

dimensionnement des chaussées

DEUXIEME TIRAGE 1988

Instruction sur le dimensionnement des chaussées d'aérodromes
et la détermination des charges admissibles

volume 1

1983



AVERTISSEMENT

L'instruction sur le dimensionnement des chaussées d'aérodromes et la détermination des charges admissibles se compose dans la version publiée en 1983 de trois volumes, dont le contenu est exposé dans l'avant-propos ci-après.

Or, pour faire face à la demande, il est apparu nécessaire de procéder à un deuxième tirage de l'Instruction, mais dans une version uniquement constituée des volumes 1 et 2, conformes aux précédents.

Toute référence au volume 3 de l'Instruction devra désormais se reporter au document "LA METHODE ACN-PCN - Guide pratique d'utilisation de la méthode ACN-PCN - S.T.B.A. 1988", qui contient les nouvelles dispositions relatives à la détermination des charges admissibles et la publication des renseignements sur la force portante des chaussées par la méthode ACN-PCN.

ERRATUM (Volume 2)

Sur tous les abaques de dimensionnement pour chaussées rigides, l'échelle des contraintes en traction par flexion en MPa est décalée : il ne devra donc pas en être tenu compte. Pour les calculs, il convient donc de se baser uniquement sur les valeurs de contrainte indiquées en kg/cm².

dimensionnement des chaussées

Instruction sur le dimensionnement des chaussées d'aérodromes
et la détermination des charges admissibles

volume 1

1983



sba

Service des Bases aériennes
246, rue Lecourbe
75732 Paris
Cedex 15
Tél: 828.40.20

stba

Service technique
des Bases aériennes
246, rue Lecourbe
75732 Paris Cedex 15
Tél: 554.63.18

AVANT-PROPOS

Les dispositions relatives au dimensionnement des chaussées d'aérodromes et à la détermination des charges admissibles font l'objet de trois volumes :

VOLUME 1 : INSTRUCTION TECHNIQUE

Partie 1 : Dispositions générales

Partie 2 : Annexes

VOLUME 2 : MANUEL PRATIQUE DE DIMENSIONNEMENT

Partie 1 : Compléments pour l'usage des méthodes de dimensionnement, abaques généraux

Partie 2 : Exemples

Partie 3 : Tableaux de caractéristiques et abaques de calcul pour les principaux avions

VOLUME 3 : MANUEL PRATIQUE DE DETERMINATION DES CHARGES ADMISSIBLES

Partie 1 : Compléments pour la détermination des charges admissibles et la publication des renseignements sur la force portante des chaussées par la méthode ACN/PCN

Partie 2 : Exemples

Le volume 1 constitue l'instruction technique de base, regroupant de manière détaillée et commentée les règles de dimensionnement des chaussées neuves d'aérodromes et de détermination des charges admissibles. Il traite également des problèmes connexes : évaluation des chaussées existantes, renforcements...

Les dispositions générales contiennent des prescriptions (écrites en **caractères gras**) le plus souvent suivies de recommandations, commentaires et remarques (écrits en *italique*). La deuxième partie du volume est une annexe qui rappelle l'origine et le fondement des méthodes d'étude des chaussées.

Le volume 2 est conçu pour être le document pratique de dimensionnement. Son utilisation suppose la connaissance de la partie 1 de l'Instruction Technique. Une première partie contient des compléments nécessaires pour utiliser les méthodes de dimensionnement et les abaques généraux dont seulement quelques exemples figurent dans le volume 1.

Les exemples d'utilisation (partie 2) regroupent des cas très complets d'études utilisant toutes les méthodes décrites.

Une série de tableaux de caractéristiques et d'abaques relatifs aux cinquante principaux avions civils en service ou en projet constitue le véritable outil pratique de l'utilisateur (partie 3).

Le volume 3 est au même titre que le précédent un document pratique consacré aux méthodes de détermination et de publication des charges admissibles. Son utilisation suppose la connaissance de la partie 1 de l'Instruction Technique.

Une première partie contient des exemples complémentaires utiles à la détermination du PCN des chaussées. Une deuxième partie contient des exemples complets.

L'attention de l'utilisateur est enfin appelée sur le regroupement dans les volumes 1 et 2 de deux catégories de dispositions qui faisaient l'objet antérieurement de deux circulaires distinctes :

- celles relatives aux chaussées légères, destinées à recevoir des avions dont la masse maximale est inférieure à 5,7 tonnes,
- celles communes à toutes les autres catégories de chaussées.

SOMMAIRE

Pages

Abréviations	4
PARTIE I - DISPOSITIONS GENERALES	5
1. Généralités	7
1.1. Définitions	7
1.2. Choix du type de chaussée	8
2. Choix de la charge de calcul	9
2.1. Caractéristiques des avions utiles pour le dimensionnement	9
2.1.1. Masse des avions	9
2.1.2. Atterrisseurs	10
2.1.3. Répartition de la masse sur les atterrisseurs	11
2.1.4. Charges utilisées dans les calculs	11
2.2. Choix de la charge selon la fonction de la chaussée	12
2.2.1. Conditions de charges différentes	12
2.2.2. Conséquences des effets dynamiques et de la dispersion des passages des atterrisseurs	12
2.3. Charges autres que celles dues aux avions	13
2.3.1. Accotements	13
2.3.2. Aires de stationnement	13
2.3.3. Chaussées routières	14
2.3.4. Chaussées légères	14
3. Dimensionnement des chaussées souples	15
3.1. Prévisions de trafic	15
3.2. Caractéristiques du sol support	15
3.2.1. Cas général	15
3.2.2. Cas des sols graveleux et des sables propres	15
3.2.3. Couche de forme	16
3.3. Conditions climatiques	16
3.4. Epaisseur équivalente de la chaussée	16
3.5. Constitution de la chaussée	17
3.5.1. Généralités	17
3.5.2. Choix d'une constitution	18
3.5.3. Epaisseur de matériaux traités	19
3.5.4. Prise en compte des facteurs climatiques	20
4. Dimensionnement des chaussées rigides	21
4.1. Prévisions de trafic	21
4.2. Caractéristiques du sol support	21
4.3. Conditions climatiques	22
4.4. Couche de fondation	22
4.4.1. Rôle de la couche de fondation	22
4.4.2. Prise en compte dans les calculs	22
4.4.3. Constitution de la couche de fondation	22
4.5. Epaisseur de la dalle de béton	23
4.5.1. Contraintes du béton	23
4.5.2. Epaisseur de la dalle de béton	24
4.5.3. Dispositions constructives	24
4.5.4. Efficacité des transferts de charges	26
4.5.5. Prise en compte des facteurs climatologiques	26
5. Dimensionnement forfaitaire	27
5.1. Principe	27
5.2. Intensité du trafic et durée de vie	27
5.3. Calcul de l'épaisseur de la chaussée	28
6. Dimensionnement optimisé	30
6.1. Principe	30
6.2. Intensité du trafic et durée de vie	30
6.3. Calcul de l'épaisseur de la chaussée	30
7. Gel	33
7.1. Généralités	33
7.2. Effets du gel	33
7.3. Vérification	33
7.3.1. Principe	33
7.3.2. Caractérisation de la gélivité des sols	33
7.3.3. Calcul de la profondeur du gel	34
7.4. Protection des chaussées contre le gel/dégel	34
7.4.1. Niveaux de protection	34
7.4.2. Moyens de protection	35
8. Charges admissibles	36
8.1. Publication de renseignements sur la portance des chaussées	36
8.1.1. Méthode des atterrisseurs-types	36
8.1.2. Méthode ACN/PCN	36
8.1.3. Mise en application de la méthode ACN/PCN	38

8.1.4. Calcul des valeurs publiables	39
8.1.5. Valeurs publiées	40
8.2. Utilisations des valeurs publiées	41
8.2.1. Pressions limites	41
8.2.2. Détermination des avions admissibles	41
8.2.3. Comparaison des charges réelles et des charges admissibles	42
8.3. Procédure en cas de dépassement des charges	42
9. Evaluation des chaussées	44
9.1. Généralités	44
9.2. Méthode inverse de dimensionnement	45
9.3. Essais de plaque non destructifs	45
9.4. Campagne d'évaluation de la portance	45
9.4.1. Introduction	45
9.4.2. Délimitation des zones homogènes	45
9.4.3. Caractérisation des zones homogènes	46
9.4.4. Interprétation et synthèse des résultats	46
10. Renforcement des chaussées	47
10.1. Généralités	47
10.1.1. Choix d'une structure de renforcement	47
10.1.2. Choix des profils	47
10.1.3. Etude préliminaire	48
10.2. Renforcement des chaussées souples	48
10.2.1. Renforcement souple	48
10.2.2. Renforcement rigide	48
10.3. Renforcement des chaussées rigides	48
10.3.1. Renforcement souple	48
10.3.2. Renforcement rigide	49
11. Chaussées légères	51
11.1. Généralités	51
11.2. Détermination de l'épaisseur de la chaussée	51
11.2.1. Couche de roulement	51
11.2.2. Couche de base	51
11.2.3. Couche de fondation	51
11.2.4. Protection contre le gel	52
11.3. Charges admissibles	52
PARTIE II - ANNEXE	53
1. Méthodes d'étude des chaussées souples	55
1.1. Méthode CBR	55
1.1.1. Principe	55
1.1.2. Formule	55
1.1.3. Epaisseur équivalente	55
1.2. Détermination des roues simples équivalentes	56
1.2.1. Définition générale	56
1.2.2. Méthode de Boyd et Foster	56
1.2.3. Autre méthode de détermination de la RSE	58
1.3. Epaisseur minimale des matériaux traités	60
2. Méthodes d'étude des chaussées rigides	61
2.1. Méthode de Westergaard	61
2.2. Méthode de la Portland Cement Association	61
2.2.1. Recherche automatique de l'effort maximal dans la dalle	61
2.2.2. Etablissement et utilisation des abaques	62
2.2.3. Influence des paramètres E et ν du béton	63
3. Fatigue des chaussées	64
3.1. Loi de Miner	64
3.2. Relations d'équivalence	64
3.2.1. Equivalence entre atterrisseurs	64
3.2.2. Equivalence entre charges et nombre de mouvements	65
3.2.3. Equivalence entre nombre de mouvements et nombre d'applications : distribution latérale du trafic	65
4. Gel	67
4.1. Formule de Berggren modifiée	67
4.2. Application au cas des multicouches	67
5. Méthode ACN/PCN	69
5.1. Principe général	69
5.2. Calcul de l'ACN	69
5.2.1. Chaussées souples	69
5.2.2. Chaussées rigides	70
5.2.3. Calcul pratique	70
5.3. Correction de l'ACN en fonction de la pression	70
5.4. Détermination du PCN d'une chaussée	70
6. Evaluation des chaussées	71
6.1. Remarques sur la méthode inverse de dimensionnement	71
6.2. Essais de plaques non destructifs	71
6.2.1. Mode opératoire et exploitation des mesures	71
6.2.2. Matériel	71
6.3. Campagne d'auscultation des chaussées aéronautiques	74
6.3.1. Caractérisation des zones homogènes	74
6.3.2. Interprétation et synthèse des résultats	74
6.4. Essais complémentaires à l'évaluation de la portance	75
Références bibliographiques	76

ABREVIATIONS

RELATIVES AU TRAFIC ET AUX CARACTERISTIQUES DES AVIONS

P, P_i, P_{ij}	Charge réelle
P', P'_i, P'_{ij}	Charge réelle pondérée
P'', P''_i, P''_{ij}	Charge normale de calcul
P_o, P_{oi}	Charge admissible
P_{ta}, P_a	Charge déduite d'un PCN
p	Charge sur une roue
M	Masse maximale au roulage
M_d	Masse maximale au décollage
M_a	Masse maximale à l'atterrissage
m	Masse à vide équipée
$n, n_i, n_{ij}, N, N_i, N_{ij}$	Nombre de mouvements réels
n', n'_i, n'_{ij}	Nombre de mouvements équivalents
ACN	Numéro de classification d'avion
R, R_i, R_{ij}	Rapport entre charge réelle pondérée et charge admissible
CF	Coefficient de pondération des charges réelles selon la fonction de la chaussée
CT	Coefficient de correction des charges réelles selon la fonction de l'intensité du trafic
CP, CP_i, CP_{ij}	Coefficient de pondération des mouvements réels
q_o	Pression standard de gonflage des pneumatiques
q	Pression effective de gonflage des pneumatiques
a	Rayon d'empreinte circulaire de pneumatique
A	Aire de contact d'un pneumatique
a_1, a_2	Largeur d'empreinte de pneumatique
b	Longueur d'empreinte de pneumatique
d	Distance entre flancs intérieurs de pneumatiques
S, S_d	Caractéristique géométrique particulière d'atterrisseur

