnement global de l'ensemble « PST + couche de forme » et constitue l'élément dimensionnant de la structure. Elle influe à ce titre sur les sollicitations mécaniques des couches de chaussée et, ainsi, sur leur dimensionnement.

Pour les calculs standards de dimensionnement de structure de chaussées neuves, la plate-forme support est modélisée par un demi-espace élastique linéaire, de profondeur infinie. Celui-ci est caractérisé par un coefficient de Poisson de 0,35 et un module Young. La valeur de ce dernier est prise égale à la borne inférieure de la classe de portance à long terme PFi de la plate-forme support. Cependant, pour la classe PF4, le module à utiliser pour le dimensionnement est **ramené à 120 MPa**, conformément au tableau 10, de façon à **adopter une approche sécuritaire vis-à-vis de l'agressivité des charges aéronautiques**, que la couche de forme soit traitée ou non traitée.

Classe de plate-forme	PF2	PF2 ^{qs}	PF3	PF4
Module considéré dans le calcul (MPa)	50	80	120	120

Tableau 10: Modules associés aux classes de portance à long terme de la plate-forme support pour le dimensionnement des chaussées aéronautiques.

Lorsqu'un substratum rigide se situe à une profondeur comprise entre 2 et 6 m, on devra tenir compte de sa présence dans le modèle de calcul en subdivisant le massif support en deux couches. L'une est d'épaisseur finie h_{sub} et l'autre, représentant le substratum, est d'épaisseur infinie, comme défini au paragraphe 2.4. Le substratum est ici défini comme un horizon pouvant être considéré comme indéformable par rapport à la rigidité du sol qu'il supporte.

Une étude spécifique est nécessaire lorsque le substratum est situé à une profondeur inférieure ou égale à 2 m.

4.6.2. Déformations permanentes de la plate-forme

Vis-à-vis du risque d'orniérage de la plate-forme par cumul de déformations permanentes sous la répétition des charges roulantes (cycles), la méthode de dimensionnement consiste à limiter l'amplitude de la déformation verticale \mathcal{E}_{zz} sous trafic de la plate-forme sous ces mêmes charges. La relation utilisée pour définir la déformation verticale maximale (*en µdef*) correspondant à un nombre de cycles N pour une charge donnée est définie par:

$$\varepsilon_{zz \max} = K.N^b$$

N est le nombre de cycles conduisant à la rupture et

$$\begin{cases} K = 16000 \\ b = -0,222 \end{cases}$$

5. La couche de surface

Après avoir recueilli les données nécessaires au calcul, la première étape du dimensionnement des structures de chaussées consiste à opérer un premier choix quant à la définition de la couche de roulement en fonction de la nature de l'infrastructure (piste, voie de circulation, parking, etc.) des performances recherchées et des propriétés d'usage attendues. La démarche consiste à sélectionner un type de produit à mettre en œuvre et à préciser son épaisseur dans une plage de variation donnée.

Nota: la démarche rationnelle de dimensionnement ne s'applique pas aux matériaux hydrocarbonés de la couche de surface, les mécanismes d'endommagement de cette couche étant différents de ceux des couches d'assise. La détermination de l'épaisseur de la couche de surface repose sur les retours d'expérience terrain et relève de l'empirisme.

5.1. Définition et documents de référence

La couche de surface d'une chaussée lui confère ses propriétés d'usage (adhérence, bruit par exemple). Elle doit aussi résister au fluage et au poinçonnement, au vieillissement dû aux agents atmosphériques et aux gradients thermiques et à l'agressivité des hydrocarbures.

Elle est constituée:

▶ d'une couche de roulement: en contact avec les pneumatiques, elle doit permettre d'assurer des caractéristiques d'adhérence conformes aux spécifications aéronautiques, elle joue également un rôle d'imperméabilisation,

▶ et éventuellement d'une couche de liaison: couche intermédiaire entre la couche de roulement et la couche de base. Elle est principalement réalisée lors des travaux d'entretien pour améliorer l'uni ou pour retarder la propagation des fissures des couches inférieures vers la couche de roulement, la couche de liaison se situe alors entre la couche de roulement et l'ancienne chaussée.

Le GAN [3] présente la démarche à suivre pour choisir les produits à utiliser en couche de surface et pour définir les performances des enrobés (formulations) et les caractéristiques des constituants (granulats et liants) les composant afin de répondre au mieux aux exigences du projet. Ce document traite également des préconisations relatives aux caractéristiques à obtenir en laboratoire (épreuve au niveau de la formulation) et sur le chantier, depuis la fabrication de l'enrobé jusqu'à sa mise en œuvre.

La suite de ce chapitre présente les grands principes du choix de la nature et de l'épaisseur de la couche de surface exposée dans le GAN [3]. Toutefois, il est nécessaire de se référer à ce document pour mettre en pratique la démarche.

5.2. Choix du type de couche de surface

Le choix du type de couche de surface dépend des objectifs retenus et des performances recherchées. Les données économiques du projet doivent aussi être prises en compte.

Ce choix est fonction du type de surface aéronautique à traiter. Il est basé sur des critères relevant de la résistance aux dégradations affectant les chaussées aéronautiques, de l'adhérence et de la résistance aux agressions chimiques (déversement accidentel d'huiles ou d'hydrocarbures).

Les principales dégradations affectant les chaussées aéronautiques sont :

▶ le cisaillement, résultant de la contrainte horizontale due aux efforts tangentiels transmis par les pneumatiques lors des girations des aéronefs,

▶ l'orniérage (petit rayon), traduisant une déformation permanente due aux répétitions de charges roulantes à faible vitesse,

▶ le poinçonnement, dont l'origine se trouve dans la déformation permanente due à des charges statiques,

▶ le vieillissement n'affectant que la couche de roulement. Il dépend du climat, de la nature des produits et des éventuelles pollutions. L'aptitude à résister à ce facteur est appelée « la durabilité ».

L'adhérence d'une chaussée se caractérise par la qualité et le maintien de la rugosité de son revêtement. Elle est définie par la macrotexture et la microtexture. La macrotexture est liée au type de revêtement et à son mode de mise en œuvre, aux dégradations et aux traitements ponctuels de la surface. La microtexture est liée aux aspérités de la surface des granulats en contact avec la gomme des pneumatiques.

Le tableau 11, extrait du GAN [3], fournit en fonction du type d'aire une appréciation du niveau d'agression et de la qualité des caractéristiques de surface de chaussée.

		Cisaillement	Orniérage	Poinçonnement	Durabilité	Adhérence
Aire de sta	tionnement	++	+++	+++	++	++
	Partie courante	+	+	+	++	+++
Piste	Raquette	+++	++	+	+++	++
	Sortie de piste	+++	+	+	++	+++
	Seuil de piste (*)	+++	+	++	+++	+++
Voie	Partie courante	+	++	+	++	++
de circulation	Raccordement	++	++	++	+++	++
Plate-forme of	u aire d'attente	+	+++	+++	++	++

(*) zone de toucher de roue incluse

+ : Niveau faible

++ : Niveau moyen +++ : Niveau élevé

Tableau 11: Appréciation du niveau d'agression et de la qualité des caractéristiques de surface de chaussée.

5.3. Définition de la couche de surface

Le comportement de la couche de surface est à examiner sous l'angle de sa durabilité, de son adhérence et de sa résistance au cisaillement, à l'orniérage et au poinçonnement.

La méthode de dimensionnement exposée aux chapitres 2 et 3 n'a pas vocation à être appliquée au dimensionnement de la couche de surface à proprement dit. En effet, sous l'action du trafic, la couche de roulement est soumise par les pneumatiques à un état de contrainte complexe. Le comportement mécanique de la couche de roulement n'est pour le moment appréhendé que vis-à-vis des contraintes normales qui s'exercent en surface. Cette dernière, modélisée comme une couche de structure, intervient toutefois dans le calcul par le biais de son module. Le GAN [3] propose de choisir les matériaux constitutifs des couches de surface en fonction d'une notion appelée « niveau de sollicitation » qui résulte, pour un aérodrome donné, de la combinaison de deux facteurs : la classe de trafic et le type de climat.

La classe de trafic est fonction de la pression de gonflage des pneumatiques, du nombre de roues de l'atterrisseur principal et du nombre journalier de passages de l'avion (sa fréquence).

> Quatre types de climat ont été définis à partir des moyennes des températures maximales journalières sur les deux mois les plus chauds et sur les deux mois les plus froids de l'année: type 1 à dominante océanique, type 2 à dominante méditerranéenne, type 3 à dominante continentale ou montagneuse et type 4 à dominante tropicale.

Le GAN [3] définit quatre niveaux de sollicitation, de NS1 à NS4 (cf. glossaire, VI), en fonction desquels il liste les produits utilisables en couche de roulement et en couche de liaison pour chaque type de section à dimensionner. Il précise également les épaisseurs moyennes d'utilisation des produits suivant leur granularité.

Les tableaux 12 et 13 suivants, extraits du GAN [3], illustrent ce choix de couche de roulement et de couche de liaison.

Ouvrage/Sect	ion d'ouvrage	NS 1	NS 2	NS 3	NS 4
Aire de trafic EB-BBA 2, ESU, ECF, EP, EB-BBM 1		EB-BBA 3, EB-BBM 2 EB-BBME 1, EP	(***) EP ⁽¹⁾	(***) EP ⁽¹⁾	
	Partie courante		EB-BBA 1 EB-BBM A2 BBTM	EB-BBA 2	EB-BBA 2
Piste	Raquette	EB-BBA 1, EB-BBM A1, EB-BBM B1 BBTM	EB-BBA 2 EB-BBME 1	EB-BBME 2 ⁽²⁾	EB-BBME 3(2)
	Sortie/Entrée de piste		EB-BBA 2 EB-BBM A2	EB-BBA 3 EB-BBME 2	EB-BBA 3
	Seuil (**)		EB-BBA 2 EB-BBM A2	EB-BBA 3 ⁽²⁾	EB-BBA 3 ⁽²⁾
Voies de circulation	Partie courante	EB-BBA 1, ECF, EB-BBM B2,	EB-BBA 2 EB-BBM B3 BBTM	EB-BBA 2 EB-BBME 1	EB-BBA 3 EB-BBME 2
	Raccordement	BBTM BBTM	EB-BBA 2 EB-BBM B3	EB-BBA 3 EB-BBME 2	EB-BBA 3 EB-BBME 2
Plate-forme ou aire d'attente EB		EB-BBA 1, ECF, EB-BBM B2, BBTM	EB-BBA 3 EB-BBM B3	EB-BBME 3	EB-BBME 3

(*) L'utilisation de l'EB10-BBA C est à proscrire (rugosité géométrique assez faible). (**) Sur les bases militaires, où les avions de chasse peuvent provoquer des dégradations sur les chaussées en enrobés (brûlures superficielles/déversement d'hydrocarbure): une chaussée en béton de ciment est préconisée. (***) Sur les aires de trafic où les risques de poinçonnement sont importants, la réalisation d'une chaussée en béton de ciment est fortement recommandée.

(i) Son emploi est lié au support (couche de base) qui doit présenter un haut module de rigidité (par exemple structure semi-rigide ou bitumineuse). En général, le support est composé soit d'une grave hydraulique, soit d'un enrobé à module élevé ou d⁷une grave bitume.

(²) Pour une meilleure résistance aux contraintes de cisaillement, il est préconisé un liant modifié.

Tableau 12: Extrait du GAN [3]- Produits utilisables en couche de roulement.

Ouvrage/Section d'ouvrage		NS 1	NS 2	NS 3	NS 4	
Aire de sta	tionnement	EB-BBM 1 EB-BBSG 1	EB-BBM 3 EB-BBSG 1	(*)	(*)	
	Partie courante		EB-BBM 1 EB-BBSG 1	EB-BBM 2 EB-BBSG 1 EB-BBME 1	EB-BBSG1 EB-BBME1	
Piste	Raquette	EB-BBM 1 EB-BBSG 1	EB-BBM 1			EB-BBSG 2 EB-BBME 2
	Sortie/Entrée de piste		EB-BBM 2 EB-BBSG 1	EB-BBM 5 EB-BBSG 1 EB-BBME 1	EB-BBSG 2	
	Seuil				EB-BBME 2	
Voies de	Partie courante	EB-BBM 1	EB-BBM 2	EB-BBM 2 EB-BBSG 1 EB-BBME 1	EB-BBSG 1	
circulation	Raccordement	EB-BBSG 1	EB-BBSG 1	EB-BBM 3 EB-BBSG 1 EB-BBME 1	EB-BBME I	
Plate-forme ou aire d'attente		EB-BBM 1 EB-BBSG 1	EB-BBM 2 EB-BBSG 1	EB-BBM 3 EB-BBSG 1 EB-BBME 1	EB-BBSG 2 EB-BBME 2	

(1) Sans objet. Pour les aires de stationnement où les risques de poinçonnement sont importants, la réalisation d'une chaussée en béton de ciment est fortement recommandée. Remarque : les produits de classe de performance supérieure peuvent être utilisés dans la mesure où le bilan économique reste satisfaisant. Les produits utilisés ne contiennent généralement pas de bitume polymère.

Tableau 13: Extrait du GAN [3]- Produits utilisables en couche de liaison (et de reprofilage).

6. Les matériaux de chaussée

6.1. Matériaux bitumineux - Généralités

Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés sont des mélanges de granulats et de liants hydrocarbonés, avec incorporation éventuelle d'additifs, dosés, chauffés et malaxés en centrale. Également appelés enrobés bitumineux, ils sont utilisés en couche de roulement ou couche de liaison (bétons bitumineux) ou en couche de base (graves bitumes et enrobés à module élevé). Les matériaux utilisables pour la constitution d'une chaussée aéronautique sont rappelés dans le tableau 14 extrait du GAN [3]. Plus généra-lement, l'utilisation du présent guide de dimensionnement des chaussées aéronautiques souples neuves doit se faire conjointement avec les pratiques décrites dans le GAN [3].

	Produits
Couche de roulement	EB-BBA, EB-BBSG, EB-BBME, EB-BBM, BBTM, SMA, ESU, ECF, EP
Couche de liaison	EB-BBA, EB-BBME, EB-BBM, EB-BBSG
Couche de base	EB-GB, EB-EME

Tableau 14: Produits utilisables pour la constitution d'une chaussée aéronautique.

Le GAN [3] traite en détail des produits « enrobés bitumineux à chaud » en abordant entre autres les références normatives, le choix des granulats et du liant hydrocarboné, les conditions d'emploi en relation avec le niveau de sollicitation NS (cf. glossaire, VI). Il propose des aides au choix des produits bitumineux les mieux adaptés aux sollicitations particulières de chaque aire aéronautique en fonction des aéronefs attendus et du climat de la plate-forme.

Le présent guide précise les données utiles des produits pour le dimensionnement, notamment valeur de module et performance en fatigue.

6.1.1. Cadre normatif

La série des normes NF EN 13-108 [17] définit pour les mélanges bitumineux la formule d'un enrobé à partir des caractéristiques générales complétées par des caractéristiques empiriques ou par des caractéristiques fondamentales. Elle définit ainsi deux approches : l'approche dite empirique qui regroupe les caractéristiques générales et empiriques et l'approche dite fondamentale qui regroupe les caractéristiques générales.

Nota: Ces deux approches étant incompatibles, les spécifications « empiriques » et « fondamentales » ne peuvent être combinées.

Caractéristiques « générales » :

ce sont la granularité, le pourcentage de vides (teneur en vides), la sensibilité à l'eau (tenue à l'eau), et la résistance aux déformations permanentes (essai à l'orniéreur).

Caractéristiques complémentaires :

caractéristiques « empiriques »: ce sont principalement la teneur en bitume minimale du mélange (exprimée en pourcentage de la masse totale de l'enrobé), la nature du liant, et l'étendue des fuseaux granulométriques aux tamis caractéristiques.

caractéristiques « fondamentales »: ce sont principalement le module de rigidité et la résistance à la fatigue. La résistance aux déformations permanentes peut être caractérisée, en remplacement de l'essai d'orniérage, par des essais de type compression répétée (NF EN 12-697-25 [31]) qui ne sont pas utilisés dans les épreuves de formulation courantes.

L'approche **fondamentale** correspond aux études de formulations de niveau 3 ou 4 définis en 6.1.2. Elle s'applique essentiellement aux matériaux à vocation structurelle. Elle permet de fournir des valeurs mesurées pour le dimensionnement des graves bitumes, des enrobés à module élevé, des bétons bitumineux à module élevé et plus rarement des bétons bitumineux semi-grenus.

Ainsi,

▶ Pour les couches de surface, les spécifications sont basées dans la majorité des cas sur l'approche empirique (et systématiquement pour les BBTM, les EB-BBM).

▶ Pour les couches d'assises, le recours à l'approche fondamentale est incontournable pour les matériaux de type EB-GB 4 et EB-EME 2. Pour les matériaux de type EB-GB 3, les deux approches sont possibles mais il est recommandé d'avoir recours à l'approche fondamentale.

Certaines propriétés des mélanges hydrocarbonés ne peuvent pas être caractérisées par les approches empiriques ou fondamentales. C'est le cas par exemple de la résistance à l'abrasion, aux chocs ou au polissage sous l'effet du trafic. Ces propriétés sont prises en compte au travers de spécifications relatives aux caractéristiques des granulats. De plus, ces approches ne traitent pas des modalités de fabrication et de mise en œuvre.

6.1.2. Propriétés intrinsèques du mélange – étude de formulation

Selon les pratiques françaises, les caractéristiques des mélanges hydrocarbonés sont mesurées au moyen d'une épreuve de formulation en laboratoire. Elle a pour objectif de fournir la preuve que la formule satisfait aux spécifications de la norme produit. L'épreuve est réalisée en laboratoire, conformément aux modalités décrites dans la norme NF EN 13 108-20 [32], sur des matériaux représentatifs du chantier.

Les approches européennes distinguent cinq niveaux d'épreuve de formulation en fonction de la nature du matériau, de sa position dans la chaussée (couche de roulement, de liaison ou d'assise), du niveau de sollicitation et enfin des spécifications du marché. Ces 5 niveaux sont déclinés et définis en France de la façon suivante :

niveau 0: il consiste à établir une courbe granulométrique et à fixer une teneur en liant. Ce niveau peut être requis pour les enrobés des zones peu circulées (accotement par exemple),

- ▶ niveau 1: il est associé à la réalisation d'essais PCG (Presse à Cisaillement Giratoire) et d'essai de tenue à l'eau.
- ▶ niveau 2: essais de niveau 1 complétés des essais d'orniérage,
- ▶ niveau 3: essais de niveau 2 complétés de l'essai de module (sans objet pour EB-BBM et BBTM),
- ▶ niveau 4: essais de niveau 3 complétés de l'essai de fatigue.

Le tableau 15 définit les niveaux de formulation requis en fonction de la nature de la chaussée étudiée, des niveaux de sollicitation et de la position de l'enrobé dans la chaussée (couches de surface, couches d'assises).

		NS1	NS2	NS3	NS4
Aire de sta	tionnement	1	2 1	*	*
	Partie courante	1	1	3 4	3 4
Piste	Raquette	1	2 3	3 4	3 4
	Sortie rapide	1	2 1	3 4	3 4
	Seuil	1	2 1	3 4	3 4
Voie de circulation	Partie courante	1	2 1	3 4	3 4
et voie de desserte	Raccordement	1	2 3	3 4	3 4
Aire d'a	ttente**	1	2 1	2 4	2 + P 4
* Structure en béton hydraulique ou Enrobé Percolé ** Voir définitions glossaire P: essai de résistance à la déformation statique (essai de module en traction directe-chargement long ou essai de poinçonnement)				(i) Couches de surface i et i : nivea	(i) Couches d'assise u de l'étude

Tableau 15: Niveaux d'études de formulation selon le niveau de sollicitation.

Pour les niveaux de sollicitations NS1 et NS2, l'étude est valable au maximum cinq ans. Pour les niveaux de sollicitation NS3 et NS4, elle n'est valable que deux ans. Cependant, sa validité peut-être étendue sans toutefois dépasser cinq ans si la vérification de l'aptitude au compactage à l'essai PCG conduit à un résultat ne s'écartant pas de plus de 1,5 % de l'étude initiale, aux nombres de girations prescrits pour le produit correspondant.

Les niveaux d'études de formulation 3 et 4 imposent la réalisation d'essais de laboratoire conduisant à l'obtention de caractéristiques de module et de fatigue. Dès lors que le matériau est conforme aux spécifications attendues, il est possible de prendre en compte dans le calcul de dimensionnement les valeurs obtenues en laboratoire sous réserve que ces caractéristiques aient bien été obtenues lors de l'étude de formulation sur des matériaux élaborés avec les constituants du chantier, avec le pourcentage de vide prescrit, sans cependant dépasser les valeurs maximales normatives.

6.1.3. Performances mécaniques pour le dimensionnement

Les caractérisations mécaniques recherchées portent sur :

- ▶ la rigidité du matériau, appréhendée à travers une valeur du module d'Young,
- le comportement en fatigue.

Ce second aspect n'est pas pris en considération pour les matériaux de couche de roulement surtout sollicités en compression et en cisaillement.

Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés sont des matériaux thermo-visco-élastiques assimilés dans le dimensionnement à des matériaux à comportement élastique dont le module est choisi en fonction de la température équivalente et de la vitesse V de déplacement de la charge. À cette vitesse est associée une fréquence de sollicitation⁹ prise égale à f(Hz) = V (km/h)/10. Ainsi, $|E = |E^* = f(\theta_{eq}, f)$.

En pratique, la valeur de $E^*(\theta_{eq}, f)$ est déduite de la valeur du module mesurée en laboratoire pour une température de 15°C et une fréquence de 10 Hz (essai de module complexe) ou 0,02 s (essai de traction indirecte). Par la suite, elle est corrigée à l'aide de courbes de susceptibilité types fonctions de la famille du matériau.

Dans le cadre de l'approche empirique, le module à 15°C et 10 Hz (ou 0,02 s) est pris par défaut égal à la valeur inférieure de la plage de module indiquée par la norme matériau. Dans l'approche fondamentale, il peut être déterminé par l'un des essais suivants:

I'essai en flexion deux points (annexe A de la norme NF EN 12697-26 [20]), en retenant le module à 15°C et 10 Hz,

▶ l'essai de traction directe à la MAER, en retenant le module calculé à 0,02 s et 15°C (annexe E de la norme NF EN 12697-26 [20]),

Le comportement en fatigue est apprécié à l'aide de l'essai de fatigue en flexion (annexe A de NF EN 12697-24 [19]) pratiqué à 10°C et 25 Hz. Dans cet essai (figure 18), l'éprouvette trapézoïdale encastrée à la base est sollicitée en tête par un déplacement sinusoïdal d'amplitude constante, sans période de repos.



Figure 18: Essai de flexion 2 points.