RELATIVES AU SUPPORT DE CHAUSSEE

CBR	Indice portant californien
K_o	Module de réaction du sol support
K	Module de réaction corrigé du sol support
OPM	Optimum Proctor Modifié
F	Coefficient de qualité de chaussée existante, pour les renforcements souple/rigide

RELATIVES AUX MATERIAUX ET STRUCTURES

e	Epaisseur équivalente de chaussée souple
e_f	Epaisseur équivalente de couche de forme
e_r	Epaisseur réelle de chaussée souple
e_t	Epaisseur équivalente de matériaux traités
e_T	Epaisseur équivalente totale
h	Epaisseur de dalle de béton
h_t	Epaisseur théorique de dalle de béton
h_R	Epaisseur de la dalle de renforcement
σ_t, σ	Contrainte de traction par flexion
$\bar{\sigma}_{bt}$	Contrainte admissible de traction par flexion
f_{ti}	Résistance de traction par flexion à la rupture mesurée à i jours
I	Rayon de rigidité relative
\mathcal{M}	Moment de flexion
E	Module d'élasticité
ν	Coefficient de Poisson
C	Coefficient de qualité de chaussée existante pour les renforcements rigide/rigide
CE	Coefficient d'équivalence de matériau
D	Distance entre deux points dans un massif de Boussinesq
f, f_i	Coefficient de déflexion dans un massif de Boussinesq
r	Distance à un axe vertical
z	Profondeur
W, W_i	Déflexion verticale
PCN	Numéro de classification de chaussée
RSE	Roue simple équivalente
IP	Indice de plasticité
γ_d	Densité sèche
w	Teneur en eau

RELATIVES A LA TENUE AU GEL-DEGEL

\hat{C}_i	Capacité calorifique volumique
I	Indice de gel
L_i	Chaleur latente volumique de congélation
K_i	Coefficient de conductibilité thermique
t	Durée de gel
T_o	Température atmosphérique moyenne annuelle
Z	Profondeur de gel
α, μ, λ	Paramètres de calcul de la profondeur de gel

PARTIE 1

**DISPOSITIONS
GENERALES**

1. GENERALITES

1.1. DEFINITIONS

a. Structure de chaussée

Une chaussée comporte en général de haut en bas :

- une couche de SURFACE composée d'une couche de ROULEMENT et éventuellement d'une couche de LIAISON,
- une couche de BASE,
- une couche de FONDATION,
- éventuellement une SOUS-COUCHE.

La chaussée repose sur la plate-forme support de chaussée (ou sol support) constituée du terrain naturel surmonté éventuellement d'une couche de forme.

Convention : par simplification, l'Instruction ne distinguera par la suite que deux grandes catégories de chaussées :

- les CHAUSSEES « SOUPLES » regroupant les structures souples et semi-rigides, et certains cas de structures composites (par exemple une ancienne chaussée rigide fortement fragmentée, renforcée par des matériaux traités aux liants hydrocarbonés).
- les CHAUSSEES « RIGIDES » regroupant les structures rigides et certains cas de structures composites (par exemple chaussée rigide rénovée par une couche de roulement traitée aux liants hydrocarbonés).

b. Portance - Durée de vie

La PORTANCE (ou FORCE PORTANTE ou RESISTANCE) d'une chaussée est la mesure de son aptitude à supporter les charges dues aux avions en maintenant l'intégrité de sa structure pendant sa durée de vie.

La DUREE DE VIE d'une chaussée est la période à la fin de laquelle la portance de la chaussée devient insuffisante pour que la chaussée puisse continuer à supporter sans risque le trafic. Un renforcement général ou une réduction de trafic s'impose alors.

LA DUREE DE VIE d'une chaussée est par convention de dix années. Cependant, elle peut être fixée à une autre valeur dans des conditions décrites plus loin (cf. § 6.2 p. 30).

c. Trafic

Un MOUVEMENT REEL d'avion représente :

- pour l'exploitant, un décollage ou un atterrissage.
- pour le dimensionnement, un passage d'avion sur une chaussée par l'intermédiaire d'un atterrisseur réel lors d'une manœuvre (décollage, atterrissage, roulage).

La CHARGE REELLE P est la charge effectivement appliquée par un atterrisseur d'avion.

La CHARGE REELLE PONDEREE P' est la charge réelle P pondérée selon la fonction de la chaussée étudiée.

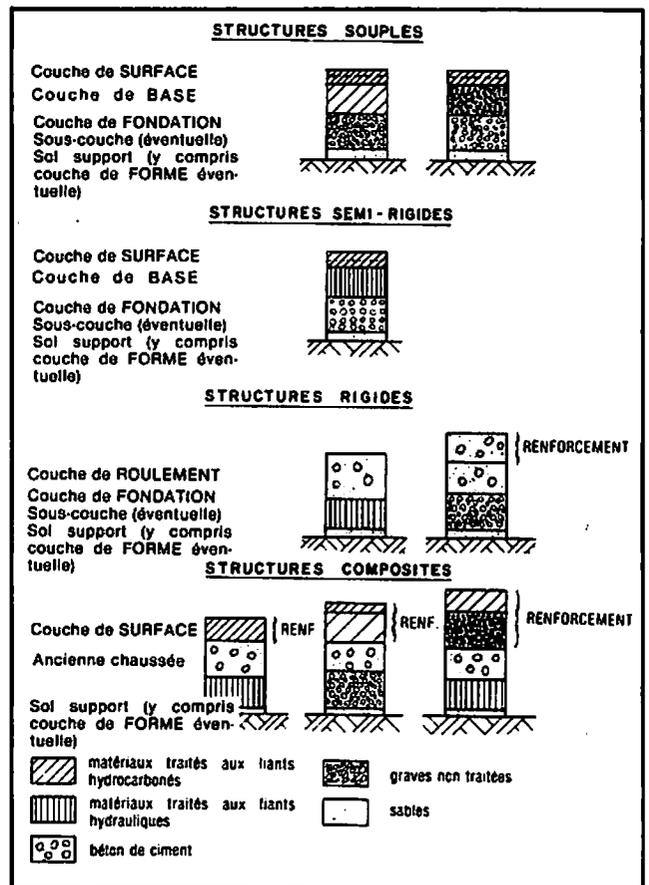


Figure 1. — Structures-types.

Le TRAFIC REEL est constitué de mouvements réels appliqués par l'intermédiaire d'atterrisseurs réels de différentes catégories.

La CHARGE NORMALE DE CALCUL P' est la charge utilisée dans les formules ou les abaques pour le calcul de dimensionnement des chaussées.

Le TRAFIC NORMAL est, par convention, le trafic constitué par dix mouvements par jour de l'avion produisant la charge normale de calcul pour une durée de vie normale.

La CHARGE ADMISSIBLE P_0 associée à un atterrisseur donné (réel ou fictif) pour une chaussée donnée est celle calculée selon les règles de dimensionnement pour le trafic normal.

d. Dimensionnements

- DIMENSIONNEMENT FORFAITAIRE (ou méthode de dimensionnement forfaitaire) : dimensionnement en fonction d'une charge normale de calcul que la chaussée doit supporter. Il ne prend en compte qu'un type d'avion pour un trafic normal.
- DIMENSIONNEMENT OPTIMISE (ou méthode du dimensionnement optimisé) : dimensionnement prenant en compte tous les types d'avions devant produire un effet significatif sur la chaussée pendant une durée de vie déterminée.

e. Numéro de classification d'avion (ACN) - Numéro de classification de chaussée (PCN)

- NUMERO DE CLASSIFICATION D'AVION (ACN) : nombre qui exprime l'effet relatif d'un avion sur une chaussée pour une catégorie type spécifiée du terrain de fondation.
- NUMERO DE CLASSIFICATION DE CHAUSSEE (PCN) : nombre qui exprime la force portante d'une chaussée pour une exploitation sans restriction.

1.2. CHOIX DU TYPE DE CHAUSSEE

Le choix entre chaussée souple et chaussée rigide doit tenir compte :

- des coûts de construction et d'entretien,
- des objectifs de gestion des chaussées,
- des conditions locales d'approvisionnement en matériaux,
- des délais de mise en œuvre,
- des possibilités de phasage des travaux, de renforcement ultérieur des chaussées,
- du climat, etc.

Seules certaines aires sont justiciables d'un type de chaussée plutôt que d'un autre.

C'est ainsi que :

- *pour la constitution de revêtements légers destinés aux accotements de piste, aux prolongements d'arrêt, etc., une structure de type souple est préférable,*
- *pour les aérodromes fréquentés par un trafic commercial, il est indiqué de réaliser les aires de stationnement avec une chaussée rigide. En effet ces aires sont soumises à des efforts tangentiels dus aux virages des avions et à l'action des engins d'exploitation divers ainsi qu'à des efforts concentrés que le béton supporte mieux qu'un revêtement bitumineux. De plus ces aires sont exposées aux attaques du kérosène et des huiles de vérins. Dans le cas où une chaussée souple est finalement retenue, il est recommandé d'assurer une protection contre ces agents (à l'aide d'un enduit superficiel ou en réalisant une couche de roulement avec un liant insensible au kérosène).*

Les chaussées rigides vieillissent moins rapidement que les chaussées souples sous réserve d'un entretien constant des joints mais sont plus difficiles à renforcer. De ce fait elles sont conseillées pour les très forts trafics.

En général, les chaussées rigides sont plus économiques à la construction que les chaussées souples sur les sols de résistance faible mais homogène. Par contre, les chaussées souples sont préférables sur les sols supports susceptibles de tassements.

2. CHOIX DE LA CHARGE DE CALCUL

2.1. CARACTERISTIQUES DES AVIONS UTILES POUR LE DIMENSIONNEMENT

2.1.1. MASSE DES AVIONS

Parmi les masses remarquables fournies par les constructeurs d'avions 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 M) : masse maximale de l'avion acceptable pendant les manœuvres au sol sur les aires de trafic.
- la masse maximale au décollage portée au certificat de navigabilité : masse maximale de l'avion acceptable au décollage.
- la masse maximale à l'atterrissage portée au certificat de navigabilité : masse maximale de l'avion acceptable à l'atterrissage.
- la masse à vide en ordre d'exploitation (ou masse à vide équipé m) : masse de l'avion à vide avec ses équipements permanents, un aménagement de cabine et un équipage de référence.

La masse effective d'un avion est toujours comprise entre m et M : elle est égale à la masse à vide en ordre d'exploitation augmentée de la masse du carburant (consommation de route et réserve pour attente et déroutement) et de la charge marchande (passagers, fret, poste). Elle dépend de la longueur d'étape, des longueurs de piste disponibles au décollage et à l'atterrissage, des conditions météorologiques, etc...

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

Par contre la masse à l'atterrissage M_a diffère de la masse au décollage M_d de la quantité de carburant consommée pendant le vol qui représente pour des étapes longues une fraction importante de la masse totale.

Or, à masse égale, les efforts susceptibles de se produire dans la structure de l'avion sont plus importants à l'atterrissage qu'au décollage.

Il est donc possible d'alléger la structure et donc la masse à vide en fixant une masse maximale à l'atterrissage inférieure à la masse maximale au décollage, le rapport M_a/M_d pouvant être d'autant plus faible que l'avion est appelé normalement à couvrir des étapes plus longues. C'est ainsi que pour le Mercure $M_a/M_d = 0,95$ alors que ce rapport est 0,8 pour l'Airbus et peut descendre à 0,7 sur certains types de Boeing 747.

Lorsqu'un de ces avions doit se reposer immédiatement après le décollage à la suite d'un incident, il ne peut normalement le faire qu'après avoir vidangé en vol une partie de son carburant.

Il n'y a guère que pour les avions légers qui n'ont pas cette possibilité, que $M_a = M_d$ est généralement pris.

Il est nécessaire de déterminer :

- dans le cas du dimensionnement forfaitaire : la masse réelle au décollage de l'avion de calcul,
- dans le cas du dimensionnement optimisé : les masses réelles au décollage et les masses réelles à l'atterrissage de l'ensemble des avions prévus,
- pour le calcul des ACN : les masses maximales au roulage et les masses à vide en ordre d'exploitation des divers avions.

La collecte des renseignements à prendre en compte pour un dimensionnement constitue une difficulté compte tenu :

- de l'incertitude des prévisions de trafic (avions, étapes) et de l'évolution du matériel volant,
- de la variation de la charge marchande.

2.1.2. ATERRISSEURS

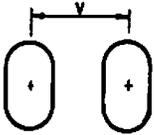
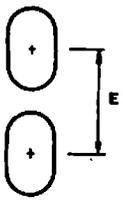
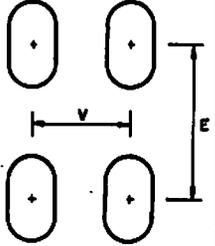
L'ATERRISSEUR est constitué par l'ensemble des roues montées sur une même jambe. L'ensemble des atterrisseurs constitue le TRAIN D'ATERRISSAGE.

Le train d'atterrissage des avions de transport commerciaux se compose généralement de deux atterrisseurs principaux et d'un atterrisseur secondaire, situé à l'avant. Parmi les exceptions figurent le Boeing 747 (quatre atterrisseurs principaux) et le DC 10-30 (trois atterrisseurs principaux dont un central).

D'autres types d'atterrisseurs ont fait depuis peu leur apparition, notamment des atterrisseurs comportant six roues disposées de diverses façons (triple tandem de jumelages, assemblage triangulaire de jumelages, etc.)

Tableau A

CARACTERISTIQUES DES ATERRISSEURS

Géométrie	Type d'atterrisseur	Exemples	V	E	Masses supportées	Pression de gonflage des pneumatiques
	ROUE SIMPLE	- avions légers	—	—	jusqu'à 5 t	0,3 - 0,6 MPa
	JUMELAGE (ou DIABOLO)	- avions légers - courts et moyens courriers	50-90 cm	—	5 à 40 t	0,6-1,2 MPa
	TANDEM	- avions militaires (configuration rare)	—	130-170 cm	10 à 20 t	0,4-0,8 MPa
	BOGGIE	Tous types sauf avions légers. Principalement long-courriers	40-140 cm	100-180 cm	20 à 90 t	1 - 1,6 MPa
<p>VOIE (V) : distance entre deux roues d'un même essieu. EMPATTEMENT (E) : distance entre l'essieu avant et l'essieu arrière.</p>						

ATERRISSEURS-TYPES

Compte tenu de la variété des caractéristiques géométriques des atterrisseurs, il est utile d'introduire des atterrisseurs-types représentatifs des trois catégories d'atterrisseurs les plus répandus (roue simple, jumelage, boggie).

Les caractéristiques des atterrisseurs-types sont les suivantes :

Atterrisseur type	Voie (cm)	Empattement (cm)	Pression des pneumatiques
ROUE SIMPLE	—	—	0,6 MPa (\approx 6 kg/cm ²)
JUMELAGE	70	—	0,9 MPa (\approx 9 kg/cm ²)
BOGGIE	75	140	1,2 MPa (\approx 12 kg/cm ²)

Les abaques atterrisseurs-types sont établis pour ces caractéristiques.

2.1.3. REPARTITION DE LA MASSE SUR LES ATERRISSEURS

• Répartition statique

La répartition totale de la masse d'un avion entre l'atterrisseur avant et les atterrisseurs principaux est fonction du centrage de l'avion, c'est-à-dire de la position du centre de gravité. Cette répartition varie peu.

Les valeurs indiquées dans les tableaux de caractéristiques des principaux avions (vol 2 - Manuel pratique) sont les plus critiques respectivement pour chaque atterrisseur.

En l'absence d'indications précises, la répartition admise pour les trains d'atterrissage classiques est la suivante :

10 % de la masse totale de l'avion sur l'atterrisseur avant (centrage avant maximum).

95 % de la masse totale de l'avion sur les atterrisseurs principaux (centrage arrière maximum).

• Effets du freinage

Le freinage des avions est réalisé par l'action de dispositifs appropriés sur les roues des atterrisseurs principaux (ainsi que, très exceptionnellement, de l'atterrisseur avant) à laquelle s'ajoute pour les avions d'un certain tonnage, l'inversion de la poussée des réacteurs ou du pas des hélices. Pour ménager les pneumatiques, le freinage des roues est limité le plus possible à grande vitesse ; par contre il n'est recouru à l'inversion de poussée ou de pas qu'au-dessus d'une certaine vitesse. La résultante de cette dernière action passe à proximité du centre de gravité de l'avion et n'a donc que peu d'incidence sur la répartition des masses entre les différents atterrisseurs, alors que le freinage des roues tend à surcharger l'atterrisseur avant. Cependant les variations de charge qui en résultent sont trop faibles et trop fugaces pour qu'il en soit tenu compte dans la détermination de la structure de la chaussée, même lorsque c'est l'atterrisseur avant qui est critique.

Les efforts tangentiels exercés par les roues sur la chaussée peuvent atteindre, voire dépasser dans le cas d'un freinage d'urgence sur un sol sec, 80 % de leur charge statique quand les roues sont freinées au maximum sans être bloquées.

Toutefois, cette valeur limite, éprouvante pour le matériel et très inconfortable pour les passagers car elle correspond à une décélération voisine de 0,8 g, n'est guère atteinte qu'en cas d'accélération-arrêt. Il en est tenu compte dans le calcul des ouvrages sous pistes mais non pour le dimensionnement des chaussées où le risque de dégradation n'existe que dans le cas d'une couche de roulement trop mince et mal accrochée sur la couche inférieure. L'expérience montre que les efforts tangentiels sont absorbés par les chaussées normalement constituées.

Les constructeurs d'avions fournissent des valeurs des efforts appliqués dans des conditions de freinage normalisées (freinage constant pour une décélération de 3 m s⁻², freinage instantané pour un coefficient de frottement de 0,8). Ces valeurs sont reportées à titre indicatif dans les tableaux de caractéristiques des avions (vol 2 - Manuel pratique). Elles sont utilisées pour des études particulières, par exemple celles des ouvrages sous piste.

2.1.4. CHARGES UTILISEES DANS LES CALCULS

La masse des avions intervient dans les calculs sous forme d'une charge par atterrisseur. Avec les trains d'atterrissage des avions connus, l'espacement entre atterrisseurs est tel qu'il est légitime d'étudier individuellement l'action de chaque atterrisseur. L'atterrisseur principal fournit en général les sollicitations les plus sévères. Dans certains cas (B 747), l'atterrisseur secondaire risque d'être le plus critique pour la chaussée.

2.2. CHOIX DE LA CHARGE SELON LA FONCTION DE LA CHAUSSEE

Chaque type d'aire (pistes, voies de circulation, aires de stationnement, aires d'entretien, etc.) doit être dimensionné séparément pour tenir compte des conditions différentes de sollicitations.

2.2.1. CONDITIONS DE CHARGES DIFFERENTES

Chaque aire doit être dimensionnée pour les charges qu'elle reçoit effectivement :

Par exemple :

- certaines aires de stationnement sont spécialisées (aviation légère),
- sur une aire de stationnement, les postes de stationnement sont spécialisés par type d'avion, en particulier pour les gros porteurs,
- la spécialisation d'une piste peut conduire à l'affectation d'une voie de circulation pour les avions au décollage et d'une autre voie pour les avions à l'atterrissage donc de masse plus faible (cas très rare),
- le sens préférentiel d'utilisation d'une piste (plus de 75 % du nombre total des mouvements au décollage ou à l'atterrissage à partir d'un des deux seuils) donne une répartition du trafic variable sur la piste et les voies de circulation y conduisant,
- certaines voies ne reçoivent que des avions avec des masses à l'atterrissage (sorties de piste obliques, certaines bretelles non situées aux extrémités,...),
- les aires d'entretien et les voies y conduisant reçoivent les avions à la masse à vide équipée.

2.2.2. CONSEQUENCES DES EFFETS DYNAMIQUES ET DE LA DISPERSION DES PASSAGES DES ATERRISSEURS

Tout en étant soumises aux mêmes charges, certaines chaussées peuvent subir des fatigues différentes.

Par exemple :

- la charge statique est exercée longtemps au même endroit sur les postes de stationnement,
- la circulation est lente et concentrée sur les aires de stationnement, et rapide et dispersée en partie centrale de piste, accidentelle sur les accotements ou les prolongements d'arrêt,
- lorsque l'avion roule à grande vitesse (cas de la partie centrale de la piste au décollage et des mille premiers mètres au-delà du seuil à l'atterrissage), le phénomène de chargement est fugace et donc moins sévère que lorsque l'avion roule à faible vitesse,
- au décollage, lors de la course de l'avion, la charge sur les atterrisseurs décroît progressivement en raison des effets de sustentation. Pour certains avions toutefois, la charge sur les atterrisseurs peut augmenter par suite d'une incidence légèrement négative des ailes au cours du roulage. En outre, lors du cabrage de l'avion, la suppression de l'effet porteur de l'atterrisseur de nez et l'action aérodynamique des gouvernes arrières peuvent entraîner un surcroît de charge sur les atterrisseurs principaux, conduisant à un dépassement de leur charge statique normale. Cet effet fugace n'est toutefois pas pris en compte,
- à l'atterrissage, des phénomènes dynamiques mal connus se produisent au moment de l'impact et dans l'état actuel de nos connaissances, il n'en est pas tenu compte. Des efforts tangentiels importants sont appliqués au revêtement. Il sont toutefois supportés sans dommage par les revêtements habituels (béton de ciment, béton bitumineux) construits correctement.

La solution pour tenir compte des fatigues différentes par les chaussées des diverses aires consiste à pondérer les charges réelles selon les indications de la figure 2.

Lorsque le coefficient de pondération CF est inférieur à 1, il est recommandé lors de l'étude d'un projet, d'examiner les économies qui pourront être faites par l'application de ces règles et les problèmes éventuels qui pourront en résulter à l'exécution ou lors d'une modification d'utilisation des aires et d'adopter les réductions d'épaisseurs chaque fois qu'elles seront réellement avantageuses à court et long terme.

Sur les aires de stationnement, la pondération sera toujours effectuée.

Par exemple :

- en profil en travers de piste, la réalisation d'un fond de forme à une cote plus profonde sur les trente mètres centraux crée des sujétions de terrassement et de drainage et est donc déconseillée.

Une méthode consiste à réaliser une couche de base avec un matériau de meilleure qualité sur les

trente mètres centraux, l'épaisseur de cette couche restant constante sur toute la piste. Cette solution n'est toutefois pas valable aux points d'intersections envisagés avec de futures voies.

De telles réductions sur le profil en travers des pistes sont très difficilement concevables avec les chaussées aéronautiques rigides du fait des pentes en travers imposées (normes géométriques et règles de construction) à l'opposé des chaussées routières sur lesquelles la surépaisseur recherchée sur les bords est facilement réalisable.

Pour la construction des prolongements d'arrêt, il doit être tenu compte de l'éventualité d'un allongement de la piste. Pour une structure souple il est conseillé d'avoir une épaisseur totale réelle de chaussée semblable sur la piste et sur les prolongements d'arrêt quitte à réaliser ces derniers avec des matériaux de moins bonne qualité mais dont la partie profonde (fondation) doit être réutilisable.