⁹ Cette formule diffère du cas routier (qui associe une fréquence de 10 Hz à des charges roulant à 70 km/h) en raison des épaisseurs de matériaux liés généralement plus élevées et des empreintes de contact plus grandes. La rupture conventionnelle correspond au nombre de cycles *N* pour lequel l'effort qu'il est nécessaire d'appliquer est réduit de moitié. La courbe de fatigue est représentée par une relation de la forme :

$$\frac{\varepsilon_{t\,\max}}{\overline{\varepsilon}_{6}} = \left(\frac{N}{10^{6}}\right)^{b}$$

avec $\overline{\mathcal{E}_6} = \mathcal{E}_6(10^\circ\text{C},25 \text{ Hz})$: valeur de la déformation à 10⁶ cycles obtenue lors de l'essai de fatigue à la température de 10°C et à la fréquence de 25 Hz.

La dispersion des résultats est décrite par l'écart-type S_N de la variable log(N), à la rupture.

6.1.4. Contraintes liées à la mise en œuvre

L'épaisseur des couches élaborées à partir de liants hydrocarbonés présente une variabilité dont la dispersion est traduite par l'écart type S_h .

Pour les chantiers courants, on retient pour l'écart type S_h la valeur donnée par le tableau 16 en fonction de l'épaisseur e de matériaux bitumineux de couche de base.

e (cm)	<i>e</i> ≤ 10	10 < e < 15	$e \ge 15$
S _h (cm)	1	1 + 0,3 (e-10)	2,5

Tableau 16: Écart type sur les épaisseurs à la mise en œuvre des couches en matériaux hydrocarbonés.

Nota : sur certains chantiers, moyennant une maîtrise stricte des caractéristiques géométriques de la plateforme, une portance élevée, et un répandage en vis calée, la dispersion sur les épaisseurs peut être limitée à 1,5 cm

6.2. Grave-bitume

Les matériaux de type graves bitumes sont définis dans la norme NF EN 13108-1 [33]. Les matériaux EB-GB de classe 1 ne sont pas utilisés en chaussées aéronautiques.

6.2.1. Mise en œuvre

Les épaisseurs recommandées pour les matériaux de type EB-GB, définies dans le GAN [3], sont de :

- ▶ 8 à 14 cm pour la EB14-GB pour une épaisseur minimale en tout point de 6 cm,
- ▶ 10 à 16 cm pour la EB20-GB pour une épaisseur minimale en tout point de 8 cm

6.2.2. Performances mécaniques

Les caractéristiques minimales à retenir pour les graves bitumes sont récapitulées dans le tableau 17.

	Valeurs minimales conventionnelles		Valeurs n	naximales		
Classe	Module (MPa) à 15°C et 10 Hz	E ₆ (10 ⁻⁶) à 10°C et 25 Hz	Module (MPa) à 15°C et 10 Hz	E ₆ (10 ⁻⁶) à 10°C et 25 Hz	Paramètre de fatigue β	S_N
2	9000	80	11 000	90	5	0,3
3	9000	90	11 000	100	5	0,3
4	11 000	100	14000	115	5	0,3

Tableau 17: Performances mécaniques des graves bitumes.

La sensibilité du matériau aux températures s'exprime au travers de l'évolution de son module.

À défaut de mesures en laboratoire spécifiques au matériau mis en œuvre, le tableau 18 fournit de façon indicative le rapport $R(\theta, f) = \frac{E(\theta, f)}{E(15^{\circ}\text{C}, 10 \text{ Hz})}$ pour θ = -10, 0, 10, 20, 30 et 40°C et f = 10, 3 et 1 Hz, correspondant respectivement à des vitesses de 100, 30 et 10 km/h.

Ce rapport *R* pour des fréquences ou températures autres que celles indiquées dans le tableau peuvent être estimées par interpolations linéaires entre deux valeurs.

Température θ (°C)		-10	0	10	20	30	40
$R(A 10 H_{\tau})$	EB-GB 2/3	2,53	2,03	1,32	0,68	0,30	0,11
К(0,10 П2)	EB-GB 4	2,27	1,82	1,3	0,70	0,32	0,11
$\mathbf{D}(0,2,\mathbf{H}_{-})$	EB-GB 2/3	2,37	1,86	1,13	0,53	0,20	0,07
R(0,5 114)	EB-GB 4	2,13	1,66	1,11	0,54	0,22	0,07
R(0,1 Hz)	EB-GB 2/3	2,23	1,71	0,98	0,42	0,14	0,04
	EB-GB 4	2,00	1,53	0,97	0,43	0,15	0,04

Tableau 18: Sensibilité du module des graves bitumes aux variations de température et de fréquence.

Les courbes de susceptibilités du module à la température et à la fréquence sont données en annexe E.

6.3. Les enrobés à module élevé

Les enrobés à module élevé sont définis dans la norme NF EN 13108-1 [33].

Les matériaux EB-EME de classe 1 ne sont pas utilisés en chaussées aéronautiques.

Dans des zones soumises à de longues périodes de froid intense, il est conseillé de réaliser une étude spécifique pour valider l'utilisation des EB-EME 2 en raison de leur rigidité importante et des risques de fissuration associés.

6.3.1. Mise en œuvre

Les épaisseurs recommandées pour les matériaux de type EB-EME, définies dans le GAN [3], sont de :

- ▶ 6 à 8 cm pour l'EB10-EME pour une épaisseur minimale en tout point de 5 cm,
- > 7 à 13 cm pour l'EB14-EME pour une épaisseur minimale en tout point de 6 cm,
- > 9 à 15 cm pour l'EB20-EME pour une épaisseur minimale en tout point de 8 cm

6.3.2. Performances mécaniques

Les caractéristiques minimales à retenir pour les enrobés à module élevé sont récapitulées dans le tableau 19.

	Valeurs minimales conventionnelles		Valeurs n	naximales		
Classe	Module (MPa) à 15°C et 10 Hz	E ₆ (10 ⁻⁶) à 10°C et 25 Hz	Module (MPa) à 15°C et 10 Hz	ε ₆ (10 ⁻⁶) à 10°C et 25 Hz	Paramètre de fatigue β	S_N
2	14000	130	17000	145	5	0,25

Tableau 19: Performances mécaniques des enrobés à module élevé.

La sensibilité du matériau aux températures s'exprime au travers de l'évolution de son module.

À défaut de mesures en laboratoire spécifiques au matériau mis en œuvre, le tableau 20 fournit de façon indicative le rapport $R(\theta, f) = \frac{E(\theta, f)}{E(15^{\circ}\text{C}, 10 \text{ Hz})}$ pour θ = -10, 0, 10, 20, 30 et 40°C et f = 10, 3 et 1 Hz, correspondant respectivement à des vitesses de 100, 30 et 10 km/h.

Ce rapport *R* pour des fréquences ou températures autres que celles indiquées dans le tableau peuvent être estimées par interpolations linéaires entre deux valeurs.

Température θ (°C)	-10	0	10	20	30	40
R(0,10 Hz)	2,14	1,71	1,21	0,79	0,43	0,21
R(3 Hz)	2,00	1,57	1,04	0,61	0,29	0,13
R(1 Hz)	1,89	1,44	0,90	0,49	0,20	0,08

Tableau 20: Sensibilité du module des enrobés à module élevé aux variations de température et de fréquence.

Les courbes de susceptibilités du module à la température et à la fréquence sont données en annexe E.

6.4. Les divers bétons bitumineux et autres enrobés à chaud normalisés

Ce paragraphe regroupe différentes techniques d'enrobés bitumineux à chaud utilisables en couche de roulement ou en couche de liaison.

Ces produits sont définis dans la norme NF EN 13108-1 [33] hormis les bétons bitumineux très minces (BBTM) qui font l'objet de la norme NF EN 13108-2 [34].

6.4.1. Mise en œuvre

Les épaisseurs nominales pour les bétons bitumineux et autres enrobés à chaud normalisés, définies dans le GAN [3], sont indiquées dans le tableau 21.

Matériau	Granularité	Épaisseur moyenne (cm)	Épaisseur minimale en tout points* (cm)
BB aéronautique EB-BBA	0/10C 0/14C 0/10D 0/14D	6 à 7 7 à 9 4 à 5 5 à 7	4 5 3 4
BB semi-grenus	0/10	5 à 7	4
EB-BBSG	0/14	6 à 9	5
BB minces	0/10	3 à 4	2,5
EB-BBM	0/14	3,5 à 5	3
BB très minces BBTM	0/6 et 0/10	2 à 3	1,5
BB à module élevé	0/10	5 à 7	4
EB-BBME	0/14	6 à 9	5

* le respect de cette épaisseur minimale peut nécessiter un reprofilage préalable par fraisage ou apport de matériaux, ou bien une épaisseur adaptée, située dans les fourchettes correspondantes.

Tableau 21: Caractéristiques principales de composition des enrobés bitumineux.

6.4.2. Performances mécaniques

Les caractéristiques minimales à retenir pour les enrobés de couche de surface sont récapitulées dans le tableau 22.

		Valeurs minimales conventionnelles		Valeurs n	naximales		
	Classe	Module à 15°C et 10 Hz (MPa)	E ₆ (10 ⁻⁶) à 10°C et 25 Hz	Module à 15°C et 10 Hz (MPa)	ε ₆ (10 ⁻⁶) à 10°C et 25 Hz	Paramètre de fatigue β	S_N
	1	5 500	130	9 000	145	5	0,25
EB-BBA	2	5 500	100	9000	115	5	0,25
	3	7000	100	11 000	115	5	0,25
	1	5 500	100	9000	115	5	0,25
EB-BBSG	2 ou 3	7000	100	11 000	130	5	0,25
	1	9000	100	11 000	115	5	0,25
EB-BBME	2 ou 3	11 000	100	14000	130	5	0,25
EB-BBM	toutes	5 500	sans objet				

Tableau 22: Performances mécaniques des enrobés bitumineux.

La sensibilité du matériau aux températures s'exprime au travers de l'évolution de son module.

À défaut de mesures en laboratoire spécifiques au matériau mis en œuvre, le tableau 23 fournit de façon indicative le rapport $R(\theta, f) = \frac{E(\theta, f)}{E(15^{\circ}\text{C}, 10 \text{ Hz})}$ pour θ = -10, 0, 10, 20, 30 et 40°C et f = 10, 3 et 1 Hz, correspondant respectivement à des vitesses de 100, 30 et 10 km/h.

Ce rapport *R* pour des fréquences ou températures autres que celles indiquées dans le tableau peuvent être estimées par interpolations linéaires entre deux valeurs.

Température θ (°C)		-10	0	10	20	30	40
	EB-BBSG 1 EB-BBA 1/2	2,69	2,18	1,33	0,67	0,24	0,18
R(0,10 Hz)	EB-BBSG 2/3 EB-BBA 3	2,29	1,93	1,33	0,67	0,26	0,14
	EB-BBME 1	1,92	1,71	1,33	0,67	0,33	0,21
	EB-BBME 2/3	1,77	1,65	1,33	0,67	0,35	0,21
	EB-BBSG 1 EB-BBA 1/2	2,52	1,99	1,14	0,52	0,16	0,11
R(0,3 Hz)	EB-BBSG 2/3 EB-BBA 3	2,14	1,76	1,14	0,52	0,17	0,09
	EB-BBME 1	1,80	1,56	1,14	0,52	0,23	0,13
	EB-BBME 2/3	1,66	1,51	1,14	0,52	0,23	0,13
	EB-BBSG 1 EB-BBA 1/2	2,37	1,84	0,99	0,41	0,11	0,07
R(A 1 H7)	EB-BBSG 2/3 EB-BBA 3	2,01	1,63	0,99	0,41	0,15	0,08
	EB-BBME 1	1,69	1,44	0,99	0,41	0,16	0,08
	EB-BBME 2/3	1,56	1,39	0,99	0,41	0,16	0,08

Tableau 23: Sensibilité du module de divers bétons bitumineux aux variations de température et de fréquence.

Avertissement : La susceptibilité thermique et fréquentielle du matériau EB-BBME est déduite de celle du matériau EB-BBSG par homothétie. Ceci constitue une approximation étant donné que cette caractéristique pour le EB-BBME n'est pas répertoriée.

Les courbes de susceptibilités du module à la température et à la fréquence sont données en annexe E.

6.5. Matériaux bitumineux tièdes

Les enrobés tièdes sont des mélanges hydrocarbonés fabriqués à des températures inférieures à celles des enrobés à chaud. Ces températures sont comprises entre 90 et 130°C.

Ces produits sont couverts par la série des normes NF EN 13 108 [17], de la même manière que les produits à chaud.

6.6. Enrobés percolés

Cette technique consiste à percoler un coulis de ciment à l'intérieur d'un enrobé bitumineux très ouvert (pourcentage de vides de 15 à 25 %) reposant sur un support à haut module de rigidité. Les enrobés percolés sont des produits d'entreprise qui ne font l'objet d'aucune normalisation.

6.7. Les graves non traitées

Ce paragraphe traite des matériaux à mettre en œuvre en couche de fondation, voire en couche de base pour les faibles trafics, si les conditions nécessaires sont satisfaites (RseR<10 t et aéronefs du groupe 1 et 2 uniquement). La norme NF EN 13-285 [18] réunit sous l'appellation de graves non traitées les divers mélanges de granulats et d'eau sans liant.

6.7.1. Description faite par la norme

La norme NF EN 13-285 [18] désigne sous l'appellation de graves non traitées des mélanges de granulats et d'eau, sans liant, de granularité 0/14 à 0/63 mm.

La norme distingue deux types de GNT suivant leur mode d'élaboration et suivant certaines de leurs caractéristiques :

Ies GNT de type "A" obtenues en une seule fraction granulaire, dont la compacité à l'OPM est égale ou supérieure à 80% lorsque le diamètre des plus gros granulats (D) est inférieur ou égal à 31,5 mm,

▶ les GNT de type "B" provenant d'au moins deux fractions granulaires distinctes dans des proportions définies. Elles sont recomposées, malaxées, et humidifiées en centrale (appellation traditionnelle GRH: grave reconstituée humidifiée).

6.7.2. Spécifications se rapportant aux constituants

Les granulats utilisés pour les graves non traitées doivent être conformes aux catégories choisies dans la norme NF EN 13-242 [26].

Ilean	Caractéristiques minimales	Classes de trafic					
Usage selon NF P 18-5	seion Nr P 18-545 [25]	CT1	CT2	СТЗ	CT4	CT5	
	Granularité	0/20 - 0/31,5	0/20 - 0/31,5	0/20 - 0/31,5	0/20 - 0/31,5	0/20 - 0/31,5	
	<i>Résistance</i> <i>mécanique des gravillons</i>	Code E	Code E	Code D/C*	Code C	Code C	
Couche de fondation	Caractéristiques de fabrication des gravillons	Code IV	Code IV	Code III	Code III	Code III	
jonaalion	Caractéristiques de fabrication des sables	Code c	Code c	Code b	Code b	Code b	
	Angularité des gravillons	Ang 4	Ang 4	Ang 3/ Ang 2 *	Ang 2	Ang 2	

* Si les aéronefs des groupes 4 ou 5 sont accueillis avec un trafic supérieur à 1 mouvement par jour, on considérera:

- un code C pour la résistance mécanique des gravillons

Ang 2 pour l'angularité des gravillons

Tableau 24: Caractéristiques minimales des granulats constituant les graves non traitées.

Les caractéristiques minimales à retenir en fonction des classes de trafic pour les granulats constituant les GNT sont rappelées dans le tableau 24 ci-dessus :

6.7.3. Spécifications se rapportant aux mélanges

La granularité des GNT utilisées en couche de fondation correspondent à des valeurs nominales D de 20 ou 31,5 mm.

Des fuseaux de spécification sont définis pour chacune de ces valeurs de D (GNT de classe 2 pour GNT 0/31,5 et GNT de classe 3 pour GNT 0/20 selon la norme NF EN 13-285 [18]).

Dans le cas où les GNT mises en œuvre risquent d'être exposées au gel, on doit s'assurer :

• de préférence, de la sensibilité au gel du mélange appréciée, en laboratoire, par l'essai de gonflement au gel (NF P 98-234-2 [24]),

• de la résistance au gel des granulats (spécifiée dans la norme NF P 18-545 [25]).

6.7.4. Mise en œuvre

Les GNT utilisées en couches de fondation des chaussées aéronautiques sont de type B. La compacité de ces GNT doit respecter une valeur minimale à l'OPM de 82%, leur teneur en eau de mise en œuvre étant généralement comprise dans l'intervalle w_{OPM} -1% à w_{OPM} +0,5%.

Les autres types de GNT (type A ou type B avec une compacité à l'OPM supérieure ou égale à 80%) sont à réserver pour une utilisation sous les accotements ou en couches d'assise des chaussées légères.

Pour un compactage convenable, l'épaisseur minimale de GNT est de 10 cm pour une 0/20 et de 15 cm pour une 0/31,5; l'épaisseur de GNT compactée en une seule couche peut atteindre 35 cm au maximum.

6.7.5. Spécifications sur les performances mécaniques

Les matériaux granulaires ont un comportement non-linéaire. Les caractéristiques mécaniques affectées à ces couches dans un calcul de dimensionnement devraient donc en toute rigueur dépendre de la structure (épaisseur et rigidité des couches liées, portance du support).

L'essai triaxial à chargements répétés (TCR) décrit dans la norme NF EN 13 286-7 [35] peut être utilisé pour déterminer les performances mécaniques des GNT. L'essai TCR est actuellement le seul essai permettant de caractériser le comportement des GNT sous des conditions proches de celles existant dans la chaussée (éprouvettes représentatives des caractéristiques en place, chargements cycliques). Il permet de déterminer à la fois le module des GNT (comportement quasi réversible) et leur résistance aux déformations permanentes.

Des essais, pratiqués sur des éprouvettes à une teneur en eau représentative des conditions hydriques les plus défavorables attendues pour la couche de chaussée, permettent de déterminer des valeurs de E et v cohérentes avec le niveau de contrainte régnant dans la couche de grave non traitée. Ces données sont nécessaires aux calculs des sollicitations dans la structure.

En annexe, la norme NF EN 13286-7 [35] propose un classement des graves non traitées en trois classes de performances mécaniques C1 à C3, basées sur deux paramètres issus de l'essai:

• une valeur de module d'élasticité caractéristique E_c obtenue pour un chargement cyclique sous une contrainte moyenne p = 250 kPa et une contrainte déviatorique q = 500 kPa,

• une valeur de déformation permanente axiale caractéristique \mathcal{E}_{I}^{c} obtenue pour un chargement normalisé.

Les GNT de classe mécanique C3 ne sont pas utilisables en structure de chaussées aéronautiques.

Compte tenu des connaissances actuelles, la méthode de dimensionnement adopte une description très simplifiée du comportement de ces matériaux en retenant un modèle élastique linéaire.

Ainsi, à défaut de résultats d'essais triaxiaux, et dans l'attente d'une démarche unifiée pour la détermination des valeurs à affecter au module Young des GNT, le tableau 25 fournit les valeurs retenues en pratique.

Couche de fondation	$E_{GNT} \{1\} = k.E_{plate-forme support}$ $E_{GNT} \{sous-couche i\} = k.E_{GNT} \{sous-couche (i-1)\}$ k variant selon la catégorie de la GNT				
	Catégorie	1	2		
(GNT subdivisée en sous-couches de 0,25 m d'épaisseur)	k 3 2,5				
ue 0,25 m u epuisseur)	<i>E_{GNT} borné par : 600 MPa pour une GNT de catégorie 1</i> 400 MPa pour une GNT de catégorie 2				



Nota : les variations de valeurs de module sur l'épaisseur totale de la GNT rendent compte de leur caractère non-linéaire durcissant (module croissant avec l'intensité de la contrainte moyenne) et de l'efficacité du compactage accrue au fur et à mesure de la mise en œuvre de la couche de fondation.

Remarque: À noter que la distinction doit être faite entre catégorie de GNT (1 ou 2) se référant aux paramètres de dimensionnement, et classe de GNT (de 1 à 6) définies par la norme NF EN 13-285 [18] qui est liée à la granularité du mélange.

Les GNT de catégorie 1 sont utilisées pour les classes de trafic CT3, CT4 et CT5 et les GNT de catégorie 2 sont utilisées pour les classes de trafic CT1 et CT2.

Le tableau 24 fournit les caractéristiques minimales à retenir pour les granulats constituant les GNT en fonction des classes de trafic.

7. Vérification au gel-dégel

Lorsque l'isotherme 0°C atteint le sol support et que celui-ci est sensible au gel, l'eau environnante est pompée par cryosuccion vers le front de gel et constitue des lentilles de glace qui provoquent des gonflements pendant la période de gel et s'opposent à l'évacuation de l'eau au moment du dégel. Dans cet état de quasi-saturation, le risque d'une chute significative de portance devient important et nécessite donc une étude de vérification du comportement au gel de la structure de chaussée.

Après avoir défini les notions relatives aux niveaux de protection et à la caractérisation de la gélivité d'un sol, ce chapitre expose le principe de vérification au gel-dégel. Cette dernière doit être considérée comme une étape à part entière du processus de dimensionnement.

7.1. Les niveaux de protection

La caractérisation de la rigueur d'une période hivernale pour laquelle une structure de chaussée doit être protégée est fournie par l'indice de gel atmosphérique *I*, qui est en pratique référencé pour deux situations :

- ▶ l'hiver exceptionnel, noté HE, qui est l'hiver le plus rigoureux rencontré entre 1951 et 1997,
- et l'hiver rigoureux non exceptionnel, noté HRNE, défini comme étant l'hiver décennal sur la période 1951-1997.

Nota: ces valeurs caractérisent la station météorologique elle-même et ne sont pas toujours représentatives de l'ensemble d'un département. Ainsi, pour déterminer l'indice de gel à retenir pour un projet éloigné d'une station météorologique principale, il est conseillé de recueillir les données disponibles auprès des postes climatologiques les plus proches du projet.

La méthode de calcul de l'indice de gel est décrite dans la norme NF P 98-080-1, annexe A [36].

Trois niveaux de protection contre le gel, dépendant de l'importance de l'aérodrome et de la fonction de la chaussée, sont possibles :

▶ **la protection totale** qui est déterminée de façon à ce que la profondeur de gel correspondant à l'hiver rigoureux exceptionnel (HRE) ne puisse atteindre les couches gélives du sol support ou celles de la chaussée s'il se trouvait en exister.

• la protection forte qui est définie sur le même principe que la protection totale, l'hiver rigoureux non exceptionnel (HRNE) se substituant à l'hiver exceptionnel.

• la protection réduite qui, quant à elle, laisse admettre que dans les conditions de l'hiver rigoureux non exceptionnel:

✓ le gel peut légèrement pénétrer dans les couches gélives,

✓ le trafic peut être réduit pendant le dégel.

Sans qu'il dispense de considérer chaque cas comme étant particulier, les distinctions faites par le tableau 26 ci-après peuvent servir de guide à la réflexion.

Trafic annuel de passagers de l'aérodrome	Niveau de protection
Supérieur à 200000	totale
<i>Compris entre 50 000 et 200 000</i>	forte
Inférieur à 50 000	réduite

Tableau 26: Niveau de protection contre le gel.