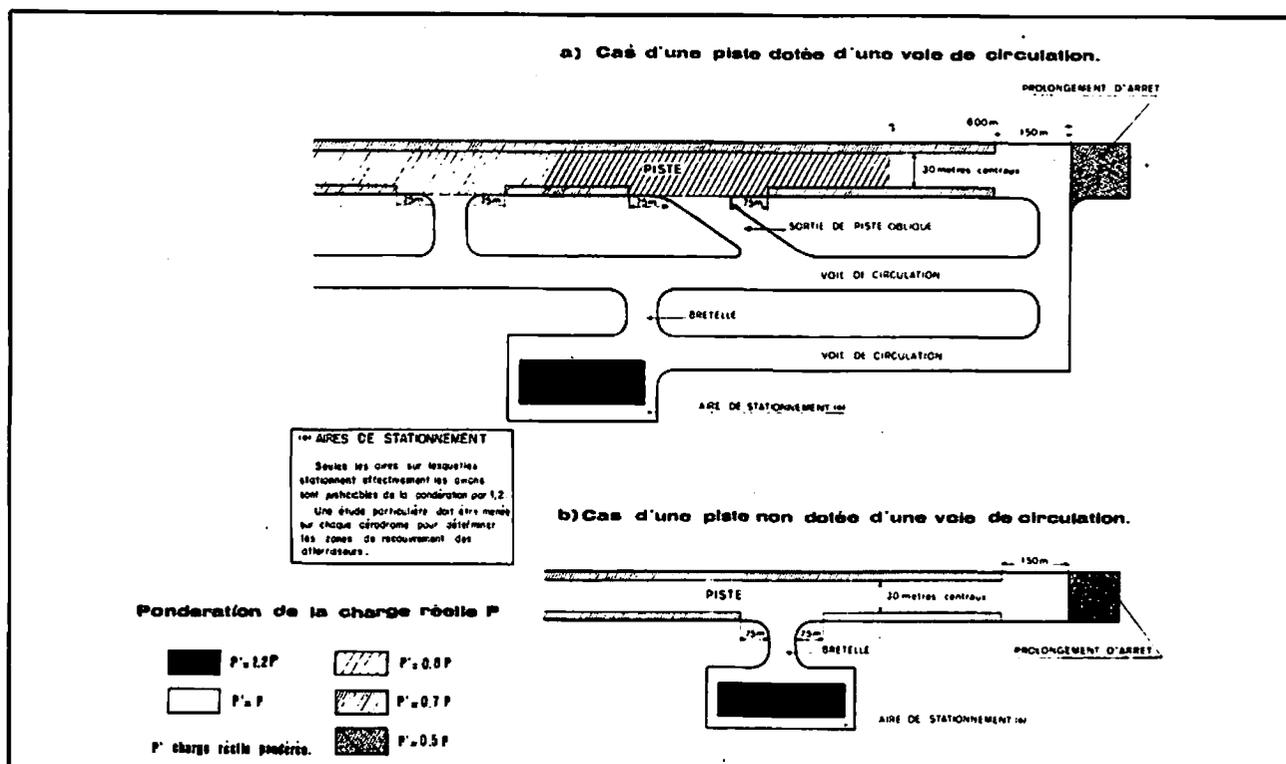


Figure 2. — Pondération des charges réelles selon la fonction des aires.

2.3. CHARGES AUTRES QUE CELLES DUES AUX AVIONS

2.3.1. ACCOTEMENTS

Les accotements de piste ont pour fonction :

- de supporter le poids d'un avion qui sortirait de la piste sans que cet avion subisse de dommages structurels,
- de supporter le poids des véhicules terrestres qui pourraient y circuler,
- sur certains aérodromes, d'assurer une protection contre les effets du souffle des réacteurs du Boeing 747,
- d'évacuer les eaux de ruissellement.

Les accotements doivent être dimensionnés pour supporter le trafic des véhicules terrestres susceptibles de les emprunter.

2.3.2. AIRES DE STATIONNEMENT

Certaines zones ne sont pas accessibles au passage des atterrisseurs (front des installations). D'autre part, les aires de stationnement ne supportent pas seulement des avions mais reçoivent également des véhicules et engins

dont l'action est parfois plus critique que celles des avions :

- véhicules terrestres de transport : cars, camions d'avitaillement en carburant, véhicules incendie, chariots à bagages...
- porte-conteneurs, porte-palettes, tracteurs d'avions,
- passerelles télescopiques.

Ces engins produisent lorsqu'ils sont statiques d'importants effets de poinçonnement dans les revêtements et des efforts tangentiels quand ils se déplacent dans un espace limité. Les chaussées rigides supportent mieux que les chaussées souples ces efforts.

Pour tenir compte de ces charges et se prémunir de leurs effets, il convient :

- de dimensionner les zones concernées pour ces charges,
- de délimiter les zones circulées par des véhicules ou engins contraignants (règles de circulation, repérages au sol),
- dans le cas d'une chaussée souple, d'étudier des revêtements particuliers (exemple : enrobés spéciaux).

2.3.3. CHAUSSEES ROUTIERES

Elles sont circulées par des véhicules terrestres (transport, service, avitaillement, etc.) et doivent être dimensionnées suivant les règles habituelles applicables aux routes. L'attention est appelée sur le fait que certains véhicules (camion d'avitaillement en carburant) peuvent avoir des charges sur essieu supérieures à celles autorisées par le code de la route.

2.3.4. CHAUSSEES LEGERES

Le dimensionnement de ces chaussées peut conduire à y interdire la circulation de certains véhicules terrestres.

3. DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES SOUPLES

Ce chapitre concerne toutes les chaussées autres que les chaussées légères. Dans ce dernier cas, se reporter chapitre 11, p. 51.

Le dimensionnement d'une chaussée souple comporte cinq étapes :

- 1 — Prévisions de trafic
- 2 — Détermination des caractéristiques du sol support
- 3 — Recensement des facteurs climatiques
- 4 — Détermination d'une épaisseur équivalente
- 5 — Choix d'une constitution de chaussée.

3.1. PREVISIONS DE TRAFIC

Les prévisions de trafic portent sur les charges réelles et le nombre de mouvements réels des différents avions envisagés pendant la durée de vie de la chaussée.

Les prévisions sont établies par type d'aire. Deux aires sont distinctes lorsque :

- soit les charges réelles qu'elles reçoivent sont différentes,
- soit, tout en étant soumises aux mêmes charges réelles, leur fonction est différente (cf. § 2.2.1., p. 12),
- soit le nombre de mouvements réels des différentes charges réelles qu'elles reçoivent est différent.

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 le maximum de précision les charges réelles des différents avions pris en compte.

En l'absence de prévisions fiables de trafic ou dans le cas d'un aérodrome sur lequel évolue un type d'avion nettement plus contraignant que les autres, la chaussée est dimensionnée par la méthode du dimensionnement forfaitaire (cf. chap. 5).

Dans le cas contraire, la méthode du dimensionnement optimisé est utilisée (cf. chap. 6).

3.2. CARACTERISTIQUES DU SOL SUPPORT

3.2.1. CAS GENERAL

Le sol support est caractérisé par son CBR ou indice portant californien.

L'étude du sol support est réalisée à partir de prélèvements dans des sondages et donnent lieu à tous les essais classiques d'identification. Le nombre, la répartition et la profondeur de ces derniers doivent être tels que les résultats soient significatifs.

Les essais CBR sont faits sur des échantillons du sol support compactés à différentes énergies et différents teneurs en eau, puis immergés pendant quatre jours. Les teneurs en eau des échantillons lors du compactage sont choisies de façon à encadrer la plage des teneurs en eau prévisibles au moment du chantier. En général, une durée d'immersion de quatre jours place les sols à saturation, c'est-à-dire dans un état analogue à celui qu'ils atteindront sous la chaussée.

Le CBR finalement retenu est la valeur la plus basse obtenue après immersion sur un échantillon compacté à 95 % de l'Optimum Protor Modifié.

La description détaillée de la manière avec laquelle doit être conduit l'ensemble des opérations ci-dessus figure dans le manuel pratique d'utilisation de la présente instruction (volume 2).

3.2.2. CAS DES SOLS GRAVELEUX ET DES SABLES PROPRES

Voir référence 1

Pour les sols graveleux et les sables propres, la mesure du CBR perd une partie de sa signification (difficulté de mesure, grande dispersion, etc.). Il est alors nécessaire de procéder à des études spéciales de laboratoire.

En première approximation, les valeurs forfaitaires données dans le tableau suivant peuvent être adoptées :

Désignation du sol	CBR forfaitaire
Grave propre bien graduée	20
Grave propre mal graduée	20
Grave limoneuse	20 (IP < 7) 10 (IP > 7)
Grave argileuse	10
Sable propre bien gradué	10
Sable propre mal gradué	6 à 8

IP : indice de plasticité.

3.2.3. COUCHE DE FORME

La couche de forme constitue la liaison entre les terrassements proprement dits et la chaussée et répond à des buts très divers : réglage, circulation de chantier, protection du sous-sol contre les intempéries, anticontamination, amélioration et homogénéisation de la portance du support de chaussée, protection contre le gel, etc. L'intérêt de disposer d'une bonne couche de forme n'est donc pas en général de conduire à une réduction de l'épaisseur de la chaussée.

Dans le cas où le terrain naturel comporte un substratum surmonté par une couche de sol relativement mince de meilleure portance, cette couche supérieure peut être considérée comme jouant le rôle d'une couche de forme.

Dans le cas où la chaussée repose sur une couche de forme, cette dernière peut éventuellement être prise en compte dans le dimensionnement de la chaussée en fonction de la qualité du matériau, de l'épaisseur prévue et de l'existence ou non d'un traitement aux liants hydrauliques. Une étude géotechnique complète est préalablement nécessaire. Les indications détaillées concernant la prise en compte de la couche de forme sont détaillées dans le volume 2, paragraphe 2.3.6.

3.3. CONDITIONS CLIMATIQUES

Le recensement des facteurs climatiques comprend celui des prévisions météorologiques et des données climatologiques.

- La pluviométrie prévisible au moment du chantier permet de déterminer la teneur en eau du sol support à prendre en compte pour le choix du CBR.
- L'étude de la cote de la nappe phréatique en fonction de la saison indique la nécessité de prévoir ou non une couche drainante.
- Le relevé des indices de gel est nécessaire pour établir la vérification au gel/dégel des structures (cf. chap. 7).

3.4. EPAISSEUR EQUIVALENTE DE LA CHAUSSEE

L'épaisseur équivalente totale de la chaussée est calculée selon la méthode de dimensionnement appliquée :

Dimensionnement forfaitaire : cf. chapitre 5, page 27.

Dimensionnement optimisé : cf. chapitre 6, page 30.

3.5. CONSTITUTION DE LA CHAUSSEE

3.5.1. GENERALITES

Une chaussée souple comprend généralement trois couches de qualité croissante de bas en haut : la couche de fondation, la couche de base, la couche de surface. La chaussée peut comporter une sous-couche de protection.

La couche de surface assure un rôle fonctionnel (étanchéité, bon uni, rugosité) et un rôle structurel.

La couche de base :

- assure essentiellement un rôle structurel en diffusant et diminuant les contraintes sur la couche de fondation et le sol support,
- constitue une bonne assise pour la couche de surface.

La couche de fondation :

- assure un support à la couche de base et en particulier permet le bon compactage de cette dernière,
- participe à la répartition des contraintes sur le sol support.

La sous-couche :

- évite la remontée des eaux de la nappe phréatique (rôle anti-capillaire),
- empêche la contamination des couches supérieures par les sols supports argileux (rôle anticontaminant).

Les chaussées aéronautiques souples sont dimensionnées de manière à limiter les contraintes dans toutes les couches et sur le sol support. Ce dernier étant considéré comme l'endroit le plus critique, les critères de dimensionnement utilisés sont la limite admissible des contraintes verticales sur le sol support.

La notion d'épaisseur équivalente est introduite pour tenir compte des qualités mécaniques différentes des couches.

L'épaisseur équivalente e d'une couche est égale à son épaisseur réelle e , multipliée par un coefficient numérique CE appelé coefficient d'équivalence.

L'épaisseur équivalente de la chaussée est égale à la somme des épaisseurs équivalentes des couches.

Les valeurs du tableau ci-dessous servent de référence pour des matériaux neufs conformes aux spécifications du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (références 2, 3, 4, 5, 6, 7) :

Matériaux neufs	Coefficient d'équivalence CE
Béton bitumineux, enrobé dense	2
Grave bitume	1,5
Grave émulsion	1,2
Grave traitée aux liants hydrauliques (ciment, laitier, cendres volantes, chaux)	1,5
Grave concassée bien graduée	1
Sable traité aux liants hydrauliques (ciment, laitier)	1
Grave roulée	0,75
Sable	0,5

Une chaussée correctement constituée comprend des coefficients d'équivalence nécessairement croissants de bas en haut. Les différentes couches traitées doivent être collées entre elles (nécessité des couches d'accrochage).

La notion de coefficient d'équivalence est développée en annexe du présent document (partie II, chap. I, p. 55).

3.5.2. CHOIX D'UNE CONSTITUTION

Le choix d'une constitution doit respecter :

- les règles structurelles énoncées ci-dessus,
- les règles de construction, qui portent sur la nature des matériaux à utiliser, la qualité et la formulation des composants, les épaisseurs minimales et maximales de mise en œuvre, le bon accrochage des couches, etc.,
- les règles de protection de la chaussée contre les risques de remontées capillaires, de contamination et du gel-dégel et pour assurer le drainage des eaux d'infiltration.

L'ensemble de ces dispositions se traduit comme suit pour les différentes couches :

COUCHE DE SURFACE (couche de ROULEMENT et éventuellement couche de LIAISON).

La couche de roulement doit être constituée de béton bitumineux. Des caractéristiques particulières (étanchéité, rugosité) sont requises pour la couche de roulement. La formulation et la compacité à obtenir sur chantier diffèrent de celles requises pour les chaussées routières. Dans l'attente de l'instruction spécifique aux chaussées aéronautiques, une étude d'enrobés doit être entreprise avec le concours du Service Technique des Bases Aériennes.

La couche de liaison, quand elle existe, peut être un enrobé dense.

COUCHE DE BASE ET COUCHE DE FONDATION

Le choix des matériaux pour couche de base et couche de fondation est soumis aux conditions suivantes :

Matériaux traités aux liants hydrocarbonés à chaud

GRAVE-BITUME : l'emploi de grave-bitume est recommandé en couche de base. Ce matériau est également utilisable en couche de fondation mais compte tenu de son coût élevé il est conseillé d'y substituer des matériaux non traités.

SABLE-BITUME : le sable-bitume présente un intérêt par rapport à la grave-bitume lorsque le sable est disponible à moindre coût que la grave. Compte tenu du peu d'expérience sur ce matériau, son emploi est limité aux couches de fondation sauf pour les chaussées recevant un trafic peu contraignant (mais dans ce cas une couche de base en matériaux non traités est souvent suffisante et plus avantageuse). Dans tous les cas, une étude en laboratoire doit être réalisée.

Matériaux traités aux liants hydrocarbonés à froid

GRAVE-EMULSION : la grave-émulsion est surtout intéressante à employer lorsqu'il est difficile de fabriquer des enrobés à chaud. Son emploi est limité aux couches de base. Des précautions particulières doivent être prises à la mise en œuvre.

Matériaux traités aux liants hydrauliques

Malgré l'intérêt économique à la construction que peuvent présenter les matériaux traités aux liants hydrauliques, leur emploi est fortement déconseillé, plus particulièrement pour la couche de base.

Ces matériaux sont soumis à un retrait systématique. De plus l'importance des charges appliquées aux chaussées aéronautiques crée dans la couche de base des contraintes nettement supérieures à celles subies par les chaussées routières. Les risques et conséquences sont multiples :

- pour les chaussées : fissuration de la couche de base et remontée des fissures dans la couche de roulement, évolution rapide des dégradations de la couche de roulement (épaufures, arrachements), perte de rugosité (remontée de fines) et perte de qualité de l'uni,
- pour les avions : ingestion par les réacteurs de granulats arrachés,
- pour le gestionnaire : surcoûts d'entretien (colmatage des fissures).

Aussi l'emploi de tels matériaux impose une étude particulière qui doit faire l'objet d'une demande d'avis auprès du Service Technique des Bases Aériennes ou doit être réalisée avec son concours.

Matériaux non traités :

GRAVE NON TRAITÉE : l'emploi de grave non traitée est possible en couche de base ou en couche de fondation sous réserve que l'épaisseur de matériaux traités que doit comporter la chaussée (cf. § 3.5.3. ci-après) soit respectée.

GRAVE ROULEE : l'emploi de grave roulée est réservé aux couches de fondation.

SOUS-COUCHE

Les matériaux de sous-couches doivent avoir des propriétés drainantes et anticontaminantes, vis-à-vis du sol et de la couche de fondation.

Les règles pour déterminer la granularité de ces matériaux sont les suivantes :

$$1 - \frac{d_{15}}{D_{85}} < 5 \text{ si le sol support est bien gradué}$$

$$\text{ou } \frac{d_{15}}{D_{85}} < 4 \text{ si le sol support a une granulométrie uniforme}$$

$$2 - 5 < \frac{d_{15}}{D_{15}} < 25$$

3 — La courbe granulométrique du matériau de sous-couche doit être approximativement parallèle à la courbe granulométrique du sol support.

d₁₅ est la dimension du tamis laissant passer 15 % du matériau de sous-couche.

D₁₅ est la dimension du tamis laissant passer 15 % du sol support.

D₈₅ est la dimension du tamis laissant passer 85 % du sol support.

L'emploi de nappes géotextiles non tissées est également possible en complément ou en remplacement de la sous-couche (référence 17).

3.5.3. EPAISSEUR DE MATERIAUX TRAITES

Une épaisseur suffisante de matériaux traités est nécessaire pour assurer un bon comportement des couches supérieures de la chaussée.

L'abaque de la figure 3 donne l'épaisseur équivalente minimale recommandée de matériaux traités en fonction de l'épaisseur équivalente totale *e* de la chaussée et du CBR du sol support.

Dans certains cas (forts CBR, faible trafic) il est possible d'adopter une valeur inférieure à celle ainsi déterminée après une étude particulière.

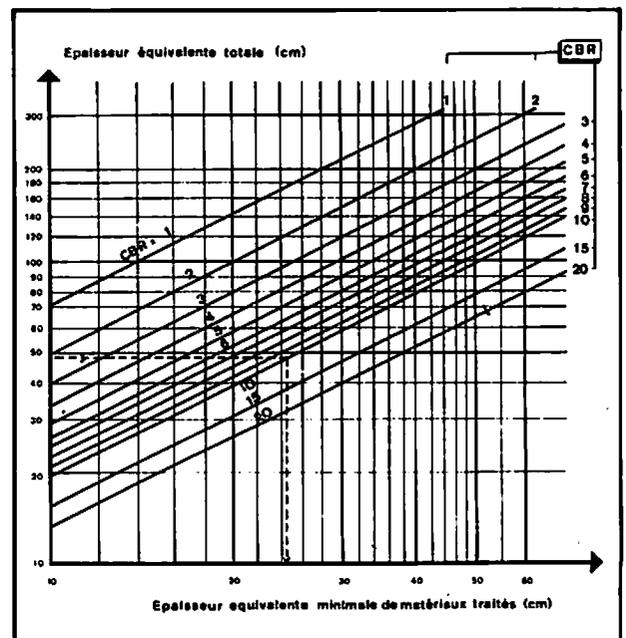


Figure 3. — Abaque pour le calcul de l'épaisseur équivalente de matériaux traités en fonction de l'épaisseur équivalente totale et du CBR du sol support.

3.5.4. PRISE EN COMPTE DES FACTEURS CLIMATIQUES

- **GEL/DEGEL** : une vérification au gel/dégel doit être effectuée selon les indications du chapitre 7, page 33.
- **TEMPERATURE** : malgré l'influence sensible de la température sur les matériaux aux liants hydrocarbonés, il n'est pas fait de correction d'épaisseur en fonction de ce paramètre : les valeurs des coefficients d'équivalence proposés pour ces matériaux en tiennent compte.
- **DRAINAGE** : bien que le drainage n'intervienne pas directement dans les calculs de dimensionnement, son importance est fondamentale pour la qualité des structures (cf. circulaire relative à la conception et au dimensionnement des réseaux de drainage des aérodromes). La méthode de dimensionnement suppose un drainage convenable.
- Dans les régions sujettes à des variations climatiques saisonnières très variées, il est tenu compte des variations de portance du sol.

4. DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES RIGIDES

Ce chapitre concerne les chaussées autres que les chaussées légères. Dans ce dernier cas, se reporter chapitre 11, p. 51.

Le dimensionnement d'une chaussée rigide comporte cinq étapes :

- 1 — Prévisions de trafic
- 2 — Détermination des caractéristiques du sol support
- 3 — Recensement des facteurs climatiques
- 4 — Détermination de l'épaisseur et du type de fondation
- 5 — Calcul de l'épaisseur de la dalle de béton.

4.1. PREVISIONS DE TRAFIC

Les prévisions de trafic portent sur les charges réelles et le nombre de mouvements réels des différents avions envisagés pendant la durée de vie de la chaussée.

Les prévisions sont établies par type d'aire. Deux aires sont distinctes lorsque :

- soit les charges réelles qu'elles reçoivent sont différentes,
- soit, tout en étant soumises aux mêmes charges réelles, leur fonction est différente (cf. § 2.2.1., p. 12),
- soit le nombre de mouvements réels des différentes charges réelles qu'elles reçoivent est différent.

L'épaisseur calculée de la dalle de béton étant plus sensible aux variations de charges qu'aux variations du nombre de mouvements, il est important de recenser avec le maximum de précision les charges réelles des différents avions pris en compte.

Contrairement aux chaussées souples, la méthode de dimensionnement forfaitaire est généralement d'une précision suffisante pour le calcul des chaussées rigides. Les prévisions de trafic s'établissent donc facilement (cf. chapitre 5).

La méthode de dimensionnement optimisé apporte une précision illusoire et n'est utilisée que pour des études particulières. Dans ce cas, seules les charges maximales des différents avions considérés sont à prendre en compte.

4.2. CARACTERISTIQUES DU SOL SUPPORT

Le sol support est caractérisé par son module de réaction K_0 .

Le module K_0 est mesuré sur le terrain naturel (en déblai) ou sur le sol rapporté (en remblai). Si le sol support comporte une couche de forme, il en est tenu compte sous forme d'une correction de K_0 de la même manière que pour une fondation (cf. § 4.4.2.).

Ce module de réaction K_0 est évalué à l'aide d'un essai de plaque effectué in situ, sur le sol compacté à 95 % de l'Optimum Proctor Modifié sur une épaisseur correspondant à celle qui est attendue lors de la réalisation des travaux (de l'ordre d'une trentaine de centimètres).

Le nombre et la répartition des points d'essais doivent être tels que les résultats soient significatifs (un point tous les 5 000 m² environ).

La description détaillée de la manière de réaliser les mesures de module de réaction est décrite dans le manuel pratique (volume 2).

4.3. CONDITIONS CLIMATIQUES

Le recensement des facteurs climatiques comprend celui des prévisions météorologiques et des données climatologiques :

- la pluviométrie et la température prévisibles au moment du chantier déterminent les conditions de bétonnage,
- l'étude de la cote de la nappe phréatique en fonction de la saison indique la nécessité de prévoir ou non une couche drainante,
- le relevé des indices de gel est nécessaire pour établir la vérification au gel/dégel des structures (cf. chap. 7).

4.4. COUCHE DE FONDATION

4.4.1. ROLE DE LA COUCHE DE FONDATION

La couche de fondation intervient de manière réduite dans les calculs comme simple terme correctif du module de réaction du sol support K_0 qui a lui-même une faible incidence (voir paragraphe 4.4.2. suivant). Cependant son rôle est important et multiple. Elle doit :

- assurer la continuité de l'appui des dalles au droit des joints,
- par son poids, s'opposer au gonflement éventuel du terrain naturel et contribuer à assurer la protection de ce dernier contre le gel,
- offrir une surface stable pour le déroulement des travaux de bétonnage,
- s'opposer à la remontée des fines par pompage au droit des joints.

4.4.2. PRISE EN COMPTE DANS LES CALCULS

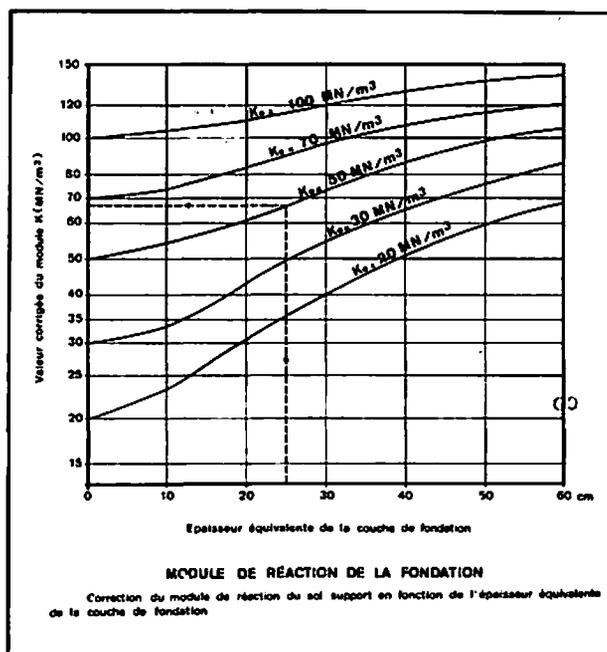
Le module de réaction du sol support K_0 est corrigé en fonction de l'épaisseur équivalente de la couche de fondation augmentée éventuellement de l'épaisseur équivalente de la couche de forme et de la sous-couche. La valeur obtenue est le module de réaction corrigé K .