Selon la profondeur atteinte par le gel et le niveau de protection retenu, les dispositions à adopter sont :

- > soit de remplacer les matériaux gélifs des couches atteintes par le gel par des matériaux non gélifs,
- > soit d'augmenter l'épaisseur des couches supérieures non gélives.

7.2. Caractérisation de la gélivité d'un sol

Pour caractériser la sensibilité au gel des matériaux, ceux-ci peuvent être soumis à l'essai de gonflement (NF P 98-234-2 [24]). Représentatif du phénomène, il consiste à mesurer, à intervalle régulier, l'allongement d'une éprouvette cylindrique du sol à tester maintenue à une température négative sur sa face supérieure et mise à sa base au contact d'une eau distillée.



Figure 19: Éprouvettes après essai de gonflement.

L'essai de gonflement met en évidence la relation sensiblement linéaire reliant l'allongement de l'éprouvette à ce que l'on désigne comme étant la quantité de gel qui lui est transmise et dont la valeur est à chaque instant égale à la racine carrée du produit de la température négative maintenue en partie supérieure de l'éprouvette par le temps écoulé d'exposition au gel de celle-ci.

Cette relation permet de classer un sol ou un matériau granulaire testé en fonction de la pente p de sa courbe représentative, exprimée en $mm/(°C.heure)^{\frac{1}{2}}$. Ainsi, il est défini que:

- les matériaux sont non gélifs (SGn), lorsque $p \le 0.05$,
- les matériaux sont peu gélifs (SGp), lorsque 0,05 < $p \le 0,40$,
- Ies matériaux sont très gélifs (SGt), lorsque p > 0,40.

7.3. Le principe de la vérification au gel-dégel

L'indice de gel atmosphérique *I* caractérisant, selon le cas choisi, l'hiver rigoureux exceptionnel ou rigoureux non exceptionnel statistiquement connu pour le site de l'aérodrome, il convient de vérifier que, déterminé pour ne transmettre à son sol support que des contraintes mécaniques admissibles, le corps de chaussée protège celui-ci de manière suffisante contre le gel.

La démarche consiste, dans un premier temps, à traduire cet indice de gel en quantité de gel Q_s transmise à la surface de la chaussée, puis à vérifier que la protection thermique apportée par le corps de chaussée ne laisse transmettre à la plate-forme de chaussée qu'une quantité de gel Q_t inférieure à la valeur admissible Q_{PF} à ce niveau.
7.4. Sensibilité au gel de la plate-forme de chaussée

Le corps de chaussée devant être constitué de matériaux non gélifs, le sol situé sous le niveau de plateforme de chaussée est découpé, à partir de ses couches gélives, en tranches telles que leur sensibilité au gel ne puisse aller qu'en croissant avec la profondeur. Ceci revient à dire que toute couche de sol se voit affecter la sensibilité au gel de la couche la plus gélive située au-dessus d'elle, si le cas se présente.

7.4.1. Quantité de gel admissible en surface des couches gélives situées sous la plateforme de chaussée.

Dans le cas d'une **protection totale ou forte**, la quantité de gel Q_g admissible en surface d'une couche gélive est nulle.

L'examen des courbes de nombreux essais de gonflement a permis de déterminer les quantités de gel admissibles, correspondant à un gonflement limité à 5 mm, pour une **protection réduite**, en surface d'une couche gélive. Exprimées non plus en (°C.heure)^{1/2} mais en (°C.jour)^{1/2}, ces quantités limites sont, selon la sensibilité au gel de la couche gélive considérée, retenues comme étant égales à:

$$Q_{g} = \begin{cases} 4 & si & 0.05 1 \end{cases} \quad avec \ p \ en \ mm \ / \ (^{\circ}C. \ jour)^{1/2}$$

La formule ci-dessus est directement applicable lorsqu'**une seule couche gélive** est située sous la plateforme (une seule susceptibilité thermique à prendre en compte).

Dans le cas d'une **protection réduite** où **plusieurs couches gélives** ayant des susceptibilités thermiques différentes se superposent, le principe suivant s'applique:

▶ si la première couche de matériau gélif sous la plate-forme a une **épaisseur inférieure à 20 cm**, la quantité de gel admissible en surface de cette couche est reconnue comme pouvant être égale à:

$$Q_g = Q_{g2} + (Q_{g1} - Q_{g2}) \times \frac{h_1}{20}$$

avec Q_{g1} = quantité de gel admissible de la première couche de matériaux gélifs (couche supérieure),

 Q_{g2} = quantité de gel admissible de la seconde couche de matériaux gélifs (couche inférieure),

 $(Q_{g1} \text{ et } Q_{g2} \text{ étant définies conformément aux règles ci-avant}),$

h₁ = épaisseur en centimètres de la couche supérieure de matériaux gélifs.

si la première couche de matériau gélif a une épaisseur supérieure ou égale à 20 cm, la quantité de gel admissible en surface de cette couche est:

$$Q_g = Q_{g1}$$

7.4.2. Protection thermique apportée par les matériaux non gélifs situés sous la plateforme de chaussée.

La protection thermique Q_{ngr} apportée par les matériaux non gélifs de la couche de forme et du sol support situés au-dessus de la première couche gélive de ce dernier est donnée par la formule:

$$Q_{ng} = \frac{A_n \times h_n^2}{h_n + 10}$$

dans laquelle:

- h_n est l'épaisseur en centimètres de la tranche supérieure de sol non gélif,
- A_n est un coefficient dépendant de la nature du matériau, dont la valeur est donnée par le tableau 27 ci-après :

	Non traités		Traités				
Matériaux	GNT et matériaux insensibles à l'eau dont le passant à 80 µm est ≤ à 3%	(CI) AI – A2 – A3 traités à la chaux et au liant hydraulique	(C1) B2 à B6 traités au liant hydraulique (avec ou sans chaux)	Cendres Volantes			
A_n (°C.jour) ^½ cm ⁻¹	0,12	0,14	0,13	0,17			

A – B – C – D: classes de matériaux définies par la norme NF P 11-300 GNT: graves non traitées définies par les normes NF P 18-545 [25] et NF EN 13-285 [18]

Tableau 27: Valeurs de A_n en fonction de la nature du matériau de la couche de forme.

7.4.3. Quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme de chaussée.

La quantité de gel Q_{PF} tenue pour admissible au niveau de la plate-forme de chaussée est déduite des termes précédents par la relation:

$$Q_{PF} = Q_{ng} + Q_g$$

7.5. Protection thermique apportée par la structure de la chaussée

7.5.1. Quantité de gel transmise à la surface de la chaussée.

En altitude moyenne, avec un ensoleillement faible à moyen et un indice de gel atmosphérique I ne dépassant pas 210°C. jour, les phénomènes de convection et de rayonnement en surface de chaussée étant pris en compte, on admet que la quantité de gel Q_s transmise à la surface de la chaussée est fournie par la formule:

$$Q_s = \sqrt{0,7 \times (I-10)}$$

Pour les autres cas (gel très rigoureux, ensoleillement important), une étude particulière est nécessaire.

7.5.2. Quantité de gel transmise au niveau de la plate-forme de chaussée.

La quantité de gel Q_t transmise à la plate-forme, protégée par le corps de chaussée d'épaisseur h, peut être déterminée, de deux manières :

avec une méthode simplifiée,

avec une méthode de propagation unidimensionnelle de la chaleur (modèle de Fourier en milieu biphasique).
 Selon la méthode simplifiée,

$$Q_s = (1 + a \times h) \times Q_t + b \times h$$
, d'où $Q_t = \frac{Q_s - b \times h}{1 + a \times h}$

où a et b sont des coefficients caractéristiques des matériaux constituant les différentes couches du corps de chaussée, s'obtenant à partir des expressions:

 $h = \sum h_i$, avec h_i épaisseur de la couche *i* exprimée en cm.

 $a = \frac{1}{h} \sum (a_i \times h_i)$, $b = \frac{1}{h} \sum (b_i \times h_i)$, avec a_i et b_i en (°C.jour)^{1/2} cm⁻¹ dont les valeurs sont indiquées dans le tableau 28.

	a _i	b _i
Matériaux bitumineux	0,008	0,06
Matériaux granulaires	0,008	0,10

Tableau 28: Valeurs de a_i et b_i en (°C.jour)^½cm⁻¹.

7.6. Comparaison de Q_t et Q_{PF}

La méthode consiste à comparer la quantité de gel Q_t transmise au niveau de la plate-forme de chaussée à la quantité de gel Q_{PF} admissible au niveau de celle-ci. La condition à satisfaire est:

- pour une protection totale: $Q_t(I_{HRE}) < Q_{ng}$
- pour une protection forte: $Q_t(I_{\text{HRNE}}) < Q_{ng}$
- ▶ pour une protection réduite: $Q_t(I_{\text{HRNE}}) < Q_{ng} + Q_g$

Des approximations étant effectuées sur les formules de calcul de la protection du gel pour l'approche simplifiée, les conclusions de la procédure de vérification au gel présentée ici ne peuvent être retenues que si elles indiquent que la structure de chaussée définie sur les seuls critères de dimensionnement mécaniques présente une protection thermique suffisante. Si la conclusion ne permet pas de statuer dans ce sens, il faut dans ce cas utiliser la méthode de propagation unidimensionnelle de la chaleur (utilisation d'un logiciel de type différences finies ou éléments finis) dont le principe est décrit dans l'annexe J de la norme NF P 98-086 [2]. Si ce calcul confirme l'insuffisance de la protection thermique, il y a lieu d'adapter les épaisseurs de matériaux non gélifs.

Un exemple de vérification au gel-dégel est présenté au chapitre 8.

8. Exemples d'application

Ce chapitre a pour but d'illustrer la méthode décrite dans ce guide à travers quelques exemples de calcul. Trois cas de dimensionnement mécanique de chaussée souple neuve sont traités, avec des paramètres d'entrée (type de section, trafic, climat,...) variés. D'autre part, un exemple de vérification au gel-dégel est aussi présenté.

Au préalable, un exemple de calcul est traité de manière détaillée et permet d'illustrer pas à pas les différentes étapes de calcul du dommage décrites au paragraphe 2.4. En pratique, l'enchaînement de ces calculs pourra être réalisé en recourant à un logiciel dédié.

8.1. Exemple détaillé de calcul du dommage

8.1.1. Description de l'exemple

Pour cet exemple, on considère une structure prédéfinie constituée de 6 cm de EB-BBA 3 + 12 cm de EB-GB 3 + 47 cm de GNT de catégorie 1 (au sens du dimensionnement) sur une PF2 (50 MPa). Le choix de cette structure constitue la phase de pré-dimensionnement. En fonction des résultats de calcul du dommage pour le trafic considéré, des calculs itératifs sur les épaisseurs pourraient être nécessaires afin d'optimiser la structure si l'endommagement total est très inférieur à 1 (diminution des épaisseurs) ou si l'endommagement est supérieur à 1 (augmentation des épaisseurs).

Pour cet exemple, il est proposé de calculer l'endommagement total (sur une période de calcul de 10 ans) par fatigue du matériau EB-GB 3, ce calcul reposant sur l'évaluation des déformations en traction à la base de ce matériau. La détermination du dommage au sommet du sol suit le même principe de calcul, en considérant les déformations verticales à ce niveau.



Figure 20: Coupe de la structure de chaussée considérée.

Le trafic est composé du seul aéronef Airbus A330-200 avec 1 décollage par jour, soit un mouvement par jour à Mrw = 233,9 t. La structure considérée est classée en section circulée à vitesse modérée, on a donc V = 30 km/h pour le calcul, correspondant à une fréquence de sollicitation de 3 Hz, et l'écart type de la loi de balayage $S_{bal} = 0,5$ m. Le risque de calcul retenu est de 2,5 %, l'aéronef étant du groupe 5 au sens du GAN [3], et la classe de trafic associée étant égale à CT4. La température équivalente est, quant à elle, prise égale à 15°C (France métropolitaine).

8.1.2. Données associées

Conformément aux règles définies dans le chapitre 6 (tableau 25), la GNT est subdivisée en deux couches, une de 25 cm dont le module est pris égal à E_{GNT} {1} = 150 MPa (correspondant à 3* E_{PF} soit 3*50) et l'autre de 22 cm dont le module est pris égal à E_{GNT} {2} = 450 MPa (correspondant à 3* E_{GNT} {1} soit 3*150).

Les caractéristiques des matériaux bitumineux nécessaires au calcul sont indiquées au chapitre 6 dans les tableaux 17, 18, 22 et 23. Le tableau 29 ci-dessous indique les valeurs des modules à 15°C/10 Hz ainsi que les valeurs à 15°C/3 Hz correspondant aux paramètres de dimensionnement retenus.

Matériau	Module à 15°C/10 Hz	R(15°C, 3 Hz)	Module à 15°C/3 Hz
BBA3	7000	0,83	5810
GB3	9000	0,83	7470

Tableau 29: Valeurs des modules des matériaux bitumineux.

8.1.3. Calculs préliminaires

8.1.3.1. Coefficient *K* lié au critère de fatigue du matériau EB-GB 3

Pour les matériaux bitumineux, le coefficient *K* s'écrit de la manière suivante :

$$K = 10^{\aleph_{\beta}} k_{\theta f} k_s k_r k_c \,\overline{\varepsilon}_6$$

c /

Les valeurs standards associées au matériau EB-GB 3 conduisent à prendre :

$$\beta = 5 \text{ et } \overline{\varepsilon}_6 = 90 \,\mu def$$

$$k_{\theta f} = \sqrt{\frac{E(10^{\circ}C, 10Hz)}{E(\theta_{eq}, f)}} = \sqrt{\frac{E(10^{\circ}C, 10Hz)}{E(15^{\circ}C, 3Hz)}} = \sqrt{\frac{R(10^{\circ}C, 10Hz) \times E(15^{\circ}C, 10Hz)}{R(15^{\circ}C, 3Hz) \times E(15^{\circ}C, 10Hz)}} = \sqrt{\frac{R(10^{\circ}C, 10Hz)}{R(15^{\circ}C, 3Hz)}} = \sqrt{\frac{R(10^{\circ}C, 10Hz)}{R(15^{\circ}C, 10Hz)}} = \sqrt{\frac{R(10^{\circ}C, 10Hz$$

Les valeurs de R étant données dans le tableau 18, on a donc $k_{\theta f} = \sqrt{\frac{1,32}{0,83}} = 1,26$

Le module de la couche de matériaux non liés sous la couche de EB-GB 3 est supérieur à 120 MPa, on a donc le coefficient k_s = 1 (tableau 3).

Pour le calcul de k_r :

• Un risque de 2,5 % correspond à la valeur de
$$u = -1,960$$
.
• $b = \frac{-1}{\beta} = -0,2$
• $S_N = 0,3$ pour EB-GB 3
• $S_h = 0,016m$ pour 12 cm de EG-GB 3
• $c = 2m^{-1}$
• $b = \sqrt{S_N^2 + \left(\frac{cS_h}{b}\right)^2} = 0,340$
• $k_r = 10^{-ub\delta} = 0,736$

Pour le calcul de k_c :

Par définition, le coefficient de calage kc est fonction de l'agressivité du trafic, elle même caractérisée par la RseR (voir définition de la RseR §2.6). Cependant, la valeur de la RseR résulte d'un calcul d'endommagement pour une valeur de kc préalablement fixée. La détermination de kc nécessite donc de recourir au processus itératif suivant :

1) un calcul d'endommagement est effectué pour une valeur de kc (valeur initiale égale à 1,3 par exemple),

- 2) la valeur de RseR correspondant à cet endommagement est calculée,
- 3) la valeur de kc actualisée est déterminée à l'aide de la relation kc=f(RseR) (figure 21).



Evolution du coefficient kc

Figure 21: Détermination du coefficient k_c à partir de la RseR.

Ces étapes sont réitérées avec cette valeur actualisée de kc, et le processus est mené jusqu'à la convergence du paramètre kc.

Pour cet exemple, le détail des calculs n'est pas explicité, la valeur de RseR étant déterminée à partir d'un logiciel de calcul respectant les principes énoncés dans ce guide. On obtient alors RseR = 17,06 t. L'utilisation de la figure 21 permet de déterminer la valeur de kc, ici égale a 1,63.

On obtient finalement : K = 10^{6/5} ×1,26×1×0,736×1,63×90 = 2 156

8.1.3.2. Champs de déformation à la base de la couche de grave bitume

L'évaluation du dommage en fatigue dans la couche de grave bitume débute par le calcul des champs de déformations (réversibles) \mathcal{E}_{xx} , \mathcal{E}_{yy} , \mathcal{E}_{x} et $\mathcal{E}_{t max}$ à la base de cette couche (z = 0,18 m), sous le passage de l'aéronef considéré. Ce calcul s'effectue ici par application du modèle de Burmister.

Comme indiqué au paragraphe 2.4, on considère pour ceci une grille de points (x_i, y_j) avec x = axe longitudinal, y = axe transversal de la piste, située à la cote z = 0,18 m permettant de discrétiser les calculs. En supposant l'aéronef centré sur l'axe y = 0, les calculs peuvent être effectués en général par symétrie sur la demi-grille $y \ge 0^{10}$.

La figure 22 montre la configuration des atterrisseurs de l'Airbus A330-200 centré sur l'axe de la piste ainsi que l'atterrisseur considéré pour le calcul.



Figure 22: Configuration des atterrisseurs de l'Airbus A330-200 et sélection d'un atterrisseur pour le calcul sans balayage.

¹⁰ Les interactions entre atterrisseurs symétriques peuvent être suivant le cas négligées (atterrisseurs distants) ou prises en compte par les techniques ad' hoc de calcul avec symétrie.

Les cartes de déformation \mathcal{E}_{xx} , \mathcal{E}_{yy} , \mathcal{E}_{xy} ainsi que la déformation d'extension maximale $\mathcal{E}_{t \max}^{11}$ obtenues à la base de la couche de grave bitume sont présentées sur la figure 23.



Figure 23: Cartes des déformations E_{xx} , E_{yy} , E_{xy} et $E_{t max}$ à la base de la grave bitume.

Nota: les coordonnées sur ces figures sont exprimées dans un repère local lié à la grille de calcul.

Dans le cas présent, le bassin de déformations ne s'étendant pas jusqu'à l'axe de la piste (axe longitudinal), l'interaction des atterrisseurs droit et gauche de l'aéronef s'avère négligeable.

$$\varepsilon_{t \max} = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + 4\varepsilon_{xy}^2}}{2}$$

8.1.4. Calcul du profil transversal de dommage sans balayage

Le calcul du profil transversal de dommage $\Delta D(y, z_k)$ associé à chaque passage d'aéronef est effectué dans un premier temps sans prendre en compte le phénomène de balayage.

On peut alors utiliser directement en entrée de ce calcul la carte de déformation \mathcal{E}_{tmax} obtenue précédemment.

Illustrons ici le calcul de dommage pour un point du profil transversal situé à une position y_j = 4,65 m, correspondant à l'axe longitudinal des roues intérieures de l'atterrisseur principal (repéré par la ligne rouge de la figure 24); il est à noter que la même opération est à répéter en tout point de la grille de calcul suivant l'axe y.



Figure 24: Repérage de la position transversale (ligne rouge) pour le calcul du dommage sans balayage.

Afin de considérer l'historique des déformations subi en un point de la grille de calcul pour lequel y_j = 4,65 m, il est nécessaire de connaître le profil longitudinal de déformations afin d'appliquer l'intégration continue de la loi de Miner (formule simplifiée pour le calcul manuel).

Le profil longitudinal ainsi considéré (y_j = 4,65 m et z_k = 0,18 m), extrait de la carte de déformation $\mathcal{E}_{t max}$, est représenté sur la figure 25.



Figure 25 : Historique de déformation en traction à la base de la grave bitume pour y_i = 4,65m.

Le calcul de dommage créé par un passage d'A330-200 s'obtient alors à partir de l'expression intégrale du postulat de Miner. Ce calcul peut être effectué numériquement ou de façon analytique en prenant en compte les valeurs aux pics et aux creux du signal de déformation (cf. paragraphe 2.5.3). On obtient ici:

$$\Delta D(y_j = 4,65m, z_k = 0,18m) = \frac{1}{K^{\beta}} (\varepsilon_{pic}^{\beta} - \varepsilon_{creax}^{\beta} + \varepsilon_{pic}^{\beta}) = \frac{1}{2156^5} (389,0^5 - 82,0^5 + 389,0^5) = 3,822 \times 10^{-4}$$

Le dommage cumulé sur l'ensemble du trafic se déduit par l'application de la loi de cumul de Miner. Comme le trafic est composé ici d'un seul aéronef, le dommage cumulé est égal à la valeur de dommage précédente multipliée par le nombre de mouvements cumulés sur la période de calcul :

$$\Delta D_{cumulé}(y_i = 4,65m) = \Delta D(y_i = 4,65m) \times 1mvts / j \times 365 j \times 10ans = 1,40$$

Les résultats de ces calculs effectués pour chaque position transversale y_j de la grille de calcul sont répertoriés dans le tableau 30 ci-dessous, et le profil transversal de dommage cumulé sans balayage est représenté figure 26.

у _ј (т)	E _{pic} (μdef)	E _{creux} (μdef)	ΔD	ΔD _{cumulé}		У _ј (т)	Ε _{pic} (µdef)	E _{creux} (μdef)	ДD	∆D _{cumulé}
4	100.9	3.6	4.49E-07	0.00		5.4	167.3	39.0	5.62E-06	0.02
4.05	115.5	10.8	8.83E-07	0.00		5.45	173.0	41.4	6.66E-06	0.02
4.1	132.8	17.4	1.77E-06	0.01		5.5	182.5	44.3	8.68E-06	0.03
4.15	152.7	24.1	3.56E-06	0.01		5.55	195.8	47.3	1.23E-05	0.05
4.2	175.6	31.8	7.17E-06	0.03		5.6	213.4	50.9	1.90E-05	0.07
4.25	202.3	41.2	1.45E-05	0.05		5.65	235.5	55.9	3.11E-05	0.11
4.3	233.1	50.2	2.95E-05	0.11		5.7	261.9	61.9	5.29E-05	0.19
4.35	267.4	56.5	5.87E-05	0.21		5.75	291.5	67.3	9.04E-05	0.33
4.4	302.1	62.1	1.08E-04	0.39		5.8	321.3	71.3	1.47E-04	0.54
4.45	333.1	68.4	1.76E-04	0.64		5.85	347.3	74.6	2.17E-04	0.79
4.5	357.3	74.1	2.50E-04	0.91		5.9	367.0	77.8	2.86E-04	1.04
4.55	374.6	78.3	3.17E-04	1.16		5.95	380.2	81.0	3.41E-04	1.24
4.6	385.4	81.2	3.65E-04	1.33		6	387.5	83.0	3.75E-04	1.37
4.65	389.0	82.0	3.82E-04	1.40		6.05	388.6	82.4	3.80E-04	1.39
4.7	385.7	81.3	3.66E-04	1.34		6.1	382.7	7 9.8	3.52E-04	1.29
4.75	376.5	7 9.9	3.25E-04	1.19		6.15	370.0	76.6	2.98E-04	1.09
4.8	361.3	77.4	2.64E-04	0.96		6.2	350.5	72.6	2.27E-04	0.83
4.85	339.5	73.9	1.93E-04	0.71		6.25	324.0	67.5	1.53E-04	0.56
4.9	311.9	70.0	1.27E-04	0.46		6.3	291.4	61.6	9.02E-05	0.33
4.95	281.8	65.2	7.62E-05	0.28		6.35	256.4	54.5	4.76E-05	0.17
5	252.9	59.3	4.44E-05	0.16		6.4	223.1	46.3	2.37E-05	0.09
5.05	227.8	54.3	2.63E-05	0.10		6.45	193.6	38.3	1.17E-05	0.04
5.1	207.2	50.4	1.64E-05	0.06		6.5	168.1	30.7	5.77E-06	0.02
5.15	191.1	46.3	1.09E-05	0.04		6.55	146.3	22.9	2.87E-06	0.01
5.2	179.0	42.7	7.88E-06	0.03		6.6	127.2	15.5	1.43E-06	0.01
5.25	170.8	40.3	6.23E-06	0.02		6.65	110.9	8.4	7.19E-07	0.00
5.3	166.2	38.9	5.44E-06	0.02	-	6.7	97.1	0.9	3.70E-07	0.00
5.35	165.0	38.2	5.25E-06	0.02		-	-	-	-	-

Tableau 30: Valeurs des dommages cumulés le long d'un profil transversal.