La correction est effectuée à l'aide de l'abaque de la figure 4.

La définition de l'épaisseur équivalente est donnée au chapitre 3, paragraphe 5, page 17.

C'est le module corrigé K qui est utilisé dans les calculs et non le module qui serait mesuré à la surface de la couche et qui conduirait à des résultats optimistes.

Figure 4. — Module de réaction de la fondation. Correction du module de réaction du sol support en fonction de l'épaisseur équivalente de la couche de fondation.



4.4.3. CONSTITUTION DE LA COUCHE DE FONDATION

Dans le but d'assurer correctement les rôles décrits au paragraphe 4.4.1., les dispositions suivantes doivent être appliquées :

- la couche de fondation doit être traitée :
 - l'emploi de graves traités aux liants hydrauliques est recommandé,
 - le béton maigre est peu recommandé (il coûte plus cher et son utilité n'est pas démontrée).

Cette prescription ne s'applique pas au cas des petits aérodromes destinés à l'aviation légère.

- l'épaisseur réelle de la couche de fondation doit être au minimum de 15 cm de manière à assurer une bonne mise en œuvre du matériau. La couche traitée ne doit pas être trop épaisse (pas plus d'une vingtaine de centimètres) car alors le mode de fonctionnement de la structure de chaussée serait modifié,
- les spécifications des matériaux utilisables en couche de fondation sont celles applicables aux chaussées routières (références 5 et 6).

L'interposition d'une couche de béton poreux entre la dalle de béton et la couche de fondation traitée est possible afin de drainer et de diminuer les effets de pompage sous les chaussées très circulées.

La couche de fondation peut reposer sur une sous-couche dont le rôle est :

- d'éviter la remontée des eaux de la nappe phréatique (anticapillarité),
- d'empêcher la contamination de la fondation par les sols argileux (anticontamination).

Le sol support peut être amélioré par une couche de forme pour faciliter la circulation de chantier et permettre un bon réglage des couches supérieures (sous-couche et fondation).

4.5. EPAISSEUR DE LA DALLE DE BETON

Par suite de la rigidité du béton, les contraintes verticales appliquées sur la fondation par une dalle de béton chargée sont faibles ; la dalle assure la répartition des efforts dus aux charges par mobilisation de sa résistance à la flexion. Par conséquent, contrairement à ce qui se passe pour une chaussée souple, le critère de dimensionnement d'une chaussée rigide n'est pas celui de la pression limite au niveau du sol mais celui du moment de flexion admissible de la dalle.

Dans les calculs ayant servi à l'établissement des abaques dont il est question dans la suite, des valeurs constantes caractérisent le béton :

- module d'élasticité : $E = 30\ 000\ \text{MPa}$ ($\approx 300\ 000\ \text{kg/cm}^2$)
- coefficient de Poisson : $\nu = 0,15$

Il est montré en annexe (partie 2, p. 63) que les variations de ces paramètres sont pratiquement négligeables et influent peu sur les résultats pour les bétons habituellement utilisés.

4.5.1. CONTRAINTES DU BETON

Pour le dimensionnement, la seule caractéristique du béton prise en compte est la **contrainte admissible de traction par flexion** $\bar{\sigma}_b$. Elle est égale à la **résistance de traction par flexion à la rupture** du béton mesurée à 90 jours et notée $f_{t, 90}$ divisée par un **coefficient de sécurité CS** :

$$\bar{\sigma}_b = \frac{f_{t, 90}}{CS}$$

• résistance à la flexion

La résistance de traction par flexion est mesurée à la rupture sur éprouvettes prismatiques à 90 jours (mode opératoire : référence 8). La valeur à retenir est la moyenne des valeurs mesurées diminuée d'un écart-type correspondant à la dispersion prévisible sur le chantier (variable entre 10 % au minimum pour un chantier bien surveillé, et 20 %).

Lorsqu'il n'est pas possible de disposer de résultats d'essais à 90 jours, il est admis que la résistance du béton croît de 10 % entre 28 et 90 jours.

• coefficients de sécurité

Le coefficient de sécurité dépend du type des joints de construction et des joints de dilatation de la chaussée. Sa valeur est fixée à 1,8 pour les joints munis de dispositifs de transfert de charge efficaces et à 2,6 dans le cas contraire.

Les joints de retrait-flexion sciés tels qu'ils sont réalisés de façon courante sont supposés assurer un transfert de charges corrects par engrenement.

La nature du type de joint de dilatation n'intervient que pour le calcul des dalles adjacentes à ce joint.

Le tableau ci-après indique la valeur du coefficient de sécurité à retenir en fonction du type de joints :

Nature du dispositif de transfert de charge des joints de construction et de dilatation de la chaussée (*).	Autres conditions	Coefficient de sécurité
Sans dispositif	dans tous les cas	2,6
Goujons	—	1,8
Rainure et languette	moins de 2 conditions défavorables (voir ci-dessous)	1,8
	au moins 2 conditions défavorables (voir ci-dessous)	2,6

(*) Dispositions constructives : cf. paragraphe 4.5.3.

CONDITIONS DEFAVORABLES

- Sol support de module corrigé très faible ($K < 25 \text{ MN/m}^3$) ou non homogène ou gélif,
- Fondation non traitée,
- Fort trafic composé d'avions gros porteurs (type B 747, DC 10...),
- Importantes variations thermiques journalières (supérieures à $20 \text{ }^\circ\text{C}$).

4.5.2. EPAISSEUR DE LA DALLE DE BETON

- dimensionnement forfaitaire
cf. volume 1 - partie 1 - chapitre 5.
- dimensionnement optimisé
cf. volume 1 - partie 1 - chapitre 6.

Remarque : le dimensionnement forfaitaire est généralement suffisant à l'étude des chaussées rigides par suite de la faible variation des épaisseurs en fonction des charges.

4.5.3. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

La disposition des joints longitudinaux par rapport à l'axe de la chaussée doit être étudiée de sorte à limiter le risque de chargement alterné des dalles de part et d'autre de ces joints par les atterrisseurs principaux des avions les plus contraignants (figure 5).

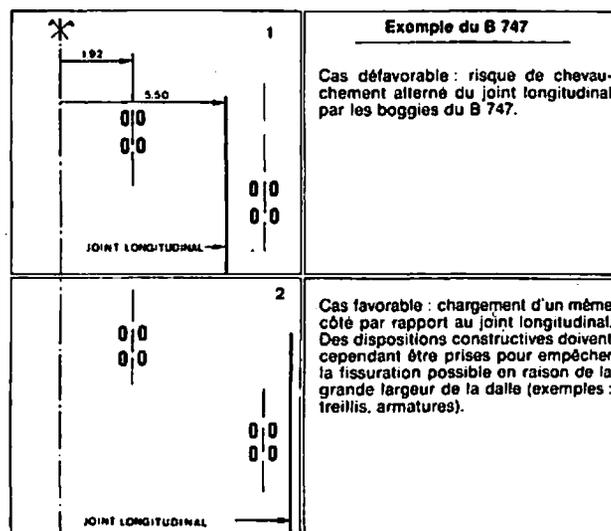
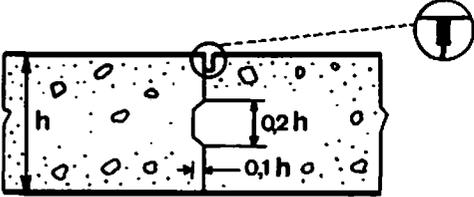
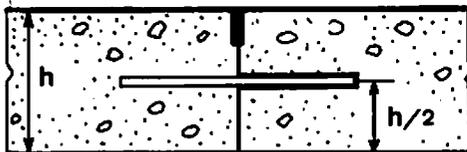
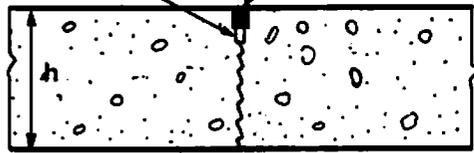
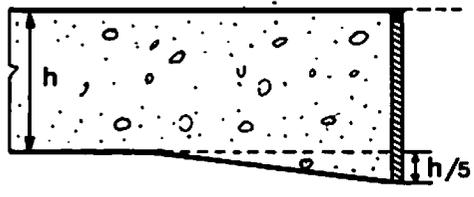
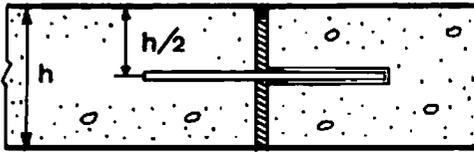


Figure 5. — Position des joints longitudinaux de chaussée rigide.

Les principales dispositions constructives du tableau B ci-après doivent être respectées.

Tableau B

**JOINTS DE CHAUSSEES RIGIDES :
DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES**

TYPE DE JOINT	SCHEMA	L : LOCALISATION C : CONDITIONS D'EMPLOI
CONSTRUCTION	 <p>Rainure et languette simple</p>	<p>L : Longitudinalement : à la limite des bandes de répandage</p> <p>Transversalement : lorsque le bétonnage est interrompu en cours de bande</p> <p>C : Rainures et languettes uniquement pour les épaisseurs de dalles supérieures à 20 cm</p> <p>Goujons conseillés pour les chaussées fortement circulées par des gros porteurs et sur sol médiocre</p>
	 <p>Rainure et languette avec goujon</p>	
	 <p>Goujon</p>	
RETRAIT-FLEXION		<p>L : Longitudinalement, lorsque la largeur de la bande de répandage dépasse 5 m</p> <p>Transversalement, réalisation systématique à intervalles réguliers de 5 m environ</p>
DILATATION		<p>L : A l'intersection d'ouvrages : — entre pistes et voies — aux abords des ouvrages d'art — le long des caniveaux</p> <p>C : Emploi afin d'éviter les poussées dangereuses</p>
	 <p>Goujon</p>	

4.5.4. EFFICACITE DES TRANSFERTS DE CHARGES

Aucun des dispositifs décrits n'a une efficacité parfaite. Les systèmes à rainure et languette ainsi que les joints de retrait-flexion qui travaillent par engrènement ne sont efficaces que dans la mesure où les joints ne sont pas trop ouverts sous l'action conjuguée du retrait hydraulique (définitif) et du retrait thermique (périodique) et perdent une partie de cette efficacité avec le temps du fait de l'usure des deux faces en contact sous l'action du trafic et des cycles thermiques.

A l'exemple de certains pays étrangers, le transfert de charge des joints à retrait-flexion pourrait être amélioré par des goujons. Cette possibilité n'est pas utilisée en France compte tenu du comportement d'ensemble correct des joints de retrait-flexion simplement sciés.

Afin de limiter l'ouverture des joints à rainure et languette et ainsi d'éviter que ceux-ci perdent de leur efficacité, il est possible de disposer des aciers de liaison. Cette technique peu utilisée en France, est appliquée dans certains pays étrangers. Toutefois, la largeur de chaussée ainsi liée ne doit pas dépasser 25 m afin d'éviter l'apparition de fissures parallèles aux joints.

L'efficacité des joints goujonnés de construction et de dilatation dépend peu de leur ouverture. Cependant le transfert de charge a également tendance à diminuer dans le temps, essentiellement du fait de l'élargissement et de l'ovalisation de la cavité cylindrique dans laquelle se déplace longitudinalement le goujon.

L'efficacité des dispositifs de transferts de charges dépend également de la qualité de la couche de fondation. C'est la raison essentielle pour laquelle il est recommandé de traiter cette dernière.

4.5.5. PRISE EN COMPTE DES FACTEURS CLIMATOLOGIQUES

- **GEL** : une vérification au gel/dégel doit être effectuée selon les indications portées au chapitre 7, page 33.
- **FACTEURS D'ORIGINE THERMIQUE OU HYGROMETRIQUE** : les contraintes de traction par flexion produites par les charges utilisant la chaussée ne sont pas les seules contraintes de traction par flexion auxquelles est soumis le béton. Toutefois, en règle générale, il est admis que si les dispositions constructives préconisées précédemment sont prises, il n'y a pas lieu de prendre en considération dans les calculs, les contraintes d'origine thermique ou hygrométrique sauf si les variations thermiques sont importantes (cf. § 4.5.1., p. 24).