Nota: le profil de dommage ci-dessous a été effectué avec un logiciel de calcul pour lequel une meilleure précision est obtenue, d'où la légère différence avec les valeurs calculées « à la main ».



Figure 26: Profil transversal de dommage cumulé sans balayage.

8.1.5. Calcul du profil de dommage avec balayage

Le profil de dommage avec balayage repose à nouveau sur le postulat de Miner relatif à la sommation des dommages. Il se déduit ainsi du profil de dommage sans balayage (symétrisé¹²) et de la « loi de balayage » de l'aéronef considéré. Illustrons le calcul pour un point situé à une distance y_j = 5,35 m de l'axe longitudinal, correspondant à l'entraxe du boggie lorsque l'aéronef est centré sur la piste (figure 27).



Figure 27: Repérage de la position transversale (ligne rouge) pour le calcul du dommage avec balayage.

¹² Profil tenant compte de la présence des deux atterrisseurs, obtenu par symétrisation par rapport à l'axe x du profil calculé pour un seul atterrisseur La distribution latérale du trafic (selon y) est représentée par une loi normale, avec discrétisation des trajectoires $(y_j)_b$ pour $j = 1,..., n_b$ selon un pas $\Delta y = 5$ cm. La figure 28 schématise cette distribution ainsi que la position d'un atterrisseur lorsque l'aéronef est centré d'une part et lorsqu'il circule sur une trajectoire excentrée $(y_i)_b$ d'autre part. Les profils transversaux de dommage correspondants sont aussi représentés.



Figure 28: Schéma explicatif sur la dispersion latérale du trafic.

Pour effectuer le calcul de dommage en un point y_j (y_j = 5,35 m dans le cas traité), il faut considérer la somme des dommages (calculés en ce point) créés par un aéronef circulant sur chacune des trajectoires de la distribution. Il suffit pour cela de translater latéralement le profil de dommage sans balayage, comme indiqué sur la figure 28. Pour une trajectoire (y_j)_b, ceci revient à prendre la valeur du dommage en y_j - (y_j)_b.

Le dommage pour chaque trajectoire est ensuite multiplié par un coefficient $(P_j)_b$ représentant la proportion du trafic circulant sur cette trajectoire (sa valeur est égale à l'aire sous la courbe représentée en bleu). Pour une loi de balayage gaussienne (voir annexe B), on a :

$$(P_j)_b = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{y_1}^{y_2} e^{-y^2/2} dy \text{ avec } y_1 = \frac{(y_j)_b - \frac{\Delta y}{2}}{S_{bal}} \text{ et } y_2 = \frac{(y_j)_b + \frac{\Delta y}{2}}{S_{bal}}.$$

Le nombre de trajectoires de la discrétisation est choisi (pour ce calcul manuel) tel qu'au-delà de ce nombre, les dommages pondérés correspondants deviennent négligeables par rapport au dommage maximal (<2%).

$(v_j)_b$ (m)	$y_j - (y_j)_b (m)$	$\Delta D (y_j - (y_j)_b)$	(P _j) _b	$\Delta D (y_j - (y_j)_b) \ge (P_j)_b$
1	4.35	5.87E-05	0.54%	3.17E-07
0.95	4.4	1.08E-04	0.66%	7.10E-07
0.9	4.45	1.76E-04	0.79%	1.39E-06
0.85	4.5	2.50E-04	0.94%	2.35E-06
0.8	4.55	3.17E-04	1.11%	3.51E-06
0.75	4.6	3.65E-04	1.30%	4.73E-06
0.7	4.65	3.82E-04	1.50%	5.73E-06
0.65	4.7	3.66E-04	1.71%	6.28E-06
0.6	4.75	3.25E-04	1.94%	6.31E-06
0.55	4.8	2.64E-04	2.18%	5.75E-06
0.5	4.85	1.93E-04	2.42%	4.68E-06
0.45	4.9	1.27E-04	2.66%	3.37E-06
0.4	4.95	7.62E-05	2.90%	2.21E-06
0.35	5	4.44E-05	3.12%	1.39E-06
0.3	5.05	2.63E-05	3.33%	8.77E-07
0.25	5.1	1.64E-05	3.52%	5.77E-07
0.2	5.15	1.09E-05	3.68%	4.02E-07
0.15	5.2	7.88E-06	3.81%	3.01E-07
0.1	5.25	6.23E-06	3.91%	2.44E-07
0.05	5.3	5.44E-06	3.97%	2.16E-07
0	5.35	5.25E-06	3.99%	2.09E-07
-0,05	5,4	5,62E-06	3,97%	2,23E-07
-0.1	5.45	6.66E-06	3.91%	2.60E-07
-0.15	5.5	8.68E-06	3.81%	<i>3.31E-07</i>
-0.2	5.55	1.23E-05	3.68%	4.55E-07
-0.25	5.6	1.90E-05	3.52%	6.68E-0 7
-0.3	5.65	3.11E-05	3.33%	1.03E-06

Le tableau 31 ci-dessous présente ainsi les résultats des calculs pour n_b = 41. Pour chaque trajectoire $(y_j)_{b}$, la valeur de dommage translatée $\Delta D(y_j - (y_j)_b)$ est calculée puis pondérée par $(P_j)_b$.

Tableau 31: Valeurs des dommages pondérés pour chaque trajectoire.

$(Y_j)_b$ (m)	y_j - $(Y_j)_b$ (m)	$\Delta D (y_j - (Y_j)_b)$	$(P_j)_b$	$\Delta D (y_j - (Y_j)_b) x(P_j)_b$
-0.35	5.7	5.29E-05	3.12%	1.65E-06
-0.4	5.75	9.04E-05	2.90%	2.62E-06
-0.45	5.8	1.47E-04	2.66%	<i>3.91E-06</i>
-0.5	5.85	2.17E-04	2,42%	5.24E-06
-0.55	5.9	2.86E-04	2.18%	6.22E-06
-0.6	5.95	3.41E-04	1.94%	6.62E-06
-0.65	6	3.75E-04	1.71%	<i>6.42E-06</i>
-0.7	6.05	3.80E-04	1.50%	5.69E-06
-0.75	6.1	3.52E-04	1.30%	4.57E-06
-0.8	6.15	2.98E-04	1.11%	3.30E-06
-0.85	6.2	2.27E-04	0.94%	2.14E-06
-0.9	6v25	1.53E-04	0.79%	1.21E-06
-0.95	6.3	9.02E-05	0.66%	5.93E-07
-1	6.35	4.76E-05	0.54%	2.57E-07
			$\Delta D_{bal} =$	1.05E-04

Tableau 31: Valeurs de dommages pondérés pour chaque trajectoire.

La valeur du dommage avec balayage pour un passage d'aéronef en un point de position transversale y_j = 5,35 m est ainsi la somme de tous ces dommages pondérés (dernière colonne du tableau 31):

$$\Delta D_{bal}(y_j = 5,35\,m) = \sum_{b=1}^{41} \Delta D(y_j - (y_j)_b) \times (P_j)_b = 1,05.10^{-4}$$

Finalement, pour obtenir le **dommage cumulé avec balayage** pour le trafic considéré à la position transversale $y_j = 5,35 \text{ m}$, il suffit de multiplier ΔD_{bal} par le trafic cumulé sur la période de calcul:

$$D_{bal,cumul\acute{e}}(y_{j} = 5,35m) = \sum_{a\acute{e}ronef} N_{a\acute{e}ronef} \Delta D_{bal,a\acute{e}ronef} = \Delta D_{bal,A330-200}(y_{j} = 5,35m) \times 1mvt / j \times 365 j \times 10ans = 0,383$$

Ce calcul doit être répété pour chaque position transversale de la grille de calcul pour obtenir le profil de dommage cumulé avec balayage. Au final, la valeur maximale de dommage cumulé avec balayage le long de ce profil est la valeur dimensionnante pour le critère de fatigue des enrobés.

Comme on peut le voir sur la figure 29, cette valeur maximale n'est pas atteinte pour la position transversale y_i = 5,35 m, mais pour la position située directement sous les roues de l'atterrisseur principal.



Figure 29: Profil transversal de dommage avec balayage.

La suite de ce chapitre s'attache à illustrer toujours à titre d'exemple trois dimensionnements mécaniques ainsi qu'une vérification au gel-dégel. Le but est cette fois de montrer la mise en application de la méthode elle-même.

8.2. Exemple de dimensionnement d'une voie de circulation

8.2.1. Données

8.2.1.1. Trafic

Caractéristiques du trafic

Les informations relatives aux aéronefs susceptibles de circuler sur la chaussée aéronautique à dimensionner sont regroupées dans le tableau 32. La distinction est faite entre les décollages et les atterrissages: la masse et le nombre de mouvements pour chacun d'entre eux sont précisés. À noter qu'un mouvement représente soit un décollage, soit un atterrissage.

Aéronefs du trafic projet	Masse au roulage Mrw (t)*	Masse à l'atterrissage Mlw (t)*	Nombre de décollages/an	Nombre d'atterrissages/an	Trafic cumulé par type d'aéronef (pour 10 ans)
HERCULES C 130	70	70	125	125	2500
AIRBUS A310-300	150	150	25	25	500
AIRBUS A330-200	233	182	25	25	500
AIRBUS A340-300	257	192	25	25	500
ANTONOV AN-124	400	330	200	200	4000
BOEING B747-200C	340	285,7	50	50	1000
ILYUSHIN IL 76 TD	190	151	50	50	1000

* Les données étant extraites d'un trafic réel, les masses sont différentes et plus précises que celles de la base de données « Ficav ».

Tableau 32: Trafic retenu pour le dimensionnement (1).

La **période de calcul** est fixée à **10 ans**. Sur cette période, l'accroissement du trafic est supposé nul. Il est alors possible de calculer le nombre de passages cumulés de chaque aéronef sur la période de calcul. Ces résultats figurent dans le tableau 32, colonne « Trafic cumulé par type d'aéronef (pour 10 ans) ».

Pour chaque aéronef, la géométrie du train d'atterrissage et les conditions de chargement de ce dernier sont définies dans la base de données « Ficav » du STAC.

La voie de circulation à dimensionner est considérée comme une section circulée à vitesse modérée. Ainsi, la **vitesse de déplacement** de chaque aéronef utilisée pour le calcul est fixée à **30 km/h** (correspondant à une fréquence de 3 Hz) et le **balayage transversal** de chaque aéronef est alors caractérisé par un écart type égal à **0,5 m** (cf. paragraphe 3.1.3 du guide).

• Détermination de la classe de trafic « CTi »

La méthodologie permettant la détermination de la classe de trafic (cf. glossaire, tableau 53) est définie dans le GAN [3]. L'application de cette méthodologie au trafic retenu conduit au tableau 33.

Aéronefs du trafic projet	« Groupe »	F (mvts/j)	Classe de trafic
HERCULES C 130	2	0,68	CT2
AIRBUS A310-300	4	0,14	СТЗ
AIRBUS A330-200	5	0,14	CT4
AIRBUS A340-300	5	0,14	CT4
ANTONOV AN-124	5	1,10	CT4
BOEING B747-200C	5	0,27	CT4
ILYUSHIN IL 76 TD	4	0,27	СТЗ

Tableau 33 : Détermination	de la	a classe	de trafic	par type	d'aéronefs ((1).	

La classe de trafic du projet retenue est la classe la plus élevée; il s'agit donc pour cet exemple de la **classe de trafic CT4**.

8.2.1.2. Paramètres relevant de la maîtrise d'ouvrage

Le **risque de calcu**l est pris égal à **2,5** % puisque la classe de trafic annuel est supérieure à CT3 (recommandation du guide paragraphe 3.1.1).

8.2.1.3. Couche de surface

Le choix de la couche de surface (méthodologie détaillée dans le GAN [3]) est fonction du « niveau de sollicitation » défini à partir de la classe de trafic et du type de climat (cf. glossaire, tableau 54).

Détermination du niveau de sollicitation « NSi »

La classe de trafic définie précédemment est la classe CT4.

Le **climat** choisi pour le dimensionnement est de **type 3**, à dominante continentale (température équivalente choisie : $\theta_{eq} = 15^{\circ}$ C).

• Le niveau de sollicitation est donc NS3.

• Choix de la couche de surface

Pour le niveau de sollicitation NS3 et pour les voies de circulation en partie courante, le GAN [3] préconise deux types de produits en couche de roulement: soit un EB-BBA 2 soit un EB-BBME 1 (cf. tableau 12 du présent guide).

En couche de liaison (cf. tableau 13), les trois produits proposés sont EB-BBM 2, EB-BBSG 1 ou EB-BBME 1. Il est fait le choix, pour la suite de l'étude, de retenir en couche de surface une unique **couche de roulement en matériau EB-BBA 2** (absence de couche de liaison). L'épaisseur de mise en œuvre est fixée à **6 cm**.

8.2.1.4. Couche de base

Pour le niveau de sollicitation NS3 et pour les voies de circulation en partie courante, le GAN [3] conduit, en couche de base, à retenir un produit EB-GB 3 (l'EB-EME 1 n'est pas utilisé pour les chaussées aéronautiques). Pour cet exemple, le matériau choisi en **couche de base** est un **EB-GB 3**.

8.2.1.5. Couche de fondation

Il est choisi d'utiliser une **couche de fondation** constituée de **Grave Non Traitée (GNT) de catégorie 1** (au sens du dimensionnement).

8.2.1.6. Plate-forme support

La classe de portance visée du projet est **PF2**. Dans le modèle de calcul, pour la détermination des sollicitations dans le corps de chaussée, le module associé à la plate-forme support est la valeur limite inférieure de la classe, à savoir 50 MPa.

8.2.1.7. Caractéristiques mécaniques des matériaux

Les caractéristiques mécaniques des matériaux liés choisis pour cet exemple sont fournies dans le tableau 34. Il s'agit des valeurs conventionnelles minimales. Les valeurs des modules à différentes températures et fréquences sont déduites des tableaux 18 et 23 (chapitre 6) indiquant la susceptibilité des modules aux variations de températures et de fréquences.

Produit	E (15°C, 10Hz) (MPa)	E (10°C, 10Hz) (MPa)	E (15°C, 3Hz) (MPa)	Е ₆ (10°С, 25Hz) (µdef)	$\beta = -1/b$	S_N	S_h
EB-BBA 2	5500	7315	4512	100	5	0,25	-
EB-GB 3	9000	11 880	7383	90	5	0,30	(1)

```
(1) S_h = 1 si e \le 10 cm, S_h = 1+0,3 (e-10) si 10 cm < e < 15 cm, S_h = 2,5 si e \ge 15 cm
```

Tableau 34: Caractéristiques mécaniques des matériaux hydrocarbonés (1).

Pour ce qui concerne la grave non traitée, celle-ci est subdivisée (pour le dimensionnement) en souscouches de 0,25 m d'épaisseur. Le module de la GNT de catégorie 1 est égal à 3 fois le module de la couche sous-jacente, jusqu'à atteindre éventuellement la valeur limite maximale de 600 MPa. Le module de la première sous-couche sera donc égal à 50 MPa x 3 = 150 MPa, celui de la seconde à 150 MPa x 3 = 450 MPa, et celui des couches suivantes à 600 MPa.

8.2.2. Calcul des endommagements

Le calcul des endommagements s'effectue à deux niveaux dans la structure de chaussée :

- \triangleright à la base de la couche de base (EB-GB 3) endommagement par fatigue en traction (critère \mathcal{E}_{t}),
- au sommet du sol support endommagement par déformation permanente en compression (critère \mathcal{E}_{zz}).

Trois calculs de dimensionnement avec différentes épaisseurs de GNT sont présentés afin d'illustrer les itérations réalisées sur l'épaisseur de couche de fondation :

- ▶ Structure 1 6 cm de EB-BBA 2 + 11 cm de EB-GB 3 + 22 cm de GNT de catégorie 1,
- Structure 2 6 cm de EB-BBA 2 + 11 cm de EB-GB 3 + 40 cm de GNT de catégorie 1,
- ▶ Structure 3 6 cm de EB-BBA 2 + 11 cm de EB-GB 3 + 36 cm de GNT de catégorie 1.

8.2.2.1. Endommagement à la base de la couche en EB-GB 3

Généralités

L'endommagement élémentaire est défini par la formule suivante :

$$\Delta D = \frac{1}{N} = \left(\frac{\varepsilon_{t \max}}{K}\right)^{\beta} \text{ avec } K = 10^{6/\beta} k_{\theta f} . k_s . k_r . k_c . \overline{\varepsilon}_6$$

Avec:

• Coefficient de correction en température et fréquence :

$$k_{\theta f} = \sqrt{\frac{E(10^{\circ}C, 10Hz)}{E(\theta_{eq}, f)}} = \sqrt{\frac{1,32}{0,82}} = 1,27 \text{ pour } \theta_{eq} = 15^{\circ}C \text{ et } f = 3Hz.$$

• Coefficient de risque :

$$k_r = 10^{-ub\delta}$$
 et $\delta = \sqrt{S_N^2 + \left(\frac{c.S_h}{b}\right)^2}$ avec
$$\begin{cases} S_N = 0, 3 \\ c = 2m^{-1} \\ b = -0, 2 \\ u = -1,960 \end{cases}$$

La valeur de S_h étant fonction de l'épaisseur e de la couche de EB-GB 3 utilisée dans le modèle, la valeur de k_r l'est donc également. Le tableau 35 fournit les valeurs de S_h et k_r en fonction de e.

e (m)	$e \leq 0,10$	0,11	0,12	0,13	0,14	$e \ge 0,15$
$S_h(m)$	0,010	0,013	0,016	0,019	0,022	0,025
k _r	0,752	0,744	0,736	0,726	0,715	0,703

Tableau 35: Valeurs de k_r en fonction de l'épaisseur de EB-GB 3.

L'épaisseur de grave bitume utilisée pour cet exemple étant de 11 cm pour les trois structures étudiées, la valeur de $k_r = 0,744$ est retenue.

• Coefficient de calage (tableau 36), déterminé pour chaque structure, à l'aide de la courbe d'évolution de k_c (cf. paragraphe 2.7.1.2) en fonction de la RseR (cf. paragraphe 2.6):

Structure	1	2	3
RseR (t)	16,1	15,8	15,9
k _c	1,58	1,57	1,57

Tableau 36: Valeurs de k_c en fonction de la RseR (1).

• Coefficient de plate-forme: k_s = 1 (module du matériau sous la couche de EB-GB 3 > 120 MPa)

Calcul d'endommagement

Les calculs d'endommagement sont réalisés à l'aide d'un logiciel respectant les principes énoncés dans le guide. Ils prennent en compte le balayage transversal des différents aéronefs. Les valeurs de dommage associées à chaque type d'aéronef au décollage et à l'atterrissage, ainsi que du dommage cumulé sont fournies pour chaque structure dans le tableau 37.

Aéronefs du trafic projet		Structure 1	Structure 2	Structure 3
	Décollage	< 0,001	< 0,001	< 0,001
HERCULES C 130	Atterrissage	< 0,001	< 0,001	< 0,001
AIDDIN 4210 200	Décollage	0,118	0,025	0,036
AIRBUS A310-300	Atterrissage	0,118	0,025	0,036
AIDDIN 4220 200	Décollage	0,338	0,066	0,095
AIRBUS A330-200	Atterrissage	0,150	0,031	0,044
	Décollage	0,262	0,052	0,074
AIRBUS A340-300	Atterrissage	0,098	0,021	0,029
ANTONOV AN 124	Décollage	1,311	0,273	0,386
ANTONOV AN-124	Atterrissage	0,675	0,149	0,207
DOEINC D747 MAC	Décollage	0,133	0,029	0,041
BOEING B/4/-200C	Atterrissage	0,072	0,017	0,023
	Décollage	0,172	0,028	0,043
ILTUSHIN IL 70 ID	Atterrissage	0,069	0,012	0,018
Dommage c	umulé	3,515	0,727	1,031

Tableau 37: Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef dans le matériau EB-GB 3.

Nota (valable pour tous les calculs d'endommagement): Dans les tableaux ci-dessus, les dommages correspondant à chacun des aéronefs ne sont pas les maxima des profils transversaux de dommage individuels (de chaque aéronef). Ces profils de dommage individuels sont cumulés (sommés) et forment un profil transversal de dommage cumulé global duquel est extrait le dommage cumulé maximum. Les contributions de chaque aéronef à ce dommage maximum sont lues sur les profils individuels à la position transversale correspondant au dommage cumulé maximum. Ce sont les valeurs qui sont indiquées dans les tableaux de dommages.

La structure convient si le dommage est inférieur à 1, tout en étant aussi proche que possible de 1. Ainsi, pour ce qui concerne l'endommagement du matériau EB-GB 3, la première itération (structure 1) donne une valeur de dommage trop élevée, ce qui a conduit à augmenter l'épaisseur de GNT. Les structures 2 et 3 conviennent puisque les dommages cumulés avec balayage sont respectivement égaux à 0,727 et 1,031. La structure 1 est écartée.

Il reste à vérifier que l'autre critère portant sur les déformations permanentes du sol est satisfait.

8.2.2.2. Endommagement au sommet du sol support

L'endommagement élémentaire est défini par la formule suivante :

$$\Delta D = \frac{1}{N} = \left(\frac{\varepsilon_{zzmax}}{K}\right)^{\beta} \text{ avec } K = 16000 \text{ et } \beta = 4,5$$

Le calcul de l'endommagement est réalisé à l'aide d'un logiciel respectant les principes énoncés dans le guide. Il prend en compte le balayage transversal des différents aéronefs. La contribution de chaque aéronef au décollage et à l'atterrissage ainsi que le dommage cumulé sont fournis pour les trois structures pour les déformations permanentes du sol dans le tableau 38. Les dommages pour la structure 1 sont donnés pour information.

Aéronefs du trafic projet		Structure 1	Structure 2	Structure 3
	Décollage	< 0,001	< 0,001	< 0,001
HERCULES C 130	Atterrissage	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	Décollage	0,033	0,011	0,015
AIRBUS A310-300	Atterrissage	0,033	0,011	0,015
AIDDIN 4220 200	Décollage	0,058	0,017	0,023
AIRBUS A330-200	Atterrissage	0,021	0,006	0,008
AIRBUS A340-300	Décollage	0,042	0,012	0,016
	Atterrissage	0,012	0,003	0,005
	Décollage	0,684	0,247	0,317
ANIONOV AN-124	Atterrissage	0,300	0,107	0,137
BOEINC B747 MAC	Décollage	0,021	0,007	0,009
BOEING B747-200C	Atterrissage	0,010	0,003	0,004
ILYUSHIN IL 76 TD	Décollage	0,043	0,016	0,021
	Atterrissage	0,016	0,006	0,008
Dommage cumulé		1,272	0,445	0,575

Tableau 38: Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef au sommet du sol support (1).

Les structures 2 et 3 vérifient les deux critères de dimensionnement; elles sont toutes les deux acceptables d'un point de vue mécanique. Cependant, la deuxième itération conduisant à la structure 3 a permis d'optimiser les épaisseurs de matériaux à mettre en place par une diminution de l'épaisseur de GNT par rapport à la structure 2. On retiendra la structure ayant les valeurs de dommage les plus proches de 1. La structure 3 est donc considérée comme le résultat du dimensionnement mécanique, sous réserve que l'épaisseur de couche de base soit suffisante.



La figure 30 présente les courbes de variation de dommage le long du profil transversal de la piste pour cette structure.

Figure 30: Structure 3 – Profils transversaux de dommage en fatique à la base de la grave bitume (vert) et en déformation permanente au sommet de la plate-forme (bleu) (1).

8.2.3. Conclusion

On notera que pour cet exemple, le critère de fatigue des enrobés est dimensionnant.

La structure finalement retenue est celle qui permet de vérifier les deux critères de dimensionnement : traction à la base du matériau EB-GB 3 et déformation verticale au sommet du sol support.

Il s'agit de la structure 3 avec mise en œuvre de 6 cm de EB-BBA 2 + 11 cm de EB-GB 3 + 36 cm de GNT de catégorie 1. Il convient de vérifier que cette structure dispose d'une épaisseur de couche de base suffisante à l'aide de la figure 31 ci-dessous. Ceci nécessite comme donnée d'entrée la RseR, qui est égale à 15,9 t pour la structure 3.



Epaisseur de couche de base - Valeurs indicatives

Figure 31: Vérification de l'épaisseur d'enrobé pour la structure retenue (1).

L'épaisseur de couche de base de la structure retenue est de 11 cm, ce qui est juste suffisant par rapport aux 10,4 cm indicatifs de la figure 31. L'épaisseur retenue convient donc bien.

8.3. Exemple de dimensionnement d'une piste

8.3.1. Données

8.3.1.1. Trafic

• Caractéristiques du trafic

Les informations relatives aux aéronefs susceptibles de circuler sur la chaussée aéronautique à dimensionner sont regroupées dans le tableau 39. La distinction est faite entre les décollages et les atterrissages : la masse et le nombre de mouvements pour chacun d'entre eux sont précisés. À noter qu'un mouvement représente soit un décollage, soit un atterrissage.

Aéronefs du trafic projet	Masse au roulage Mrw (t)*	Masse à l'atterrissage Mlw (t)*	Nombre de décollages/an	Nombre d'atterrissages/an	Trafic cumulé par type d'aéronefs (pour 10 ans)
A340-200	260	174,7	315,4	182,6	4980
B777-300 ER	341	243,8	399	231	6300
A330-300	230	184,0	296,4	171,6	4680
A320-200 JUM	71	59,5	1086,8	629,2	17160
EMB 190 LR/AR	50,3	45,8	691,6	400,4	10920
B737-100	42,4	35,1	509,2	294,8	8 040
AN124	392	319,5	22,8	13,2	360
B747-400 Cargo	377,8	287,1	98,8	57,2	1560
KC135	136,8	101,1	38	22	600
B707-320B	146,8	108,3	38	22	600
A310-300	157	125,6	1387	803	21 900
CASA CN325-100	15,1	13,6	1387	803	21 900

* Les données étant extraites d'un trafic réel, les masses sont inférieures ou égales celles de la base de données « Ficav », qui indique les valeurs Mrw et Mlw enregistrées au certificat de navigabilité.

Tableau 39: Trafic retenu pour le dimensionnement (2).

La **période de calcul** est fixée à **10 ans**. Sur cette période, l'accroissement du trafic est supposé nul. Il est alors possible de calculer le nombre de passages cumulés de chaque aéronef sur la période de calcul. Les résultats figurent dans le tableau 39, colonne « Trafic cumulé par type d'aéronefs (pour 10 ans) ».

Pour chaque aéronef, la géométrie du train d'atterrissage et les conditions de chargement de ce dernier sont définies dans la base de données « Ficav » du STAC.

La liste des aéronefs empruntant la piste étant importante, il est proposé d'utiliser la méthode décrite au paragraphe 3.1.2.3 de ce guide afin de réduire le nombre d'aéronefs pris en compte dans le dimensionnement.

Nous rappelons que cette méthode prend en compte, pour chaque aéronef, la charge à la roue la plus importante et la compare à la charge la plus importante de tout le trafic. Le coefficient r_j calculé pour chaque aéronef permet de considérer l'aéronef dimensionnant dans le cas où $r_j \ge 1\%$.

Le tableau 40 présente les résultats de l'application de cette méthode. Seuls cinq aéronefs sont donc retenus dans la suite du calcul (aéronefs en vert dans le tableau 40).

Aéronefs du trafic projet	Pr _j (en tonnes)	nj	P_{j}	rj
A340-200	27,42	4980	5,0%	4,6%
B777-300 ER	27,17	6300	6,4%	5,5%
A330-300	27,93	4680	4,7%	4,7%
A320-200 JUM	18,02	17160	17,3%	1,9%
EMB 190 LR/AR	11,98	10920	11,0%	0,2%
<i>B737-100</i>	11,57	8040	8,1%	0,1%
AN124	19,31	360	0,4%	0,1%
B747-400 Cargo	24,23	1560	1,6%	0,8%
В КС135	17,82	600	0,6%	0,1%
B707-320B	17,55	600	0,6%	0,1%
A310-300	19,51	21 900	22,1%	3,7%
CASA CN325-100	3,8	21 900	22,1%	0,0%
	$Pr_{jmax} = 27,93$	$n_{tot} = 99000$		

Tableau 40: Détermination des aéronefs considérés comme dimensionnants (couleur verte).

La piste à dimensionner est considérée comme une section circulée à vitesse élevée. Ainsi, la **vitesse de déplacement** de chaque aéronef est fixée à **100 km/h** (correspondant à une fréquence de 10 Hz) et le **balayage transversal** de chaque aéronef est alors caractérisé par un écart type égal à **0,75 m** (cf. paragraphe 3.1.3 du guide).

• Détermination de la classe de trafic « CTi »

La méthodologie permettant la détermination de la classe de trafic (cf. glossaire, tableau 53) est définie dans le GAN [3]. L'application de cette méthodologie au trafic retenu conduit au tableau 41.

Aéronefs du trafic projet	« Groupe »	F (mvts/j)	Classe de trafic
A340-200	5	1,27	CT4
B 777 -300 ER	5	1,73	CT4
A330-300	5	1,28	CT4
A320-200 JUM	3	4,70	CT2
A310-300	4	6,00	СТЗ

Tableau 41: Détermination de la classe de trafic par type d'aéronefs (2).

La classe de trafic du projet retenue est la plus élevée; il s'agit donc de la classe de trafic CT4.

8.3.1.2. Paramètres relevant de la maîtrise d'ouvrage

Le **risque de calcul** est pris égal à **2,5 %** puisque la classe de trafic annuel est supérieure à CT3 (recommandation du guide paragraphe 3.1.1).

8.3.1.3. Couche de surface

Le choix de la couche de surface (méthodologie détaillée dans le GAN [3]) est fonction du « niveau de sollicitation » défini à partir de la classe de trafic et du type de climat.

Détermination du niveau de sollicitation « NSi »

La classe de trafic définie précédemment est la classe CT4.

Le **climat** choisi pour le dimensionnement est de **type 4**, à dominante tropicale avec une température équivalente : $\theta_{eq} = 28^{\circ}C$ (correspondant au cas particulier de la Guyane, cf.paragraphe 3.1.4).

Le niveau de sollicitation est donc NS4 (cf. glossaire, tableau 54).

• Choix de la couche de surface

Pour le niveau de sollicitation NS4 et pour les pistes en partie courante, le GAN [3] préconise un seul type de produit en couche de roulement: EB-BBA 2 (application du tableau 12, paragraphe 5.3).

En couche de liaison (application du tableau 13, paragraphe 5.3), les deux produits proposés sont EB-BBSG 1 ou EB-BBME 1 (non préconisé par ce guide).

Il est fait le choix, pour la suite de l'étude, de retenir en couche de surface la seule **couche de roulement en matériau EB-BBA 2** (absence de couche de liaison). L'épaisseur de mise en œuvre est fixée à 6 cm.

8.3.1.4. Couche de base

Pour le niveau de sollicitation NS4 et pour les pistes en partie courante, le GAN [3] conduit, en couche de base, à retenir soit un produit EB-GB 3, soit un produit EB-EME 2. Pour cet exemple, le matériau de **couche de base** choisi est un **EB-EME 2**.

8.3.1.5. Couche de fondation

Il est choisi d'utiliser une couche de fondation constituée de Grave Non Traitée de catégorie 1.

8.3.1.6. Plate-forme support

La classe de portance visée du projet est **PF2**⁴⁵. Dans le modèle de calcul, pour la détermination des sollicitations dans le corps de chaussée, le module associé à la plate-forme support est la valeur limite inférieure de la classe, à savoir 80 MPa.

8.3.1.7. Caractéristiques mécaniques des matériaux

Les caractéristiques mécaniques des matériaux choisis pour cet exemple sont fournies dans le tableau 42. Il s'agit des valeurs conventionnelles minimales. Les valeurs des modules à différentes températures et fréquences sont déduites des tableaux 20 et 23 indiquant les susceptibilités des modules aux variations de températures et de fréquences.

Produit	E (15°C, 10Hz) (MPa)	E (10°C, 10Hz) (MPa)	E (28°C, 10Hz) (MPa)	Е ₆ (10°С, 25Hz) (µdef)	$\beta = -1/b$	S_N	S_h
EB-BBA 2	5 500	7315	1760	100	5	0,25	-
EB-EME 2	14000	16940	7000	130	5	0,25	(1)

(1) $S_h = 1 \text{ si } e \le 10 \text{ cm}, S_h = 1+0,3 \text{ (e-10) si } 10 \text{ cm} < e < 15 \text{ cm}, S_h = 2,5 \text{ si } e \ge 15 \text{ cm}$

Tableau 42: Caractéristiques mécaniques des matériaux hydrocarbonés (2).

Pour ce qui concerne la grave non traitée, celle-ci est subdivisée (pour le dimensionnement) en souscouches de 0,25 m d'épaisseur. Le module de la GNT 1 est égal à 3 fois le module de la couche sous-jacente, jusqu'à ne pas dépasser la valeur limite maximale de 600 MPa. Le module de la première sous-couche sera donc égal à 80 MPa x 3 = 240 MPa, celui de la seconde à 240 MPa x 3 = 720 MPa, valeur qui est donc rabattue à 600 MPa.

8.3.2. Calcul des endommagements

Le calcul des endommagements s'effectue à deux niveaux dans la structure de chaussée :

- \blacktriangleright à la base de la couche de base (EB-EME 2) endommagement par fatigue en traction (critère \mathcal{E}_t),
- ▶ au sommet du sol support endommagement par déformations permanentes en compression (critère \mathcal{E}_{zz}).

La définition des épaisseurs relevant d'une procédure itérative menant à l'obtention d'un des deux endommagements proches de 1 (par valeur inférieure), les calculs d'endommagement sont réalisés pour différentes structures. Deux d'entre elles sont présentées ici, à savoir:

- Structure 1 6 cm de EB-BBA 2 + 15 cm de EB-EME 2 + 40 cm de GNT de catégorie 1,
- Structure 2 6 cm de EB-BBA 2 + 12 cm de EB-EME 2 + 33 cm de GNT de catégorie 1,

8.3.2.1. Endommagement à la base de la couche en EB-EME

k.,

Généralités

L'endommagement élémentaire est défini par la relation suivante : Avec :

$$\Delta D = \frac{1}{N} = \left(\frac{\varepsilon_{t \max}}{K}\right)^{\beta} \text{ avec } K = 10^{6/\beta} k_{\theta f} \cdot k_s \cdot k_r \cdot k_c \cdot \overline{\varepsilon}_6$$

• Coefficient de correction en température et fréquence: $k_{\theta f} = \sqrt{\frac{E(10^{\circ}C, 10Hz)}{E(\theta_{eq}, f)}} = \sqrt{\frac{1,21}{0,50}} = 1,56 \text{ pour } \theta_{eq} = 28^{\circ}C \text{ et } f = 10Hz.$

• Coefficient de risque :

=
$$10^{-ub\delta}$$
 et $\delta = \sqrt{S_N^2 + \left(\frac{c.S_h}{b}\right)^2}$ avec $\begin{cases} S_N = 0, 2S \\ c = 2m^{-1} \\ b = -0, 2 \\ u = -1, 960 \end{cases}$

La valeur de S_h étant fonction de l'épaisseur e de la couche de EB-EME 2 utilisée dans le modèle, la valeur de k_r l'est donc également. Le tableau 43 fournit les valeurs de S_h et k_r en fonction de e.

e (m)	$e \leq 0,10$	0,11	0,12	0,13	0,14	$e \ge 0,15$
$S_h(m)$	0,010	0,013	0,016	0,019	0,022	0,025
k _r	0,784	0,775	0,765	0,753	0,740	0,727

Tableau 43: Valeurs de k_r en fonction de l'épaisseur de EB-EME 2.

▶ Coefficient de calage (tableau 44), déterminé pour chaque structure, à l'aide de la courbe d'évolution de k_c (cf. paragraphe 2.7.1.2) en fonction de la RseR (cf. paragraphe 2.6):

Structure	1	2
RseR (t)	23,4	22,8
k _c	1,45	1,43

Tableau 44: Valeurs de k_c en fonction de la RseR (2).

• Coefficient de plate-forme: $k_s = 1$ (module du matériau sous la couche de EB-EME 2 > 120 MPa)

Calcul de l'endommagement

Les calculs d'endommagement sont réalisés à l'aide d'un logiciel respectant les principes énoncés dans le guide. Ils prennent en compte le balayage transversal des différents aéronefs. Le dommage par type d'aéronefs au décollage et à l'atterrissage et le dommage cumulé sont fournis pour chaque structure dans le tableau 45.

Nota (valable pour tous les calculs d'endommagement): Dans les tableaux ci-dessous, les dommages correspondant à chacun des aéronefs ne sont pas les maxima des profils transversaux de dommage individuels (de chaque aéronef). Ces profils de dommage individuels sont cumulés (sommés) et forment un profil transversal de dommage cumulé global duquel est extrait le dommage cumulé maximum. Les contributions de chaque aéronef à ce dommage maximum sont lues sur les profils individuels à la position transversale correspondant au dommage cumulé maximum. Ce sont les valeurs qui sont indiquées dans les tableaux de dommage.

Aéronefs du trafic projet		Structure 1	Structure 2
A340-300	Décollage	0,014	0,037
	Atterrissage	0,002	0,007
D.777 200 FD	Décollage	0,023	0,064
<i>B777-300 ER</i>	Atterrissage	0,005	0,014
A330-300	Décollage	0,016	0,044
	Atterrissage	0,005	0,014
	Décollage	0,008	0,019
A320-200 JUM	Atterrissage	0,002	0,006
A310-300	Décollage	0,031	0,081
	Atterrissage	0,014	0,034
Dommage cumulé		0,120	0,320

Tableau 45: Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef dans le matériau EB-EME 2.

La structure convient si le dommage est inférieur à 1, tout en étant aussi proche que possible de 1. Ainsi, pour ce qui concerne l'endommagement du matériau EB-EME 2, les deux structures conviennent puisque les dommages cumulés avec balayage sont respectivement égaux à 0,120 et 0,320.

Il reste à vérifier que l'autre critère portant sur les déformations permanentes du sol est satisfait.

8.3.2.2. Endommagement au sommet du sol support

L'endommagement élémentaire est défini par la formule suivante : $\Delta D = \frac{1}{N} = \left(\frac{\varepsilon_{zz \max}}{K}\right)^{\beta} \text{ avec } K = 16000 \quad et \quad \beta = 4,5$

Le calcul de l'endommagement est réalisé à l'aide d'un logiciel principes respectant les énoncés dans le guide. Il prend en compte le balayage transversal des différents aéronefs. La contribution de chaque aéronef au décollage et à l'atterrissage ainsi que le dommage cumulé sont fournis pour les deux structures pour les déformations permanentes du sol dans le tableau 46. Pour la structure 1, l'endommagement au sommet du sol support est faible avec une valeur avoisinant 0,34. Cette structure vérifie ce critère, mais la valeur de dommage n'étant pas proche de 1, la structure n'est pas optimisée.

Aéronefs du trafic projet		Structure 1	Structure 2
A340-300	Décollage	0,033	0,100
	Atterrissage	0,003	0,011
	Décollage	0,083	0,225
<i>B777-300 ER</i>	Atterrissage	0,011	0,031
	Décollage	0,041	0,123
A330-300	Atterrissage	0,009	0,028
	Décollage	0,008	0,029
A320-200 JUM	Atterrissage	0,002	0,008
A310-300	Décollage	0,111	0,316
	Atterrissage	0,042	0,108
Dommage cumulé		0,344	0,979

Tableau 46: Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef au sommet du sol support (2).

La structure 2, quant à elle, vérifie ce critère au niveau du sol support avec une valeur de dommage égale à 0,979, cette structure est donc optimisée. Elle peut être retenue sous réserve que l'épaisseur de couche de base soit suffisante. La figure 32 présente les courbes de variation de dommage le long du profil transversal de la piste pour cette structure.



Figure 32: Structure 2 – Profils transversaux de dommage en fatigue à la base de l'enrobé à module élevé (vert) et en déformation permanente au sommet de la plate-forme (bleu).

8.3.3. Conclusion

Pour ce deuxième exemple, le critère dimensionnant est la déformation permanente au niveau du sol support. La structure finalement retenue est celle qui permet de vérifier les deux critères de dimensionnement : traction à la base du matériau EB-EME 2, et déformation verticale au sommet du sol support.

Il s'agit de la **structure 2** avec mise en œuvre de **6 cm de EB-BBA 2 + 12 cm de EB-EME 2 + 33 cm de GNT de catégorie 1**. Il convient de vérifier que cette structure dispose d'une épaisseur de couche de base suffisante à l'aide de la figure 33.



Figure 33: Vérification de l'épaisseur d'enrobé pour la structure retenue (2).

L'épaisseur de la couche de base de la structure retenue est de 12 cm, ce qui est supérieur aux 9,8 cm minimum indicatifs de la figure 33, pour une RseR de 22,8 t. L'épaisseur retenue convient donc bien.

8.4. Exemple de dimensionnement d'un parking

8.4.1. Données

8.4.1.1. Trafic

Caractéristiques du trafic

Les informations relatives aux aéronefs susceptibles de circuler sur la chaussée aéronautique à dimensionner sont regroupées dans le tableau 47. À noter qu'un mouvement représente soit un décollage, soit un atterrissage.

Aéronefs du trafic projet	Masse au roulage Mrw (t)	Masse à l'atterrissage Mlw (t)	Nombre de décollages/an	Nombre d'atterrissages/an	Trafic cumulé par type d'aéronefs (pour 10 ans)
TU 134A	47	47*	2000	2000	40 000
FOKKER F100 STD	40	40*	1000	1000	20 000

(*) : les masses à l'atterrissage n'étant pas connues, elles sont prises identiques aux masses au roulage.

Tableau 47: Trafic retenu pour le dimensionnement (3).

La **période de calcul** est fixée à **10 ans**. Sur cette période, l'accroissement du trafic est supposé nul. Il est alors possible de calculer le nombre de passages cumulés de chaque aéronef sur la période de calcul. Ces résultats figurent dans le tableau 47, colonne « Trafic cumulé par type d'aéronefs (pour 10 ans) ».

Pour chaque aéronef, la géométrie du train d'atterrissage et les conditions de chargement de ce dernier sont définies dans la base de données « Ficav » du STAC.

Le parking à dimensionner est considéré comme une section circulée à faible vitesse pour laquelle la **vitesse de déplacement** de chaque aéronef (forfaitaire) est fixée à **10 km/h** (correspondant à une fréquence de 1 Hz) et le **balayage transversal** de chaque aéronef est alors caractérisé par un **écart type** $S_{bal} = 0$ (cf. paragraphe 3.1.3).

• Détermination de la classe de trafic « CTi »

La méthodologie permettant la détermination de la classe de trafic (cf. glossaire, tableau 53) est définie dans le GAN [3]. L'application de cette méthodologie au trafic retenu conduit au tableau 48.

Aéronefs du trafic projet	« Groupe »	F (mvts/j)	Classe de trafic
TU 134A	3	10,9	CT2
FOKKER F100 STD	2	5,48	CT2

Tableau 48: Détermination de la classe de trafic par type d'aéronefs (3).

La classe de trafic du projet retenue est la plus élevée; il s'agit donc pour cet exemple de la classe de trafic CT2.

8.4.1.2. Paramètres relevant de la maîtrise d'ouvrage

Le **risque de calcul** est pris égal à **5 %** puisque la classe de trafic annuel est inférieure à CT3 (recommandation du guide paragraphe 3.1.1).

8.4.1.3. Couche de surface

Le choix de la couche de surface (méthodologie détaillée dans le GAN [3]) est fonction du « niveau de sollicitation » défini à partir de la classe de trafic et du type de climat (cf. glossaire, tableau 54).

• Détermination du niveau de sollicitation « NSi »

La classe de trafic définie précédemment est la classe CT2.

Le **climat** choisi pour le dimensionnement est de **type 3**, à dominante continentale (température équivalente choisie : $\theta_{eq} = 15^{\circ}$ C).

• Le niveau de sollicitation est donc NS1.

• Choix de la couche de surface

Pour le niveau de sollicitation NS1 et pour les parkings, l'utilisation du GAN [3] conduit à retenir plusieurs types de produits en couche de roulement: EB-BBA 2, ESU, ECF, EP ou EB-BBM 1 (application du tableau 12 du chapitre 5).

En couche de liaison (application du tableau 13 du chapitre 5), les deux produits proposés sont EB-BBM 1 ou EB-BBSG 1.