Des contraintes peuvent tout d'abord provenir des gradients thermiques et des différences de teneur en eau entre les faces du béton.

D'autres contraintes peuvent aussi naître du frottement sur la fondation, qui s'oppose à une variation de longueur de l'ensemble de la dalle lors d'un changement de température ou de teneur en eau. Ces changements sont supposés durer suffisamment longtemps pour permettre à la dalle d'atteindre un état d'équilibre hygrométrique. Il s'agit donc de changements qu'il est possible de qualifier de saisonniers, par opposition à ceux (journaliers) qui produisent des gradients hygrothermiques cités au paragraphe précédent.

Dans tous les cas l'existence des joints limitant les dimensions des dalles a pour effet de réduire l'importance des contraintes des différents types. De plus, les contraintes du premier type tendent dans une large mesure à se compenser entre elles du fait que les gradients de température et de teneur en eau sont généralement du signe opposé.

Ces différentes contraintes n'augmentent finalement pas de manière sensible celles dues aux charges. Les coefficients de sécurité en tiennent compte.

Dans le cas de dalles de grandes dimensions, des aciers de couture (treillis, armatures) sont nécessaires pour éviter la fissuration.

5. DIMENSIONNEMENT FORFAITAIRE

5.1. PRINCIPE

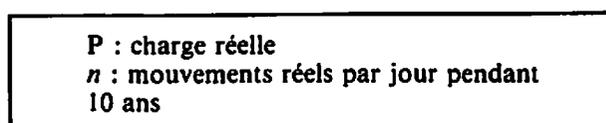
Le calcul de dimensionnement est appliqué sur chaque partie d'aire définie selon les indications du paragraphe 2.2. page 12.

Le dimensionnement forfaitaire permet de calculer l'épaisseur d'une chaussée en fonction d'une charge normale de calcul P'' obtenue à partir de la charge réelle pondérée P' avec un nombre réel de mouvements journaliers n donnés.

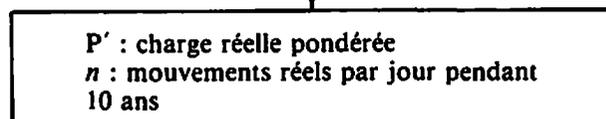
La charge réelle pondérée P' est elle-même obtenue à partir de la charge P , qui est :

- soit la charge maximale sur l'atterrisseur principal le plus contraignant,
- soit la charge désirée pour une catégorie d'atterrisseur.

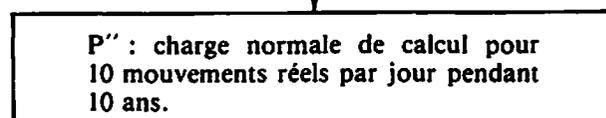
Données de trafic sur l'aire considérée :



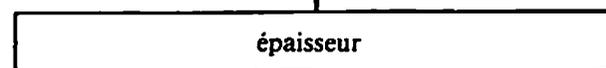
Pondération selon la fonction de l'aire :



Conversion de la charge P' considérée à n mouvements par jour pendant 10 ans en une charge équivalente P'' pour 10 mouvements par jour pendant 10 ans :



Utilisation des abaques ou formules de dimensionnement pour l'atterrisseur considéré :



Exemples d'utilisation de la méthode du dimensionnement forfaitaire :

- étude d'un aérodrome sur lequel évolue un type d'avion nettement le plus contraignant
- dimensionnement des chaussées rigides (la précision de la méthode est généralement suffisante)
- études préliminaires en l'absence de prévisions fiables de trafic.

5.2. INTENSITE DU TRAFIC ET DUREE DE VIE

Un trafic de 10 mouvements par jour pendant 10 ans correspondant à une hypothèse de trafic tout à fait raisonnable et prudente, ce trafic a été retenu par convention pour l'établissement des abaques. L'expérience a montré que le dimensionnement ainsi obtenu était satisfaisant.

Toutefois, il peut se faire que ce niveau de trafic soit manifestement inférieur au trafic prévisible de l'aérodrome (cas d'un aérodrome très important) ou qu'au contraire il l'excède largement (cas d'un aérodrome à trafic réduit). Il est alors nécessaire de tenir compte de l'intensité réelle du trafic escompté.

La correction repose sur une relation entre les couples (P', n) où P' est la charge réelle pondérée, n le nombre d'applications en mouvements réels/jour pendant 10 ans et le couple $(P'', 10)$ où P'' est la charge normale de calcul (par définition appliquée dix fois par jour) :

$$P'' = \frac{P'}{CT} \quad (2)$$

avec $CT = 1,2 - 0,2 \log n$ (logarithme décimal) (3)

La relation (3) est traduite par l'abaque représenté sur la figure 6.

Remarques importantes

1 — La relation (3) n'est valable que pour une durée de vie de dix ans de la chaussée étudiée. Pour une autre durée, il convient de se ramener à dix ans.

Exemple : 4 mouvements réels/jour pendant 20 ans équivalent à 8 mouvements réels/jour pendant 10 ans et n est alors égal à 8 mouvements réels/jour.

2 — La valeur du coefficient de correction CT est limitée à 1,2 en borne supérieure (hypothèse minimale de 1 mvt/j) et à 0,8 en borne inférieure (hypothèse maximale de 100 mvt/j). Quand le nombre de mouvements sort de ces limites, il est recommandé d'utiliser le dimensionnement optimisé.

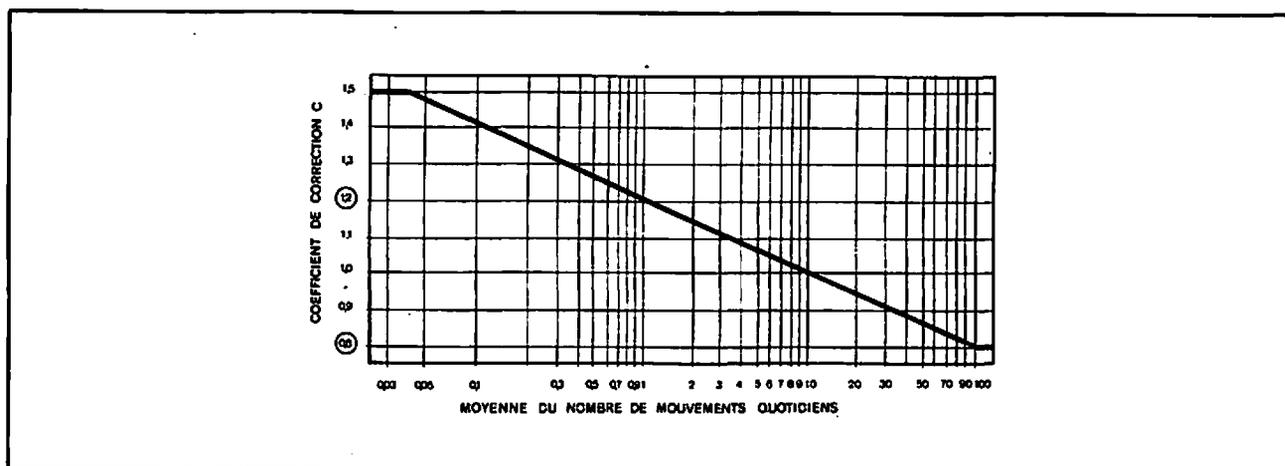


Figure 6. — Abaque pour la correction de la charge réelle pondérée en fonction de l'intensité moyenne du trafic.

5.3. CALCUL DE L'ÉPAISSEUR DE LA CHAUSSEE

• Rappel des données nécessaires

- la charge normale de calcul P'' ,
- le CBR du sol support (chaussées souples),
- le module de réaction K corrigé du sol support et la contrainte admissible de traction par flexion σ_b , du béton (chaussées rigides).

• Abaques

Selon le cas est utilisé :

- soit l'abaque particulier de l'avion étudié,
- soit l'abaque atterrisseur-type correspondant au cas étudié. Ces abaques figurent dans le volume 2.

• Remarque : cas d'avions ne figurant pas dans l'instruction.

Lorsque le calcul doit être fait pour un avion ou plus généralement pour un atterrisseur dont les abaques ne figurent pas dans l'instruction, les abaques de l'avion dont les caractéristiques géométriques de l'atterrisseur principal sont les plus proches de celles de l'avion considéré, sont utilisés.

Dans le cas d'atterrisseurs de géométrie complexe il convient :

- pour les chaussées souples, de suivre une méthode de calcul décrite en annexe,
- pour les chaussées rigides, de s'adresser au Service Technique des Bases Aériennes qui dispose du programme de calcul informatique des chaussées (calcul manuel long et complexe).

• Aires de stationnement

Comme indiqué au paragraphe 2.2, page 12, la charge réelle P est pondérée par 1,2 pour le calcul des aires sur lesquelles stationnent effectivement les avions (facteur majorant). Par contre, le nombre de mouvements réels à prendre en compte pour chacune de ces aires est généralement inférieur à celui de la piste car tous les avions ne fréquentent pas la même aire (facteur minorant). Par combinaison il se peut que l'épaisseur trouvée soit inférieure à celle qui serait calculée dans le cas de la piste (c'est-à-dire sans pondération mais avec le nombre de mouvements pour celle-ci). Il est montré en annexe (chap. 3, p. 66) que ce résultat est obtenu dès que le nombre de mouvements sur l'aire est inférieur à sept fois le nombre de mouvements sur la piste. Dans ce cas, l'épaisseur à retenir est celle calculée dans les mêmes conditions de pondération et de nombre de mouvements que pour la piste (par contre les caractéristiques du sol support de l'aire de stationnement sont à prendre en compte).

Cette vérification ne s'applique qu'aux aires recevant l'avion pour lequel est calculée la piste.

6. DIMENSIONNEMENT OPTIMISE

6.1. PRINCIPE

Alors que le dimensionnement forfaitaire ne prend en compte qu'un type d'avion, le dimensionnement optimisé permet de calculer une épaisseur de chaussée en considérant plusieurs types d'avions à leurs fréquences et charges respectives et pour une durée de vie donnée.

La méthode présente l'avantage de convertir les mouvements réels de chacune des charges et atterrisseurs réels considérés en mouvements équivalents de mêmes charges de référence (voir annexe partie 2, p. 64). Deux couples (charge et atterrisseurs, nombre de mouvements) sont équivalents quand ils produisent la même fatigue (chaussée et sol support).

Il est donc possible de comparer l'action relative de différents avions et de prendre en compte ces actions différentes.

Aussi de manière pratique, la méthode du dimensionnement optimisé est utilisée lorsque doivent être considérés plusieurs types d'avions presque aussi contraignants les uns que les autres (cas des aérodromes importants) ainsi que pour l'octroi des dérogations (cf. chapitre 8, p. 43).

6.2. INTENSITE DU TRAFIC ET DUREE DE VIE

Le dimensionnement optimisé prend en compte le nombre prévu de mouvements réels de chaque avion pour la durée de vie envisagée.

Compte tenu de la difficulté d'établir des prévisions précises (charges et nombre de mouvements), il est recommandé d'effectuer deux calculs, l'un pour une hypothèse basse, l'autre pour une hypothèse haute. La sensibilité des différents paramètres ainsi que la marge d'erreur de calcul est ainsi appréciée. Le résultat (épaisseur) est beaucoup plus sensible aux variations de charges qu'à celles du nombre de mouvements. Il en est de même de la durée de vie effective. Aussi cette dernière risque d'être différente si le trafic réel s'éloigne des prévisions initiales.

Du fait de la difficulté plus grande de renforcer une chaussée rigide plutôt qu'une chaussée souple (cf. § 10, p. 47 et annexe, partie 2, p. 65), la durée de vie d'une chaussée est généralement choisie selon les indications du tableau ci-dessous :

DUREE DE VIE DES CHAUSSEES

STRUCTURE \ TRAFIC	- Aérodrômes à faible trafic (Prévisions de trafic non fiables)	- Aérodrômes à fort trafic (Prévisions de trafic fiables).
SOUPLE	10 ans	10 ans
RIGIDE	Structure rigide déconseillée	10 à 20 ans

6.3. CALCUL DE L'ÉPAISSEUR DE LA CHAUSSEE

• Rappel des données nécessaires

- les prévisions de trafic sur la durée de vie choisie,
- le CBR du sol support (chaussées souples),
- le module de réaction corrigé K du sol support et la contrainte admissible $\bar{\sigma}_b$ de traction par flexion du béton (chaussées rigides).