Il est fait le choix, pour la suite de l'étude, de retenir en couche de surface la seule **couche de roulement en matériau EB-BBA 2** (absence de couche de liaison). L'épaisseur de mise en œuvre est fixée à 6 cm.

8.4.1.4. Couche de base

Pour le niveau de sollicitation NS1 et pour les parkings, le GAN [3] préconise de retenir un produit EB-GB 2 en couche de base. Ceci étant une préconisation minimale, il est choisi, pour cet exemple, de retenir un matériau ayant de meilleures caractéristiques, à savoir un **EB-GB 3 en couche de base**.

8.4.1.5. Couche de fondation

La couche de fondation retenue pour cet exemple est constituée de **Grave Non Traitée (GNT) de catégorie 2**, conformément aux recommandations du paragraphe 6.7.5.

8.4.1.6. Plate-forme support

La classe de portance visée du projet est **PF2**. Dans le modèle de calcul, pour la détermination des sollicitations dans le corps de chaussée, le module associé à la plate-forme est la valeur limite inférieure de la classe, à savoir 50 MPa.

8.4.1.7. Caractéristiques mécaniques des matériaux

Les caractéristiques mécaniques des matériaux choisis pour cet exemple sont fournies dans le tableau 49 ci-dessous. Il s'agit des valeurs conventionnelles minimales. Les valeurs des modules à différentes températures et fréquences sont déduites des tableaux 18 et 23 (chapitre 6) indiquant la susceptibilité des modules aux variations de températures et de fréquences.

Produit	E (15°C, 10Hz) (MPa)	E (10°C, 10Hz) (MPa)	E (15°C, 1Hz) (MPa)	E ₆ (10°C, 25Hz) (µdef)	$\beta = -1/b$	S_N	S_h
EB-BBA 2	5 500	7315	3 740	100	5	0,25	-
EB-GB 3	9000	11 880	6300	90	5	0,3	(1)

(1) $S_h = 1$ si $e \le 10$ cm, $S_h = 1+0,3$ (e-10) si 10 cm < e < 15 cm, $S_h = 2,5$ si $e \ge 15$ cm

Tableau 49: Caractéristiques mécaniques des matériaux hydrocarbonés (3).

Pour ce qui concerne la grave non traitée, celle-ci est subdivisée (pour le dimensionnement) en sous-couches de 0,25 m d'épaisseur. Le module de la GNT de catégorie 2 est égal à 2,5 fois le module de la couche sous-jacente, jusqu'à ne pas dépasser la valeur limite maximale de 400 MPa. Le module de la première sous-couche sera donc égal à 50 MPa x 2,5 = 125 MPa, celui de la seconde à 125 MPa x 2,5 = 312,5 MPa, et celui des couches suivantes à 400 MPa.

8.4.2. Calcul des endommagements

Le calcul des endommagements s'effectue à deux niveaux dans la structure de chaussée :

- \blacktriangleright à la base de la couche de base (EB-GB 3) endommagement par fatigue en traction (critère \mathcal{E}_t),
- au sommet du sol support endommagement par déformation permanente (critère \mathcal{E}_{zz}).

Trois calculs de dimensionnement avec différentes épaisseurs de GNT sont présentés afin d'illustrer les itérations réalisées sur l'épaisseur de couche de fondation :

- Structure 1 6 cm de EB-BBA 2 + 13 cm de EB-GB 3 + 25 cm de GNT de catégorie 2,
- Structure 2 6 cm de EB-BBA 2 + 13 cm de EB-GB 4 + 40 cm de GNT de catégorie 2,
- Structure 3 6 cm de EB-BBA 2 + 13 cm de EB-GB 4 + 34 cm de GNT de catégorie 2.

8.4.2.1. Endommagement à la base de la couche en EB-GB 3

Généralités

L'endommagement élémentaire est défini par la formule suivante :

$$\Delta D = \frac{1}{N} = \left(\frac{\varepsilon_{r \max}}{K}\right)^{\beta} \text{ avec } K = 10^{6/\beta} k_{\theta f} . k_s . k_r . k_c . \overline{\varepsilon}_6$$

Avec:

Coefficient de correction en température et fréquence:

$$k_{\theta f} = \sqrt{\frac{E(10^{\circ}C, 10Hz)}{E(\theta_{eq}, f)}} = \sqrt{\frac{1,32}{0,70}} = 1,37 \text{ pour } \theta_{eq} = 15^{\circ}C \qquad f = 1Hz \,.$$

• Coefficient de risque :

$$k_r = 10^{-ub\delta}$$
 et $\delta = \sqrt{S_N^2 + \left(\frac{c.S_h}{b}\right)^2}$ avec
$$\begin{cases} S_N = 0,3\\ c = 2m^{-1}\\ b = -0,2\\ u = -1,645 \end{cases}$$

L'épaisseur de EB-GB 3 étant fixée à 13 cm pour cet exemple, la valeur de S_h est donc égale à 0,019 m. Ainsi, nous avons k_r = 0,764.

• Coefficients de calage (tableau 50), déterminés pour chaque structure à l'aide de la courbe d'évolution de k_c :

Structure	1	2	3
RseR (t)	16,1	15,8	15,9
k _c	1,58	1,57	1,58

Tableau 50: Valeurs de k_c en fonction de la RseR (3).

• Coefficient de plate-forme: $k_s = 1$ (module du matériau sous la couche de EB-GB 3 > 120 MPa)

Calcul d'endommagement

Les calculs d'endommagement sont réalisés à l'aide d'un logiciel respectant les principes énoncés dans le guide. Ils prennent en compte le balayage transversal des différents aéronefs. Les valeurs de dommage associées à chaque type d'aéronefs au décollage et à l'atterrissage, ainsi que celles du dommage cumulé sont fournies pour chaque structure dans le tableau 51.

Nota (valable pour tous les calculs d'endommagement): Dans les tableaux ci-dessous, les dommages correspondant à chacun des aéronefs ne sont pas les maxima des profils transversaux de dommage individuels (de chaque aéronef). Ces profils de dommage individuels sont cumulés (sommés) et forment un profil transversal de dommage cumulé global duquel est extrait le dommage cumulé maximum. Les contributions de chaque aéronef à ce dommage maximum sont lues sur les profils individuels à la position transversale correspondant au dommage cumulé maximum. Ce sont les valeurs qui sont indiquées dans les tableaux de dommage.

Aéronefs du trafic projet		Structure 1	Structure 2	Structure 3
TI 1244	Décollage	< 0,001	< 0,001	< 0,001
<i>IU 134A</i>	Atterrissage	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	Décollage	0,985	0,348	0,500
FOKKER F100 SID	Atterrissage	0,985	0,348	0,500
Dommage cumulé		1,970	0,695	1,000

Tableau 51: Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef dans le matériau EB-GB 4.

La structure convient si le dommage est inférieur à 1, tout en étant aussi proche que possible de 1. Ainsi, pour ce qui concerne l'endommagement du matériau EB-GB 3, la première itération (structure 1) donne une valeur de dommage trop élevée, ce qui a conduit à augmenter l'épaisseur de GNT. Les structures 2 et 3 conviennent puisque les dommages cumulés avec balayage sont respectivement égaux à 0,695 et 1,000. La structure 1 est écartée.

Il reste à vérifier que l'autre critère portant sur les déformations permanentes du sol est satisfait.

8.4.2.2. Endommagement au sommet du sol support

L'endommagement élémentaire est défini par la formule suivante :

$$\Delta D = \frac{1}{N} = \left(\frac{\varepsilon_{zzmax}}{K}\right)^{\beta} \text{ avec } K = 16000 \text{ et } \beta = 4,5$$

Le calcul d'endommagement prend en compte le balayage transversal des différents aéronefs ($S_{bal} = 0$ pour cet exemple). Le dommage au sommet du sol par type d'aéronefs, au décollage et à l'atterrissage ainsi que le dommage cumulé sont fournis pour chaque structure dans le tableau 52 ci-dessous (les dommages pour la structure 1 sont donnés à titre d'information).

Aéronefs du trafic projet		Structure 1	Structure 2	Structure 3
TU 134A	Décollage	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	Atterrissage	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	Décollage	0,153	0,056	0,087
FORKER F100 SID	Atterrissage	0,153	0,056	0,087
Dommage cumulé		0,305	0,112	0,174

Tableau 52: Calcul du dommage cumulé et de la contribution de chaque aéronef au sommet du sol support (3).

Les structures 2 et 3 vérifient les deux critères de dimensionnement; elles sont toutes les deux acceptables d'un point de vue mécanique. Cependant, la deuxième itération conduisant à la structure 3 a permis d'optimiser les épaisseurs de matériaux à mettre en place par une diminution de l'épaisseur de GNT par rapport à la structure 2. On retiendra la structure ayant les valeurs de dommage les plus proches de 1 par valeurs inférieures. La structure 3 est donc considérée comme le résultat du dimensionnement mécanique. La figure 34 présente les courbes de variation de dommage le long du profil transversal de la piste pour cette structure.



Figure 34: Structure 3 – Profils transversaux de dommage en fatigue à la base de la grave bitume (vert) et en déformation permanente au sommet de la plate-forme (bleu) (2)

8.4.3. Vérification spécifique aux aires de stationnement

Les parkings font l'objet d'une vérification complémentaire pour le dimensionnement mécanique afin de tenir compte du caractère statique des sollicitations (cf. paragraphe 3.2.4).

Pour effectuer cette vérification, les couches de base et de surface de la structure retenue sont modélisées comme des graves non traitées associées à un module de 800 MPa. Concernant la plate-forme, seule la valeur du paramètre K est modifiée et portée à K = 24000.



Figure 35 : Profil transversal de dommage en déformations permanentes au sommet de la plate-forme pour la vérification spécifique aux aires de stationnement et d'attente.

La vérification consiste à calculer l'endommagement par déformations permanentes au sommet de la plateforme avec cette structure modifiée et avec le trafic initial. L'endommagement doit être inférieur à 1.

La figure 35 montre le profil transversal déterminé à l'aide d'un logiciel de calcul respectant les principes énoncés dans ce guide.

Cette figure montre que les endommagements restent bien inférieurs à 1, la valeur maximale étant de 0,19. La vérification statique est donc bien validée pour cette structure 3.

8.4.4. Conclusion

On notera que pour cet exemple, le critère de fatigue des enrobés bitumineux est dimensionnant.

La structure finalement retenue est celle qui permet de vérifier les deux critères de dimensionnement tout en optimisant les épaisseurs de couches: traction à la base du matériau EB-GB3 et déformation verticale au sommet du sol support. Cette structure satisfait aussi la vérification spécifique aux aires de stationnement.

Il s'agit de la structure 3 avec mise en œuvre de 6 cm de EB-BBA 2 + 13 cm de EB-GB 3 + 34 cm de GNT de catégorie 2.

Il convient finalement de vérifier que cette structure dispose d'une épaisseur de couche de base suffisante à l'aide de la figure 36 ci-dessous.



Figure 36: Vérification de l'épaisseur d'enrobé pour la structure retenue (3)

L'épaisseur de couche de base de la structure retenue est de 13 cm, ce qui est suffisant par rapport à la valeur indicative de la figure ci-dessus pour RseR = 15,9 t, à savoir 10,4 cm. L'épaisseur retenue convient donc bien.

8.5. Exemple de vérification au gel-dégel

8.5.1. Données

Une vérification au gel-dégel est effectuée dans cette partie pour la structure dimensionnée au paragraphe 8.2. Il s'agit d'un dimensionnement de voie de circulation dans une zone à climat continental (type 3) avec une température équivalente de $\theta_{eq} = 15^{\circ}$ C.

Il est choisi pour cet exemple de vérifier la structure pour une **protection totale**, ce qui signifie que la profondeur de gel correspondant à l'hiver rigoureux exceptionnel ne doit pas atteindre les couches gélives du sol support ($Q_g = 0$).

On considère pour cet exemple la structure suivante, correctement dimensionnée mécaniquement :

- ▶ 6 cm de EB-BBA 2,
- 11 cm de EB-GB 3,
- 36 cm de GNT de catégorie 1.

La structure de chaussée repose sur une PF2 constituée d'un limon argileux surmonté d'une couche de forme en grave alluvionnaire (classée D21) non traitée et non gélive (SGn) d'épaisseur 50 cm.

L'essai de gonflement au gel pour le limon argileux donne une valeur de pente $p = 0,3 \text{ mm/(°C.h)}^{1/2}$. Ce sol est donc classé **peu gélif** (SGp).

La vérification est conduite selon la méthode exposée au chapitre 7.

8.5.2. Sensibilité au gel de la plate-forme

La protection thermique Q_{ng} apportée par les matériaux non gélifs de la couche de forme vaut :

$$Q_{ng} = \frac{A_n \times h_n^2}{h_n + 10} \text{ avec } A_n = 0,12 (°C.jour)^{1/2} cm^{-1} \text{ et } h_n = 50 cm$$

Soit $Q_{ng} = \frac{0.12 \times 50^2}{50 + 10} = 5(°C.jour)^{1/2}$

La quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme de la chaussée vaut donc :

$$Q_{PF} = Q_{ng} + Q_g = 5(^{\circ}C.jour)^{1/2}$$

8.5.3. Protection thermique apportée par la structure de chaussée

On considère un indice de gel de référence correspondant à l'hiver rigoureux exceptionnel I_{HRE} = 200°C.jour.

$$Q_s = \sqrt{0, 7 \times (I_{HRE} - 10)} = 11, 5(^{\circ}C.jour)^{1/2}$$

Il est ainsi possible de déduire la quantité de gel Q_s transmise à la surface de la chaussée :

$$Q_s = (1 + a \times h) \times Q_t + b \times h$$
L'étape suivante est la détermination de la quantité de gel transmise au niveau de la plate-forme. Le calcul

$$h = \sum h_i = 6 + 11 + 36 = 53 \, cm$$

$$a = \frac{1}{h} \sum (a_i \times h_i) = \frac{1}{53} (0,008 \times 6 + 0,008 \times 11 + 0,008 \times 36) = 0,008 (°C.jour)^{1/2} \, cm^{-1}$$

$$b = \frac{1}{h} \sum (b_i \times h_i) = \frac{1}{53} (0,06 \times 6 + 0,06 \times 11 + 0,10 \times 36) = 0,099 (°C.jour)^{1/2} \, cm^{-1}$$

Et donc: $Q_t = \frac{Q_s - b \times h}{1 + a \times h} = \frac{11, 5 - 0,099 \times 53}{1 + 0,008 \times 53} = 4,41 (°C.jour)^{1/2}$

est réalisé ici avec la méthode simplifiée : Nous avons :

Dans cet exemple, nous avons: $\begin{cases} Q_t = 4,41 (^{\circ}C.jour)^{1/2} \\ Q_{PF} = 5(^{\circ}C.jour)^{1/2} \end{cases}$, l'inégalité est donc bien vérifiée.

8.5.4. Conclusion

Pour une protection totale, nous devons vérifier la condition suivante : $Q_l < Q_{PF}$

La structure de chaussée **est donc bien vérifiée au gel-dégel** pour une protection totale pour la zone et l'indice de gel considérés.

MÉTHODE RATIONNELLE DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES AÉRONAUTIQUES SOUPLES

GLOSSAIRE

I. Infrastructures aéronautiques

Accotement

Bande de terrain, bordant une chaussée, traitée de façon à offrir une surface de raccordement entre cette chaussée et le terrain environnant et de manière à ce qu'un aéronef sortant accidentellement de cette chaussée ne subisse pas de dommages structurels et que soient évitées les projections ou ingestions de corps étrangers par les groupes motopropulseurs.

Aérodrome

Un aérodrome est une surface (sur terre ou sur l'eau) destinée à être utilisée (en totalité ou en partie) pour l'arrivée, le départ des aéronefs et pour leurs évolutions.

Aéronef

Un aéronef est un moyen de transport capable d'évoluer au sein de l'atmosphère terrestre.

Aire de manœuvre

Partie d'un aérodrome à utiliser pour les décollages, les atterrissages et la circulation des aéronefs à la surface, à l'exclusion des aires de trafic.

Aire de mouvement

Partie d'un aérodrome à utiliser pour les décollages, les atterrissages et la circulation des aéronefs à la surface et qui comprend les aires de trafic (cf. figure 1).

Aire de trafic ou aire de stationnement

Aire, définie sur un aérodrome terrestre, destinée aux aéronefs pendant l'embarquement ou le débarquement des voyageurs, le chargement ou le déchargement de la poste ou du fret, l'avitaillement ou la reprise de carburant, le stationnement ou l'entretien.

Avion

L'avion est un type d'aéronef plus lourd que l'air, dont la sustentation en vol est assurée par une force aérodynamique appelée portance, créée par le mouvement de la voilure dans la masse d'air entraîné par un moteur ou un réacteur.

Hélicoptère

Lorsque l'aéronef est plus lourd que l'air, entraîné par un organe moteur dont la sustentation en vol est obtenue principalement par des réactions aérodynamiques sur des surfaces mobiles, on parle alors d'héli-coptère.

Mouvement

Un mouvement représente soit un décollage, soit un atterrissage.

Piste

Aire rectangulaire aménagée, sur un aérodrome terrestre, afin de servir au décollage et à l'atterrissage des aéronefs. Les grands côtés de ce rectangle sont appelés bords de piste, ses petits côtés extrémités de piste et son axe longitudinal, axe de piste.

Plate-forme d'attente ou aire d'attente

Aire définie, où les aéronefs peuvent être mis en attente ou dépassés pour faciliter la circulation à la surface (les aires de dégivrage et de lavage, les aires de point fixe peuvent être considérées comme des aires ou plates-formes d'attente).

Raquette de retournement

Aire aménagée en extrémité de piste destinée à faciliter le retournement des avions.

Raccordements (congés d'intersection/surlargeurs de virage)

Surface de raccordement, aménagée aux intersections de voies de circulation, qui permet à un aéronef d'y effectuer un changement de direction avec des marges de dégagement.

Rotation

Aller-retour d'un aéronef, équivaut à deux mouvements (décollage et atterrissage) en termes de trafic.

Sortie de piste

Surface aménagée au droit d'une voie de circulation qui permet aux aéronefs d'accéder à la piste ou de la quitter.

ΤίΓΟΙΓ

Portion de piste comprise entre le seuil décalé et l'extrémité de piste, utilisable au décollage.

Voie de circulation

Voie, définie sur un aérodrome terrestre, aménagée pour la circulation à la surface des aéronefs et destinée à assurer la liaison entre les différentes parties de l'aire de mouvement.

Voie de desserte

Voie de circulation qui borde ou traverse les aires de trafic.

II. Structures de chaussées

Arase des terrassements

Surface de la partie supérieure des terrassements (PST) supportant la couche de forme (dans le cas où elle est présente). Les classes d'arase (PSTi/ARi) sont définies dans le GTR en fonction de la nature des matériaux constituant la PST et de l'environnement hydrique.

Assise de chaussée

Élément structurel principal d'une chaussée. L'assise peut être mise en œuvre en une ou plusieurs couches appelées couche de base et couche de fondation.

Chaussée

Structure composée d'une ou plusieurs couches destinée à assurer le passage de la circulation sur le terrain sans endommagement du sol support.

Couche

Élément structurel d'une chaussée, composé d'un seul produit normalisé. Une couche peut être répandue en une ou plusieurs couches élémentaires.

Couche de base

Couche de chaussée située entre la couche de fondation et la couche de surface.

Couche élémentaire

Élément de chaussée mis en œuvre en une seule opération.

Couche de fondation

Couche de chaussée reposant sur le sol support ou sur la couche de forme lorsqu'elle celle-ci est présente.

Couche de forme

Couche située entre la PST et les couches de chaussées, permettant d'homogénéiser les caractéristiques, d'atteindre et de pérenniser les performances géométriques, mécaniques, hydrauliques et thermiques prises comme hypothèses dans la conception et le calcul de dimensionnement de la chaussée. La couche de forme peut être constituée de matériaux en place ou rapportés, traités ou non traités.

Couche de liaison

Couche de chaussée entre la couche de roulement et l'assise. Une couche de liaison n'est pas systématiquement mise en œuvre pour les chaussées aéronautiques.

Couche de surface

La couche de surface peut être mise en œuvre en une ou plusieurs couches appelées couche de roulement et couche de liaison.

Couche de roulement

Couche supérieure de la chaussée en contact avec les pneumatiques des aéronefs.

Interface

Surface de contact entre deux couches de chaussées de même nature ou de nature différente. Dans la méthode de dimensionnement, le fonctionnement mécanique des interfaces peut être de type collé, glissant ou semi-collé en fonction des matériaux en contact. Pour les cas de dimensionnement de chaussées neuves, celle-ci est supposée collée. Les interfaces sont aussi supposées fermées, c'est-à-dire à contact bilatéral.

Interface collée

Liaison entre deux couches pour laquelle l'ensemble des déplacements et des déformations est supposé continu dans le plan de l'interface.

Interface glissante

Liaison entre deux couches pour laquelle les contraintes de cisaillement horizontales sont supposées nulles. Les déformations dans le plan de l'interface sont alors discontinues.

Interface semi-collée

Liaison entre deux couches fondées conventionnellement sur l'hypothèse de calcul correspondant à la demi-somme des résultats obtenus successivement avec interface collée et interface glissante.

Plate-forme de chaussée ou plate-forme

Surface de la couche de forme supportant les couches de chaussées. Dans le cas où la couche de forme n'est pas présente, la plate-forme se confond avec l'arase de terrassement.

Structure de chaussée

Ensemble de couches superposées de matériaux reposant sur la plate-forme de chaussée, destinées à répartir sur le sol naturel les efforts dus à la circulation des aéronefs.

Structures souples

Structures de chaussée composées d'une couche de surface et d'une couche de base en matériaux bitumineux; la couche de fondation étant en grave non traitée.

Sollicitations

Contraintes ou déformations élastiques issues du calcul de la structure de chaussée.

Sollicitation admissible de contrainte ou de déformation dans une couche de chaussée

Intensité de contrainte ou de déformation élastique dans une couche de chaussée, à ne pas dépasser.

III. Paramètres utilisés pour le dimensionnement des chaussées

Durée de vie

Durée comprise entre la mise en œuvre de la chaussée (chaussée neuve) et sa destruction (état de la chaussée la rendant impropre à l'usage prévu).

Période de calcul - Durée initiale de calcul

Durée ou période choisie pour le calcul de dimensionnement de la structure de chaussée.

Risque

Espérance, au sens des probabilités, du linéique de chaussée à reconstruire r (%) à l'issue de la période de calcul, en l'absence de toute intervention d'entretien structurel.

Roue Simple Équivalente Rationnelle (RseR)

La RseR associée à un trafic d'aéronefs et à une structure de chaussée est la charge simple non balayante (en tonnes) appliquée 10000 fois sur la structure avec une empreinte au sol de rayon égal à 0,20 m, qui donne la même valeur d'endommagement par fatigue des enrobés que l'ensemble du trafic.

Trafic

Le trafic correspond aux nombres de mouvements, types et masses des aéronefs susceptibles de circuler sur la chaussée aéronautique au cours de la période de calcul.

Trafic cumulé

Nombre de passages d'un type d'aéronef circulant dans l'aire de mouvement durant la période de calcul.

Trafic dimensionnant

Partie du trafic dont le ou les aéronef(s) influencent directement le dimensionnement de la structure de chaussée en raison de leur masse importante et/ou de leur nombre de passages cumulés sur la période de calcul.

IV. Paramètres utilisés pour la vérification au gel/dégel

Indice de gel

Indice lié, pour un lieu et une période donnés, à la valeur absolue de la somme des températures moyennes journalières négatives. Il s'exprime en degrés Celsius par jour (°C.jour), La méthode de calcul de l'indice de gel est développée dans la norme NF P 98-080-1 [34].

Quantité de gel

Racine carrée de l'indice de gel.

Quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme

Somme de la protection thermique apportée par les matériaux gélifs du sol support et par l'éventuelle couche de forme, situés au-dessus de la première couche du sol support, et de la quantité de gel admissible en surface de la première couche gélive.

Sensibilité au gel

Grandeur caractérisant le comportement d'un sol ou d'un matériau granulaire aux effets du gel/dégel. Elle est appréciée par l'essai de gonflement au gel, selon la norme NF P 98-234-2 [22].

V. Concepts utilisés pour le dimensionnement des chaussées

Lois d'endommagent (ou loi de dommage) des matériaux bitumineux et des matériaux non liés

Les lois de dommage permettent de traduire l'évolution de l'état des matériaux en fonction de leurs historiques de sollicitation et de déterminer les critères de dimensionnement. Dans le cas des matériaux bitumineux, le mécanisme pris en compte est le phénomène de fatigue par (pré-) fissuration en traction. Dans le cas des matériaux non liés, le mécanisme pris en compte est l'accumulation de déformations permanentes sous compression répétée. Dans les deux cas, les lois de dommage sont traduites par la combinaison des lois de Wöhler (dommage sous sollicitations répétées d'amplitude constante) et de Miner (loi de cumul de dommage dans le cas de sollicitations d'amplitude variable). Seul change la nature des sollicitations (contrainte ou déformation réversible) pilotant les phénomènes et les valeurs numériques des paramètres de ces lois.

Niveau de service

Ensemble des exigences définies par le maître d'ouvrage afin d'assurer certaines conditions d'accès aux usagers. Ces exigences sont liées notamment à l'importance de l'aérodrome, à la politique socioéconomique, etc.

VI. Paramètres issus du GAN [3]

Classe de trafic

Paramètre caractérisant une zone aéronautique en fonction du groupe de l'avion le plus contraignant qui la fréquente et de la fréquence de ce dernier (nombre journalier de passages de l'aéronef).

Pression gonflage x roues (MPa) Fréquence (F)*	Aviation légère Masse totale avion < 5 700 kg	P x R < 2	$2 \le P x R < 4,1$	$4,1 \le P x R < 5,5$	$5,5 \le P x R$
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
F < 10 mvts/j**	CT1	CT2	CT2	СТЗ	CT4
10 mvts/j $\leq F \leq$ 100 mvts/j	CT1	CT2	СТЗ	CT4	CT5
F > 100 mvts/j	CT1	CT2	CT4	CT5	CT5

*un passage correspond à un mouvement dû soit à un atterrissage soit à un décollage **si F > 1 mouvement par jour de passage, la classe de trafic déterminée est retenue pour l'ensemble des aires (de manœuvre et de trafic).

Si $F \le 1$ mouvement par jour, la classe de trafic n'est retenue que pour l'aire de trafic et la classe de trafic de l'aire de mouvement est déterminée par les autres avions accueillis sur la plate-forme.

Tableau 53 : Définition des classes de trafic

Groupe d'un aéronef

Notion faisant intervenir deux variables représentatives de l'impact d'un aéronef sur une chaussée : la pression (P) de gonflage des pneumatiques et le nombre de roue (R) de l'atterrisseur principal. Les groupes sont définis de la façon suivante :

- Groupe 1: Pas de valeur. Comprend tous les avions dits d'aviation légère dont la masse totale est inférieure à 5700 kg et la pression des pneumatiques est inférieure à 0,9 MPa.
- ▶ Groupe 2: (P xR) < 2 MPa
- Groupe 3: MPa \leq (PxR) \leq 4,1 MPa
- ▶ Groupe 4: 4,1 MPa ≤ (PxR) < 5,5 MPa
- Groupe 5: 5,5 MPa \leq (PxR)

Niveau de sollicitation NSi

Paramètre caractérisant le degré de sollicitation d'une zone aéronautique en fonction du type de climat et de la classe de trafic.

Classe de trafic Climat	CT1	CT2	СТЗ	CT4	CT5
Océanique		N\$1	NS2	NS3	
Continental	N\$1	1431	1102	1105	NS4
Méditerranéen	1101	NCO	NS3	NS4	
Tropical		1132			

Tableau 54: Définition des niveaux de sollicitation

Références bibliographiques

Documentation générale

- [1] « Conception et dimensionnement des structures de chaussées », Guide technique SETRA LCPC, décembre 1994.
- [3] Guide d'application des normes (GAN), « Enrobés hydrocarbonés et enduits superficiels pour chaussées aéronautiques », STAC, avril 2009.
- [4] Guide technique « Dimensionnement des chaussées, volume 1, STBA, 1983.
- [5] Arrêté TAC: Arrêté du 10 juillet 2006 relatif aux caractéristiques techniques de certains aérodromes terrestres utilisés par les aéronefs à voilure fixe et son annexe 1: Annexe technique n° 1 relative aux caractéristiques physiques des aérodromes civils utilisés par les aéronefs à voilure fixe.
- [6] Guide technique « Chaussées aéronautiques en béton hydraulique », STBA, 2000.
- [7] Étude sur la capacité portante des accotements pour avions gros porteurs, STAC, 2006. Document téléchargeable sur le site internet du Service Technique de l'aviation Civile (www.stac.aviation-civile.gouv.fr).
- [10] Note sur l'organisation des reconnaissances géotechniques des tracés routiers et autoroutiers (1981) ministère de l'équipement.
- [11] « Réalisation des remblais et des couches de forme » (GTR) Guide technique, LCPC SETRA, 2000 (2ème édition).
- [12] « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques » (GTS) Application à la réalisation des remblais et des couches de forme - Guide technique, janvier 2000.
- [14] Guide technique « Conception et dimensionnement des réseaux de drainage des aérodromes », STBA, 2000.
- [15] Guide « Drainage routier », 2006, LCPC-SETRA.
- [16] Note d'information SETRA N° 120 « Apport du drainage dans la conception des plates-formes support de chaussées, complément au guide drainage routier et aux guides relatifs aux terrassements », 2009.
- [21] « A380 Pavement Experimental Program », technical report, LCPC/Airbus/STBA, 2001.
- [22] « High Tire Pressure Test », technical report, Airbus, 2010.
- [23] OACI Annexe 14 Volume I, « Conception et exploitation technique des aérodromes », Convention de Chicago 1982.
- [27] Note d'information SETRA N° 114 « Eléments techniques pour la conception et la réalisation de planches d'essais de compactage dans les chantiers de terrassements », 2005.
- [30] Note d'information SETRA N° 118 « Eléments clés de l'assurance qualité des couches de formes traitées », 2009.
- [38] Guide technique « organisation de l'assurance qualité dans les terrassements », LCPC-SETRA, 2000.

Normes

- [2] NF P 98-086: Dimensionnement structurel des chaussées routières Application aux chaussées neuves, octobre 2010.
- **[8]** NF P 94-500: Missions d'ingénierie géotechnique Classification et spécifications, 2000.
- [9] NF EN 1997-2: Eurocode 7 calcul géotechnique Partie 2: reconnaissance des terrains et essais, 2007.
- [13] NF P11-300: Exécution des terrassements Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, 1992.
- [17] NF EN 13108 (série de normes).
- [18] NF EN 13-285: Graves non traitées Spécifications, 2010.
- [19] NF EN 12697-24: Mélanges bitumineux Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 24: résistance à la fatigue, 2007.
- [20] NF EN 12697-26: Mélanges bitumineux Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 26: module de rigidité, 2004.
- [24] NF P 98-234-2: Essais relatifs aux chaussées Comportement au gel Partie 2: essai de gonflement au gel des sols et matériaux granulaires traités ou non de D inférieur ou égal 20 mm, 1996.
- **[25]** NF P 18-545: Granulats Éléments de définition, conformité et codification, 2011.
- [26] NF EN 13-242: Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées, 2008.
- [28] NF P 94-117-1: Sols: reconnaissance et essais Portance des plates-formes Partie 1: module sous chargement statique à la plaque (EV2), 2000.
- [29] NF P 94-117-2: Sols: reconnaissance et essais Portance des plates-formes Partie 2: module sous chargement dynamique, 2004.
- [31] NF EN 12697-25: Mélanges bitumineux Méthodes d'essais pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 25: essai de compression cyclique, 2005.
- [32] NF EN 13108-20: Mélanges bitumineux Spécifications des matériaux Partie 20: épreuve de formulation, 2006.
- [33] NF EN 13108-1: Mélanges bitumineux Spécifications des matériaux Partie 1: enrobés bitumineux, 2007.
- [34] NF EN 13108-2: Mélanges bitumineux Spécifications des matériaux Partie 2: béton bitumineux très minces, 2006.
- [35] NF EN 13286-7: Mélanges avec ou sans liant hydraulique Partie 7: essai triaxial sous charge cyclique pour mélanges sans liant hydraulique, 2004.
- [36] NF P 98-080-1: Chaussées Terrassement Terminologie Partie 1: terminologie relative au calcul de dimensionnement des chaussées, 1992.
- [37] NF P 98-114-3: Assises de chaussées Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques - Partie 3: Sols traités aux liants hydrauliques éventuellement associés à la chaux, 2001.
- [39] NF P98-200-1 : Essais relatifs aux chaussées Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 1 : définitions, moyens de mesure, valeurs caractéristiques, 1991.

Symboles et abréviations

Les symboles et abréviations sont classés par thématiques :

- Général
- Dimensionnement mécanique
- Trafic
- Support de chaussée
- Matériaux
- Gel-dégel

Général

- ACN aircraft classification number
- CBR california bearing ratio
- CCTP cahier des clauses techniques particulières
- GAN guide d'application des normes
- GTR guide de terrassement routier
- GTS guide de traitement des sols
- HTPT high tire pressure test
- IFSTTAR institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (ex. LCPC)
- LCPC laboratoire central des ponts et chaussée
- OACI organisation de l'aviation civile internationale
- PCA portland cement association
- PCN pavement classification number
- PEP pavement experimental program
- RESA runway end safety area
- SETRA service d'étude des transports, des routes et de leurs aménagements
- **STAC** service technique de l'aviation civile (ex STBA)
- STBA service technique des bases aériennes

Dimensionnement mécanique

- *b* pente de la loi d'endommagement
- β paramètre de la loi d'endommagement ($\beta = -1/b$)
- c coefficient associant la variation de déformation à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée Δh (m⁻¹)
- △*D* endommagement élémentaire créé par un cycle de sollicitation
- ΔD_{bal} endommagement élémentaire avec prise en compte du balayage créé par un cycle de sollicitation
- $\Delta D_{bal, \ cumul\acute{e}}$ endommagement cumulé sur la période de calcul pour l'ensemble du trafic

ΔD_{max} , cumulé	maximum des endommagements cumulés de l'ensemble des critères pris en compte
e:	épaisseur minimale de couche de base (m)
E E	module élastique (MPa)
Ε Ε (θ. f)	norme du module complexe à la température θ et à la fréquence f (MPa)
£	amplitude de la déformation horizontale en traction/compression
E	amplitude de la déformation verticale en compression
$\mathcal{E}_{6}(\theta, f)$	déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion sur éprouvette est obtenue au bout de 10 ⁶ cycles avec une probabilité de 50 %, à la température θ et la fréquence f
$\overline{\mathcal{E}}_6$	déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion sur éprouvette est obtenue au bout de 10° cycles avec une probabilité de 50 %, à 10°C et 25 Hz
f	fréquence (Hz)
h _i	épaisseur de la couche de matériaux <i>i</i> (m)
h _{sub}	profondeur à laquelle est situé le substratum rigide (comptée à partir de l'arase des terrassements) (m)
k	coefficient multiplicateur du module des GNT
$k_{\theta f}$	coefficient de correction en fréquence et température
k _r	coefficient de correction prenant en compte le risque et des facteurs de dispersion
k _s	coefficient de prise en compte d'hétérogénéités locales de portance de la couche non liée sous-jacente aux couches bitumineuses
<i>k</i> _c	coefficient de calage
Κ	paramètre de la loi d'endommagement
N	nombre de cycles conduisant à la rupture
Naéronef	nombre de passages d'un aéronef
n _b	nombre de trajectoires prises en compte pour le calcul de dommage avec balayage
v	coefficient de Poisson
Р	point de la grille de calcul de coordonnées (x_i , y_j , z_k)
$(P_j)_b$	proportion du trafic circulant sur la trajectoire d'ordonnée $(y_j)_{ m b}$
P_m	probabilité de passage de l'aéronef considéré associé au profil de température $ heta_m(\mathbf{z})$
r	risque de calcul (%)
$R(\theta, f)$	rapport indiquant la sensibilité à la température et la fréquence d'un enrobé bitumineux
s _{max}	amplitude maximale de la sollicitation
S_N	écart-type sur le logarithme du nombre de cycles entraînant la rupture par fatigue
S_h	écart-type sur l'épaisseur de la couche de matériau mise en œuvre (m)
S _{bal}	écart-type sur la distribution latérale du trafic (balayage)
θ	température de calcul (°C)
θ_{eq}	température équivalente (°C)
$\theta_m(z)$	profil vertical de température (°C)
и	variable aléatoire de la loi normale centrée réduite associée au risque r
(y _j) _b	ordonnées des trajectoires prises en compte pour le calcul de dommage avec balayage (m)

Trafic

CTi	classe de trafic <i>i</i> (cf. GAN)
NSi	niveau de sollicitation <i>i</i> (cf. GAN)
V	vitesse de déplacement des aéronefs (km/h)
Mrw	masse maximale au roulage (t)
Mtow	masse maximale au décollage (t)
Mlw	masse maximale à l'atterrissage (t)
Mzfw	masse maximale à vide en ordre d'exploitation (t)
P r _j	charge à la roue la plus importante pour l'aéronef <i>j</i> (t)
P r _{max}	charge à la roue la plus importante de tout le trafic (t)
<i>n</i> _j	nombre de passages de l'aéronef j

- n_{tot} nombre de passages total de tous les aéronefs
- *p*_j pourcentage de trafic cumulé de l'aéronef *j* rapporté au trafic cumulé total
- r_i ratio déterminant le caractère dimensionnant ou non d'un aéronef
- *RseR* roue simple équivalente rationnelle (t)

Support de chaussée

- ARi classe de portance à long terme de l'arase de terrassement
- PFi classe de portance à long terme de la plate-forme support de chaussée
- PST partie supérieure des terrassements

Matériaux-essais

- **BBA** béton bitumineux aéronautique
- **BBSG** béton bitumineux semi-grenu
- **BBME** béton bitumineux à module élevé
- **BBM** béton bitumineux mince
- **BBTM** béton bitumineux très mince
- *EB* enrobé bitumineux
- *ECF* enrobé coulé à froid
- *EP* enrobé percolé
- *ESU* enrobé superficiel d'usure
- *EME* enrobé à module élevé
- *GB* grave bitume
- *GNT* grave non traitée
- GRH grave reconstituée humidifiée
- I_p indice de plasticité

- *IPI* indice portant immédiat
- ICBR indice CBR après immersion
- MAER machine asservie d'essais rhéologiques
- OPM optimum proctor modifié
- OPN optimum proctor normal
- PCG presse à cisaillement giratoire
- *R_c* résistance en compression
- *R_t* résistance en traction directe
- $ho_{d_{OPN}}$ masse volumique du sol sec, à l'optimum proctor normal
- SMA stone mastic asphalt
- TCR triaxial à chargements répétés
- *VBS* valeur au bleu de méthylène d'un sol
- *w*_{OPN} teneur en eau à l'optimum proctor normal
- *w_{OPM}* teneur en eau à l'optimum proctor modifié

Gel-dégel

- a_i coefficient caractéristique du matériau i
- A_i coefficient associé aux matériaux non gélifs
- **b**_i coefficient caractéristique du matériau i
- *HRE* hiver rigoureux exceptionnel
- *HRNE* hiver rigoureux non exceptionnel
- SGn classe de matériaux non gélifs
- SGp classe de matériaux peu gélifs
- SGt classe de matériaux très gélifs
- ▶ p pente de l'essai de gonflement au gel (mm/(°C.heure)^½)
- *h* épaisseur du corps de chaussée (cm)
- h_i épaisseur de la couche de chaussée *i* (cm)
- h_n épaisseur de la tranche supérieure de sol non gélif (cm)
- I indice de gel atmosphérique (°C.jour)^{1/2}
- Q_s quantité de gel transmise à la surface de la chaussée (°C.jour)^{1/2}
- Q_t quantité de gel transmise au niveau de la plate-forme (°C.jour)^{1/2}
- Q_g quantité de gel admissible en surface d'une couche gélive (°C.jour)^{1/2}
- Q_{ng} protection thermique apportée par les matériaux non gélifs du sol support et de la couche de forme (°C.jour)^{1/2}

Annexe A : La loi continue de Wölher-Miner

La loi continue de Wölher-Miner permet la prise en compte de groupements de charges roulantes (boggies), générant dans la chaussée des historiques de déformation complexes (souvent multi-pics et sans retour à zéro entre pics) pour lesquels la notion de cycle de sollicitation ne peut être véritablement appliquée.

$$\dot{D} = \beta \frac{<\varepsilon(t)>^{\beta-1}}{K^{\beta}} < \dot{\mathcal{E}}(t) >$$

Cette loi continue d'évolution de l'endommagement s'exprime sous la forme : avec :

D = vitesse d'accroissement de l'endommagement

 $\mathcal{E}(t)$ = intensité à l'instant t, de la sollicitation de la loi de Wöhler afférente

 $\mathcal{E}(t)$ = dérivée temporelle de $\mathcal{E}(t)$

< x > = partie positive du scalaire x; < x > = x si $x \ge 0$, < x > = 0 sinon.

Commentaires:

i) la considération de la partie positive de $\mathcal{E}(t)$ permet de donner un sens mathématique au terme $\langle \mathcal{E}(t) \rangle \beta^{-1}$ (la condition $\beta > 1$ assure en plus la définition de ce terme pour $\mathcal{E}(t) \leq 0$) et rend compte pour les matériaux bitumineux du fait physique que leur endommagement se produit essentiellement en extension; pour les matériaux granulaires non liés, les calculs du champ de déformation décrits à l'étape 1 conduisent a priori à des valeurs $\mathcal{E}_{zz max}$ par tour en contraction, donc positives.

ii) la considération de la partie positive de $\mathcal{E}(t)$ permet quant à elle d'assurer le caractère toujours croissant des dommages¹³ et de lier leurs accroissements aux accroissements d'intensité de la sollicitation.

iii) le temps *t* physique ne joue pas de rôle explicite dans cette équation, qui peut être réécrite sous forme

$$dD = \beta \frac{\langle \varepsilon \rangle^{\beta - 1}}{K^{\beta}} \langle d\varepsilon \rangle$$

différentielle :

N'importe quel autre paramétrage monotone croissant du temps conduirait après intégration aux mêmes valeurs de dommage.

iv) il est vérifié que dans le cas d'une sollicitation croissant de 0 à \mathcal{E}_{max} , puis décroissant, le dommage prédit

$$\Delta D = \frac{1}{N(\varepsilon_{\max})} = \left(\frac{\varepsilon_{\max}}{K}\right)^{\beta}$$

par cette loi d'évolution coïncide avec l'expression du dommage élémentaire de la loi de Wöhler-Miner : La loi continue constitue donc bien une extension de la loi « discrète » de départ.

¹³ La méthode de dimensionnement ne tient pas compte explicitement tout au moins d'éventuels effets d'auto-réparation dans les enrobés bitumineux. Ces effets font par contre peut-être implicitement partie prenante du coefficient d'ajustement kc.

Annexe B : Calcul de la distribution de trafic en un point donné

Soit *y* la perpendiculaire à la voie de circulation. La distribution normale centrée du balayage est discrétisée par la suite finie de trajectoires $(y_j)_b$ avec $b \in \{1..n_b\}$ où n_b désigne le nombre total de trajectoires considérées pour le calcul (pas de discrétisation transversale $\Delta y = 5 \text{ cm}$).

Le pourcentage de trafic $(P_j)_b$ de l'avion considéré, associé à la position $(y_j)_b$ selon la distribution normale d'écart type S_{bal} supposée connue est calculé de la façon suivante :

$$(P_j)_b((y_j)_b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{y_1}^{y_2} e^{-y^2/2} dy = \phi(y_2) - \phi(y_1)$$

Avec la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite :

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-y^{2}/2} dy$$

Où
$$y_1 = \frac{(y_j)_b - \frac{\Delta y}{2}}{S_{bal}}$$
 et $y_2 = \frac{(y_j)_b + \frac{\Delta y}{2}}{S_{bal}}$

 S_{bal} est l'écart type et Δy est le pas de discrétisation,

Le graphique ci-dessous représente la distribution du trafic (selon une distribution gaussienne normale centrée, d'écart type S_{bal}). Le pourcentage de trafic $(P_j)_b$ de l'avion considéré, associé à la position $(y_j)_b$ est représenté par la partie en bleu.



Figure B1: Distribution latérale du trafic

Annexe C: Paramètres S_N , S_h , r et coefficient de risque k_r

C1. Le paramètre S_N

Si le processus d'élaboration des matériaux de chaussées et les précautions prises à la mise en œuvre permettent de limiter certaines variations de leurs caractéristiques mécaniques, le développement de l'endommagement par fatigue garde un caractère aléatoire dont témoigne la dispersion des résultats d'essais de fatigue sur éprouvettes en laboratoire. Cette dispersion est considérée suivre une loi de probabilité normale d'écart type S_N dont les valeurs sont précisées dans le chapitre 6.

C2. Le paramètre S_h

Le coefficient S_h permet de tenir compte de la variabilité de l'épaisseur et de la compacité des couches de chaussées à la construction. Cette dispersion, qui dépend des méthodes d'exécution et de la qualité des travaux, est considérée suivre une loi de probabilité normale d'écart type S_h dont les valeurs sont précisées dans le chapitre 6.

C3. Le risque de calcul r

Le risque de calcul r représente l'espérance, au sens des probabilités, du linéique de chaussée à reconstruire en l'absence de travaux de renforcement à l'issue de la période de calcul.

Pour le besoin des calculs de dimensionnement, la valeur de risque r est traduite en terme de fractile u de loi normale, en considérant r comme une variable aléatoire à loi normale centrée réduite:

$$r = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{u} e^{\frac{-x^2}{2}} dx$$

Les principales valeurs de *u* associées au risque *r* sont définies dans le tableau C1 ci-dessous.

r (%)	и	r (%)	и	r (?
1	- 2,326	5,6	- 1,590	23
1,5	- 2,170	7,5	- 1,439	24
2	- 2,054	10	- 1,282	25
2,5	- 1,960	11,5	- 1,200	30
2,8	- 1,911	12	- 1,175	35
3	- 1,881	15	- 1,036	40
5	- 1,645	20	- 0,842	50

Tableau C1: Valeurs de u associées au risque r

C4. Coefficient de risque k_r

Le coefficient de risque k_r est défini en fonction des écarts types S_N et S_h et du risque de calcul r associé à la valeur de la variable centrée réduite notée u.

Les dispersions sur les propriétés mécaniques des matériaux (écart type S_N) et sur les épaisseurs de couches de chaussées (écart type S_h) étant supposées suivre des lois normales indépendantes, la loi résultante est une loi normale.

Le coefficient d'ajustement k_r est défini par :

$$k_r = 10^{-ubb}$$

Le risque de calcul r est l'intégrale de la densité de probabilité de la variable log(N) réduite. L'écart-type, δ , associé à la variable log(N), se déduit de la combinaison des facteurs de dispersion sur la loi de fatigue et sur l'épaisseur des couches, par la relation:

$$\delta = \sqrt{S_N^2 + \left(\frac{c\,S_h}{b}\right)^2}$$

avec

• u: valeur de la variable aléatoire de la loi normale centrée réduite associée au risque r. La relation entre u et r ainsi que le tableau de passage de l'un à l'autre sont donnés dans le paragraphe C3,

▶ *b*: pente de la droite de fatigue du matériau de la couche considérée ($b = -\frac{1}{\beta}$), dont les valeurs, pour chaque classe de matériaux, sont fournies dans le chapitre 6 (-1 < *b* > 0),

 \triangleright S_N : écart type sur le logarithme décimal du nombre de cycles entraînant la rupture par fatigue dont les valeurs, pour chaque classe de matériaux, sont fournies dans le chapitre 6,

 \triangleright S_h : écart type sur l'épaisseur des couches d'assises de matériaux mises en œuvre exprimé en mètres dont les valeurs, pour chaque classe de matériaux, sont fournies dans le chapitre 6,

• c: coefficient associant la variation de déformation à la variation d'épaisseur ΔH de la couche bitumineuse (en m⁻¹) défini par la relation:

$$\log_{10}\left(\frac{\varepsilon_{t}\left(\Delta H+H\right)}{\varepsilon_{t}\left(H\right)}\right)=-c\,\Delta H$$

La valeur de c fixée à partir de l'étude de structures usuelles est de 2 m⁻¹.

Annexe D : Calcul de la température équivalente pour les matériaux bitumineux

La rigidité et le comportement en fatigue des matériaux bitumineux variant avec la température, les niveaux de sollicitation et d'endommagement de la chaussée fluctuent en cours d'année avec les cycles de température. Le concept de température équivalente permet de simplifier la prise en compte de ces situations variables par le recours à une seule température intervenant dans la détermination du module E^* et du coefficient $k_{\theta f}$.

Dans les situations courantes, une température unique est retenue quel que soit l'aéronef et est prise égale à 15°C ou 28°C selon le type de climat.

Dans les cas particuliers où ces conditions ne s'appliquent pas, il est possible de calculer une température équivalente à partir des histogrammes de température dans les chaussées par type d'aéronefs et pour chaque critère en suivant la méthode décrite ci-dessous.

La température équivalente θ_{eq} est telle que la somme des dommages subis par la chaussée circulée par l'aéronef considéré, pour la distribution annuelle de température du site considéré, soit égale au dommage que subirait la chaussée soumise au même trafic mais pour une température constante θ_{eq} .

La température équivalente se détermine par application de la règle de Miner.

Le calcul nécessite la connaissance pour chaque avion d'un histogramme $[\theta_m(z), p_m]$ où $\theta_m(z)$ est un profil vertical de températures et p_m la probabilité de passage de l'aéronef considéré associé à $\theta_m(z)$. Pour chaque situation thermique m, on peut calculer le dommage élémentaire avec balayage ΔD_{bal} conformément au paragraphe 2.5.4, et sommer ces valeurs affectées du coefficient p_m :

$$\Delta D_{bal}(y_j, z_k) = \sum_m p_m \times \Delta D_{bal}(y_j, z_k, \theta_m(z))$$

On recherche alors la température homogène θ_{eq} solution de l'équation :

$$\max_{y_j} \left\{ \Delta D_{bal}(y_j, z_k, \theta_{eq}) \right\} = \max_{y_j} \left\{ \sum_m p_m \times \Delta D_{bal}(y_j, z_k, \theta_m(z)) \right\}$$

Annexe E : Susceptibilités à la température et à la fréquence des enrobés bitumineux

Les courbes suivantes représentent le comportement typique des évolutions de rigidités de différents types d'enrobés en fonction de la température et de la fréquence de sollicitation. Elles sont issues de la synthèse de nombreux résultats d'essais de module complexe réalisés dans les laboratoires du Réseau Scientifique et Technique français, constituant une base de données conséquente.



Figure E1: Effet de la température sur les valeurs de modules des différents enrobés.



Comportement viscoélastique des enrobés - Effet fréquence

Figure E2 : Effet de la fréquence sur les valeurs de modules des différents enrobés.

Annexe F: Règles de dimensionnement des couches de forme

L'épaisseur de matériau de couche de forme nécessaire pour atteindre la classe de portance souhaitée de la plate-forme support de chaussée se détermine :

• en examinant l'incidence de l'épaisseur et de la qualité de la couche de forme sur les contraintes et déformations dans les couches de chaussée et le sol support,

> en vérifiant les sollicitations mécaniques atteintes dans les couches de forme en matériaux traités.

Cette analyse du fonctionnement de la chaussée en service doit être complétée par la considération de la tenue de la couche de forme non protégée par le corps de chaussée sous le trafic de chantier.

Ces règles, adaptées en fonction de la classification des sols du GTR [11], sont données ci-après et étendues à un ensemble plus vaste de situations. Les épaisseurs proposées découlent de calculs de mécanique des chaussées pour l'analyse du comportement de la chaussée en service et de constatations de chantier sur la tenue sous le trafic de chantier des couches de forme.

F.1. Couche de forme en matériau non traité

Le GTR [11] propose des épaisseurs de couche de forme en matériaux non traités (couche de forme granulaire) suivant les cas de PST et les classes d'arases définies par l'étude. Dans le cas général, sur les arases AR1 et AR2, ces épaisseurs permettent d'obtenir une plate-forme PF2.

Les règles de surclassement qui permettent d'obtenir une plate-forme PF3 à partir d'une arase de classe AR1 ou AR2, avec des épaisseurs plus importantes, sont données dans le tableau F1¹⁴.

Classe de l'arase	Matériau de la couche de forme	Épaisseur matériau de couche de forme	Classe de la plate-forme obtenue
ARI	B31, C1B31, C2B31, D21, D31, R21, R41, R61 C1B11*, C2B11*, R11*, R42*, R62*	0,80 m **	PF3**
AR2	idem case ci-dessus	0,50 m	

* sous réserve d'une vérification sur la plate-forme support de chaussée, Le module intrinsèque de certains matériaux granulaires ne permet pas toujours de garantir une PF3 avec l'épaisseur proposée, Dans ce cas, on est ramené à une solution de PF2⁹⁵ ** une réduction d'épaisseur de l'ordre de 0,10 à 0,15 m peut être admise si l'on intercale un géotextile adapté entre la couche de forme et la PST

Tableau F1: Conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme non traitée.

Commentaire:

Le surclassement en PF3 nécessite une vérification de la performance visée sur la plate-forme support de chaussée. Le module intrinsèque de certains matériaux granulaires ne permet pas toujours de garantir une PF3 avec l'épaisseur proposée. Dans ce cas, on est ramené à une solution de PF2^{qs}.

À défaut d'avoir l'expérience du matériau retenu, il est fortement recommandé de réaliser une planche d'essai pour vérifier que le module est bien obtenu avec le matériau et les conditions de mise en œuvre de l'entreprise retenue.

¹⁴ On se référera au GTR [11] pour les épaisseurs de couche de forme permettant d'atteindre PF2 à partir d'une arase AR1; l'épaisseur est variable selon le matériau de couche de forme et le cas de PST.

F.2. Couches de forme traitées à la chaux seule

Ce type de traitement n'est à envisager que pour les sols fins moyennement à fortement argileux (I_p mesurable ou VBS > 0,5) et dans les régions non ou peu concernées par le gel. Ce type de traitement ne permet normalement pas de dépasser la classe de plate-forme PF3.

Ce type de solution doit faire l'objet d'une étude spécifique de performances mécaniques, dite étude de formulation de niveau 1 du GTS [12]:

▶ Pour l'étude du comportement sous trafic, il convient de s'assurer de l'obtention de valeurs d'*IPI* et de I_{CBR} après 4 jours d'immersion telles que définies dans le chapitre C1-3,4 du GTS [12].

On doit ainsi vérifier le respect simultané des deux conditions suivantes :

$$I_{CBR} \ge 20$$
 et $I_{CBR} / IPI \ge 1$

▶ Pour l'étude du comportement au gel, le cas échéant, des essais à la compression simple sont effectués sur des éprouvettes compactées à 98,5 % de la $\rho_{d OPN}$ et fabriquées à w_{OPN} et conservées pendant une durée représentative de celle séparant la fin des travaux de la date probable d'apparition du gel sur le chantier considéré. La résistance en compression du sol traité doit alors vérifier :

$$R_c \ge 2,5 MPa$$

Il est à noter que dans la plupart des cas, le traitement à la chaux seul ne permet pas d'insensibiliser un sol initialement sensible au gel. En outre, si l'on dispose de résultats d'une étude de gonflement au gel spécifique, s'appuyant sur des essais de gonflement au gel réalisés suivant la norme NF P 98-234-2 [24], ceux-ci prévalent par rapport à la valeur de résistance indiquée et permettent d'optimiser la solution.

Enfin, une attention particulière doit être portée à la représentativité de l'échantillon soumis à l'essai, par rapport au linéaire concerné par la réponse donnée. Il est nécessaire de recommander une population de mesures en cohérence avec la variabilité des sols et de leur comportement par rapport au gel.

F.3. Couches de forme en matériaux traités aux liants hydrauliques éventuellement associés à la chaux

Les techniques de traitement des matériaux aux liants hydrauliques, éventuellement associés à la chaux, permettent, moyennant des conditions d'exécution et un dosage en liant adaptés, d'atteindre des performances mécaniques élevées et d'obtenir une plate-forme de classe PF3 voire PF4. L'épaisseur de la couche de forme à mettre en œuvre et le classement de la plate-forme dépendent:

- de la classe de portance du sol support,
- des caractéristiques mécaniques du matériau traité,
- du mode de traitement (en centrale ou en place).

Pour ce faire, le comportement du sol traité est à évaluer vis-à-vis de :

- l'âge autorisant la circulation sur la couche traitée,
- Ia résistance à l'immersion au jeune âge,
- ▶ la résistance au gel,
- les performances escomptables à long terme.

Ces paramètres doivent faire l'objet d'une étude de formulation de niveau 1 telle que définie dans le GTS [12], qui précise pour chacun d'eux des objectifs de performance :

1) Le matériau de couche de forme est ainsi qualifié par une "classe mécanique" déterminée à partir :

• de l'abaque de la figure F1 qui définit des zones selon les valeurs à 90 jours (ou éventuellement à 180 jours dans le cas de liants à prise lente) du module élastique *E* et de la résistance en traction directe $R_t = 0.8R_{thr}$ correspondant à la résistance mécanique en traction de la base de la couche de forme (l'étude est menée sur des éprouvettes compactées à 96% de la densité OPN, ce qui correspond à la compacité en fond de couche d'un matériau compacté à l'énergie de compactage q_3 au sens du GTS [12]),

▶ du tableau F2 relatif au mode de traitement pour tenir compte de différences dans l'homogénéité du matériau traité.



Figure F1: Classement des matériaux de couche de forme traités aux liants hydrauliques suivant leurs performances mécaniques à 90 jours.

Traitement en centrale	Traitement en place	Classe mécanique
Zone 1	-	1
Zone 2	-	2
Zone 3	Zone 2	3
Zone 4	Zone 3	4
Zone 5	Zone 4	5

Tableau F2: Détermination de la classe mécanique des sables et graves traitées aux liants hydrauliques selon le mode de traitement.

Le tableau F3 précise les épaisseurs de couche de forme à mettre en œuvre pour les différentes classes mécaniques de matériau traité, en vue de l'obtention des classes de plates-formes envisagées.

		Épaisseur de matériau de couche de forme (en cm)		
Classe mécanique du		Arase de c	classe AR1	Arase de classe AR2
matériau de	3	(*)	30	25
couche de forme	4	30	35	30
	5	35	50 (+)	35
Classe de plate	-forme obtenue	PF2	PF3	PF3

(*) En raison de l'importance du contraste des modules, la réalisation d'une couche de forme en matériaux traité de classe mécanique 3, sur une arase AR1, n'est pas autorisée en dessous d'une épaisseur de 30 cm. (+) L'obtention de la compacité recherchée en fond de couche conduira généralement à une mise en œuvre en 2 couches.

Tableau F3 : Classe de PF en fonction de la classe d'AR, des performances mécaniques du matériau traité et de l'épaisseur de la couche de forme.

Commentaires:

▶ a) Les classes de plate-forme ainsi obtenues permettent de définir un module élastique à long terme tel que défini dans le tableau 9 du chapitre 4 (par exemple E = 120 MPa pour une PF3).

b) Compte tenu des spécificités et des contraintes élevées associées aux sollicitations aéroportuaires, il n'est pas retenu de classe de plate-forme PF4 avec une couche de forme en matériaux traités aux liants hydrauliques.

2) L'étude de formulation associée au traitement envisagé doit s'accompagner, conformément au GTS [12] et à la norme NF P 98-114-3 « Assises de chaussées – Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques – partie 3 : Sols traités aux liants hydrauliques » [37] :

• D'indication sur les résistances aux jeunes âges (notamment en R_c) pour définir la période de cure avant la reprise du trafic sur la couche de forme. La cure permet de garantir la prise hydraulique. Pendant cette période, la moindre circulation de poids lourds est susceptible d'être néfaste au bon déroulement de la prise,

- D'indication sur la résistance au gel,
- D'indication sur les délais de maniabilité,
- D'indication sur les résistances à l'immersion.

Les modules et les hypothèses de dimensionnement de la plate-forme sont définis durant les études de conception détaillées (niveau 2). Le dosage et la nature du liant sont en général précisés dans le marché car ils auront fait l'objet d'études (niveau 1 et 2) qui auront permis d'optimiser la solution. Il peut être cependant admis dans le marché des adaptations dans le choix du liant et du dosage. Dans ce cas, il sera exigé de la part de l'entreprise, une étude d'exécution (de type G3 au sens de la norme NF P 94-500 [8]) qui permettra de valider les hypothèses de dimensionnement retenues. Cette étude sera menée pendant la phase de préparation du chantier ou pour le moins, quatre mois avant le démarrage de la tâche. On rappelle que le dimensionnement est validé sur la base des performances des matériaux traités à 90 jours.

Les performances spécifiées au marché devront être vérifiées par une planche de convenance, pour s'assurer qu'elles sont obtenues avec les moyens de l'entreprise dans des conditions normales de chantier et avec les matériaux agrées pour réaliser la couche de forme. La réception de la planche de convenance constituera un point d'arrêt avant la réalisation formelle de la couche de forme, conformément au guide sur l'organisation de l'assurance qualité dans les terrassements de 2000, LCPC-SETRA [38]. Elle peut constituer le premier jour de production de l'atelier si les résultats sont satisfaisants et si le maître d'œuvre accepte cette

Annexe G : Phase travaux, critères de réception et dispositions constructives relatives au cloutage et à la protection superficielle des couches de forme

G.1. Critères de réception

S'agissant de critères pour la construction, les valeurs seuils dépendent de l'importance du chantier, du matériel, des méthodes et conditions d'exécution, de la nature des matériaux de la couche de forme et de la couche de fondation de la chaussée, ainsi que de la classe de plate-forme visée.

Pour les chantiers courants, les valeurs généralement retenues sont (d'après le GTS [12]):

pour la traficabilité de l'arase nécessaire à la bonne réalisation de la couche de forme, un module de déformabilité au moins égal à EV2 > 30 MPa pour la réalisation de couches de forme granulaires et EV2 > 35 MPa pour des couches de forme traitées au liant hydraulique,

▶ un nivellement de la plate-forme effectué avec une tolérance de ± 3 cm par rapport à la ligne rouge des terrassements pour les couches de forme granulaires et de ± 2 cm pour les couches de forme traitées au liant hydraulique (voire ± 1 cm avec des ateliers de réglage performants notamment si les tolérances des couches de chaussée supérieures l'exigent),

• une déformabilité maximale de la plate-forme, (lors de la mise en œuvre) fonction de la nature de la couche de forme et de la classe de plate-forme visée (tableaux G1).

Nota:

▶ Il est rappelé que les valeurs inférieures définissant les classes de plate-forme représentent des caractéristiques « long terme » de calcul, que le projeteur devra ajuster aux conditions du chantier, par exemple en fixant des valeurs contractuelles plus élevées.

▶ Il n'existe pas de relation linéaire directe ou d'équivalence stricte entre les différentes méthodes de réception (plaque, dynaplaque, déflexion etc.) proposées ci-après. Aussi, il est fortement recommandé au concepteur de ne retenir qu'une méthode par structure, associée à une valeur minimale et/ou à une valeur statistique caractéristique (par exemple : 95% des valeurs supérieures à 60 MPa et 100 % supérieures à 50 MPa pour une PF2 granulaire).

Couche de forme non traitée		
Plate-forme visée	Module selon NF P 94-117-1 [28] ou 94-117-2 [29]	Déflexion caractéristique NF P 98-200-1 [39]
PF2	50 MPa	2 mm
PF2 ^{qs}	80 MPa	1,5 mm
PF3	120 MPa	0,9 mm
PF4	200 MPa	0,6 mm

Couche de forme traitée chaux uniquement (28 jours)			
Plate-forme visée	Module selon NF P 94-117-1 [28] ou 94-117-2 [29]	Déflexion caractéristique NF P 98-200-1 [39]	
PF2	100 MPa	1,2 mm	
PF2 ^{qs}	120 MPa	1,0 mm	
PF3	150 MPa	0,8 mm	

Couche de forme traitée d	wec un liant hydraulique éventuellement ass	rocié à la chaux (28 jours)
Plate-forme visée	Module selon NF P 94-117-1 [28] ou 94-117-2 [29]	Déflexion caractéristique NF P 98-200-1 [39]
PF2	-	-
$PF2^{qs}$	Essai inadapté	0,8 mm
PF3	Essai inadapté	0,6 mm

Tableaux G1: Performances requises à la mise en œuvre des chaussées.

Observations:

1) La classe PF2^{qs}, dénommée PF2 de qualité supérieure, n'est pas définie ni dimensionnée dans le GTR. Il s'agit d'une classe intermédiaire de calcul, introduite dans la norme NF P 98-086 [2], permettant de valoriser les plates-formes dont les caractéristiques de réception plafonnent à une valeur comprise entre 80 et 120 MPa.

2) La déflexion caractéristique est, selon la norme NF P 98-200-1 [39], la valeur moyenne plus deux écarts types des valeurs de déflexion mesurées sur une section considérée. Par défaut, on retiendra une longueur de section de référence de 50 m, sauf dispositions contractuelles particulières.

3) Pour les couches de forme traitées, la réception résulte d'une démarche d'assurance qualité globale, associant les études et les différents points de contrôle associés au chantier (état hydrique, dosage du liant, épaisseur traitée, mouture, compactage etc.). La démarche est rappelée dans la note d'information n° 118 du SETRA (2009) [30].

4) Il est recommandé que le CCTP précise dans les modalités de réception, une valeur minimale (tout dépassement faisant l'objet d'un traitement par fiche d'anomalie), et à titre indicatif, des valeurs moyennes. Ces recommandations doivent s'appuyer sur un nombre minimal d'essais, précisant le nombre de points par voie, par profil etc.

G.2. Cloutage et protection superficielle

Cloutage

Les plates-formes de couche de forme en sols fins traités, appelées à supporter des trafics intenses, doivent être protégées par un cloutage. Cette opération consiste à épandre et à enchâsser sur la plate-forme, après réglage final et compactage, des gravillons de coefficient Los Angeles inférieur ou égal à 35, concassés, de gros calibre tel que 14/20 mm, voire plus. L'enchâssement est exécuté avant la fin du délai de maniabilité, par deux ou trois passes d'un cylindre lisse fonctionnant sans vibrer, ou d'un rouleau à pneus.

Protection superficielle

Les couches de forme en sols traités doivent recevoir une protection superficielle, en sus du cloutage éventuel. Sa nature dépend des rôles qui lui ont été dévolus, des natures de matériaux traités, des sollicitations mécaniques et climatiques.

Cette protection doit:

▶ maintenir l'état hydrique du matériau traité constituant la couche de forme (protection aussi bien vis-à-vis des infiltrations que de l'évaporation) durant la période de prise hydraulique du sol traité,

• favoriser l'accrochage entre couche de forme et couche de fondation.

Elle peut également être amenée à supporter un trafic de chantier.

Le choix de la protection superficielle dépend des fonctions attendues: maintien de l'état hydrique, limitation ou élimination des émissions de poussières, augmentation de la résistance de la plate-forme aux efforts tangentiels etc..., du climat et de la durée d'exposition avant réalisation des structures de chaussées.

Elle peut ainsi varier d'un simple enduit de cure par voile d'émulsion à un enduit bi-couche gravillonné.

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

Couverture	© Photothèque STAC/Richard METZGER
Photos intérieures:	© Photothèque STAC/Damien MOUNIER
	© CETE de l'EST
	© IFSTTAR Nantes
Illustration/Dessin:	© STAC/Damien MOUNIER
	© STAC/lean-Baptiste TIGER
	© IFSTTAR
	© IFSTTAR © SETRA-LCPC

Octobre 2016



Centre de test de détection d'explosifs 31, avenue du Maréchal Leclerc _{9, avenue} du Docteur Maurice Grynfogel - BP 53735 Centre d'essais de lancement de missiles - BP 38 40602 BISCARROSSE CEDEX Tél. 33 (0) 5 58 83 01 73 Fax 33 (0) 5 58 78 02 02

Site de Toulouse 31037 TOULOUSE CEDEX Tél. 33 (0) 1 49 56 83 00 Fax 33 (0) 1 49 56 83 02

service technique de l'Aviation civile CS 30012 94385 BONNEUIL-SUR-MARNE CEDEX Tél. 33 (0) 1 49 56 80 00 Fax 33 (0) 1 49 56 82 19

www.stac.aviation-civile.gouv.fr