• **Méthode de calcul**

Le calcul a pour but de déterminer l'épaisseur équivalente totale (chaussée souple) ou l'épaisseur réelle de la dalle de béton (chaussée rigide).

1 — Le calcul est conduit pour chaque partie d'aire définie au paragraphe 2.2. page 12.

2 — Tous les modèles d'avions sont recensés :

- deux modèles du même avion sont considérés comme différents si les caractéristiques de leurs atterrisseurs sont différentes (nombre de roues, dimensions, pression...),
- plusieurs charges réelles $P_{i,j}$ peuvent être considérées par modèle (i) avec leur nombre de mouvements réels $n_{i,j}$ et sont transformées en charges réelles pondérées $P'_{i,j}$ pour tenir compte de la fonction de l'aire.

3 — En vue d'un calcul par itération une épaisseur initiale est choisie, épaisseur équivalente totale (chaussée souple) ou épaisseur réelle de dalle de béton (chaussée rigide) :

- pour chacun des avions paraissant les plus contraignants il convient de calculer l'épaisseur qui lui serait nécessaire en appliquant la méthode du dimensionnement forfaitaire,
- la plus grande des épaisseurs ainsi obtenue, majorée de quelques centimètres, fournit en général une épaisseur initiale assez proche de la valeur définitive.

4 — Pour chaque modèle d'avion (i), la charge admissible P_{oi} est déterminée à partir des abaques chaussée souple ou chaussée rigide correspondant à l'épaisseur choisie. S'il n'existe pas d'abaque pour l'avion considéré, celui du modèle avion dont les caractéristiques s'en rapprochent le plus est utilisé.

5 — Pour chaque modèle d'avion (i), les $n_{i,j}$ mouvements réels de chaque charge réelle pondérée $P'_{i,j}$ sont convertis en $n'_{i,j}$ mouvements équivalents à la charge admissible P_{oi} . Pour cela, pour chaque modèle d'avion (i) et chaque charge $P'_{i,j}$:

- le rapport $R_{i,j} = \frac{P'_{i,j}}{P_{oi}}$ est calculé. Ce rapport ne doit pas dépasser 1,2 pour les aires de stationnement et 1,5 pour les autres aires (il est toutefois recommandé de ne pas dépasser également 1,2 dans ce cas). Si les valeurs sont dépassées, le calcul est recommencé à la séquence 3 avec une épaisseur initiale majorée,
- le coefficient de pondération $C_{P_{i,j}}$ des mouvements réels est calculé soit par la relation :

$$C_{P_{i,j}} = 10^{5(R_{i,j} - 1)} \quad (4)$$

soit à l'aide de l'abaque représenté sur la figure 7, qui traduit la relation précédente,

- le nombre de mouvements équivalents $n'_{i,j}$ est égal au nombre de mouvements réels $n_{i,j}$ multiplié par $C_{P_{i,j}}$:

$$n'_{i,j} = n_{i,j} \times C_{P_{i,j}} \quad (5)$$

6 — Le nombre total des mouvements équivalents de tous les modèles d'avions est calculé en additionnant tous les mouvements équivalents $n'_{i,j}$. Ce nombre est aussi appelé **trafic équivalent**.

7 — Si le trafic équivalent est sensiblement inférieur à 36 500 l'épaisseur essayée est trop importante (surdimensionnement) et le calcul doit être repris depuis la séquence 3 avec une épaisseur plus petite.

Au contraire si le trafic équivalent est sensiblement supérieur à 36 500, l'épaisseur essayée est insuffisante (sousdimensionnement) et le calcul doit être repris depuis la séquence 3 avec une épaisseur plus grande.

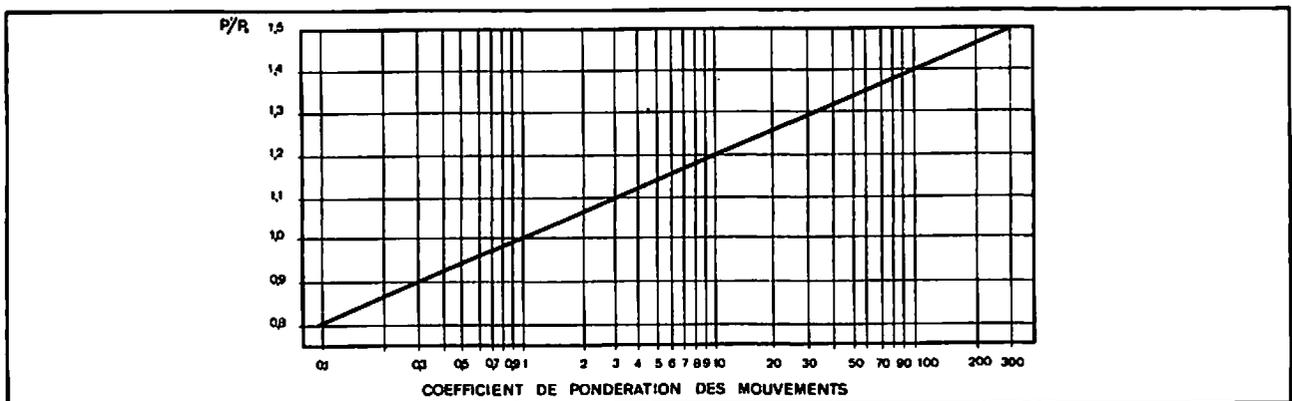


Figure 7. — Abaque pour la pondération des mouvements réels trafic équivalent.

Des itérations sont ainsi effectuées jusqu'à trouver l'épaisseur telle que le trafic équivalent soit le plus proche possible par défaut de 36 500.

La valeur ainsi déterminée est l'épaisseur recherchée.

- Le nombre de mouvements équivalents de certains modèles d'avions et pour certaines charges devient rapidement négligeable par rapport au trafic équivalent lorsque l'épaisseur est augmentée (dès que le rapport R_i correspondant est inférieur à 0,8). Ces avions peuvent alors être négligés dans la suite des calculs. C'est parfois le cas pour les avions à l'atterrissage.

- Il est conseillé de ne pas descendre au-dessous d'un pas d'itération de 1 cm pour les chaussées rigides et de 2 cm pour les chaussées souples, ce qui correspond à la précision maximale qu'il convient d'attendre d'un calcul de dimensionnement optimisé.

Pour l'ensemble des opérations, il est conseillé d'utiliser une feuille de calcul du modèle suivant lorsque les calculs sont faits manuellement. Le Service Technique des Bases Aériennes dispose d'un modèle de calcul informatique.

Avions	Charges réelles pondérées	Charges admissibles	$R = P'/P_0$	CP	Mouvements réels	Mouvements équivalents
I	$P'_{1,1}$	$P_{0,1}$	$R_{1,1}$	$CP_{1,1}$	$n_{1,1}$	$n'_{1,1}$

	$P'_{1,j}$		$R_{1,j}$	$CP_{1,j}$	$n_{1,j}$	$n'_{1,j}$

	P'_{1,a_1}		R_{1,a_1}	CP_{1,a_1}	n_{1,a_1}	n'_{1,a_1}
...
i	$P'_{i,1}$	$P_{0,i}$	$R_{i,1}$	$CP_{i,1}$	$n_{i,1}$	$n'_{i,1}$

	$P'_{i,j}$		$R_{i,j}$	$CP_{i,j}$	$n_{i,j}$	$n'_{i,j}$

	P'_{i,a_i}		R_{i,a_i}	CP_{i,a_i}	n_{i,a_i}	n'_{i,a_i}
...
M	$P'_{m,1}$	$P_{0,m}$	$R_{m,1}$	$CP_{m,1}$	$n_{m,1}$	$n'_{m,1}$

	$P'_{m,j}$		$R_{m,j}$	$CP_{m,j}$	$n_{m,j}$	$n'_{m,j}$

	P'_{m,a_m}		R_{m,a_m}	CP_{m,a_m}	n_{m,a_m}	n'_{m,a_m}
Trafic équivalente total : $\sum_n n'_{i,j}$						

Remarque : La méthode du dimensionnement optimisé est utilisable pour d'autres types de calculs que celui des épaisseurs :

- 1 — Octroi des dérogations (cf. chapitre 8, p. 43).
- 2 — Potentiel ou durée de vie résiduelle par comparaison des trafics équivalents total et écoulé d'une chaussée existante.

• Aires de stationnement

Comme il est indiqué au paragraphe 2.2, page 12, les charges réelles P des différents avions sont pondérées par 1,2 pour le calcul des aires sur lesquelles stationnent effectivement les avions (facteur majorant). Par contre, le nombre de mouvements réels, par avion, à prendre en compte pour chacune de ces aires est inférieur à celui de la piste, car un avion ne va pas nécessairement sur la même aire (facteur minorant). Par combinaison, il se peut que l'épaisseur trouvée soit inférieure à celle qui serait calculée dans le cas de la piste (c'est-à-dire sans pondération mais avec le nombre de mouvements pour celle-ci). Dans ce cas, l'épaisseur à retenir est celle calculée dans les mêmes conditions de pondération et de nombre de mouvements que pour la piste (par contre les caractéristiques du sol support de l'aire de stationnement sont à prendre en compte).

Dans cette éventualité, il est nécessaire de réexaminer la répartition du trafic entre les postes de stationnement de façon à être sûr de prendre en compte les cas les plus critiques pouvant se présenter à l'avenir. En effet les conditions d'exploitation dans le temps peuvent conduire à des répartitions de trafic entre postes de stationnement difficilement prévisibles au moment de l'élaboration du projet.

7. GEL

7.1. GENERALITES

L'épaisseur en général importante des chaussées aéronautiques (par comparaison aux chaussées routières) assure leur protection contre les conséquences du gel si elles sont constituées de matériaux non gélifs.

Toutefois quelques cas de dégradations dues au gel ont démontré la nécessité de vérifier les ouvrages au gel-dégel selon les indications portées ci-dessous.

7.2. EFFETS DU GEL

Pendant une période de gel, un front de gel voisin de l'isotherme 0 °C pénètre dans la chaussée. Si le front atteint une couche constituée par un matériau gélif, l'eau est attirée vers le front de gel et des lentilles de glace provoquant des gonflements se forment. Des déformations apparaissent alors de manière plus ou moins importante selon l'homogénéité horizontale des couches concernées, la constance du niveau de la nappe phréatique, la qualité du drainage, etc.

Au dégel l'eau accumulée est libérée et le matériau a alors une force portante réduite. Le réchauffement se faisant plus rapidement par le haut que par le bas, une partie dégelée du sol gélif peut se situer au-dessus d'une tranche encore gelée. Ceci aggrave le phénomène puisque l'eau ne peut pas s'échapper (réf. 16).

7.3. VERIFICATION DES CHAUSSEES AU GEL-DEGEL

7.3.1. PRINCIPE

La vérification consiste à comparer la profondeur des matériaux gélifs avec la profondeur atteinte par l'isotherme 0 °C.

La protection contre les gonflements est totalement assurée si la chaussée a une épaisseur suffisante pour supprimer la pénétration du gel dans les matériaux gélifs.

7.3.2. CARACTERISATION DE LA GELIVITE DES SOLS

La classification du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées est employée. Elle répartit en trois classes de sensibilité au gel les sols et matériaux (référence 10).

SGn : sols non gélifs
SGp : sols peu gélifs } sols gélifs
SGt : sols très gélifs

La sensibilité au gel est appréciée par l'essai de gonflement (réf. 16).

Dans le cas où il n'est pas possible de procéder à des résultats d'essais de gonflements, le tableau ci-dessous donne la classification à retenir :

Classification géotechnique des sols non traités	Classe de sensibilité au gel pouvant être adoptée en l'absence d'essai de gonflement
D ₁ , D ₂ , D ₃ , D ₄	SGn
A ₄ , B ₁ , B ₂ , B ₃ , B ₄	SGp
A ₁ , A ₂ , A ₃ , B ₅ , B ₆ , E ₁	SGt

7.3.3. CALCUL DE LA PROFONDEUR DE GEL

La profondeur de gel est calculée par la formule de Berggren modifiée, adaptée au cas des multicouches (cf. annexe, partie 2, p. 67).

L'utilisation de cette formule nécessite la connaissance :

- des indices de gel du lieu considéré,
- des paramètres thermiques du sol support et des matériaux des couches de chaussée.

• LES INDICES DE GEL

L'indice de gel dépend de l'hiver choisi comme référence. Il est distingué selon les critères du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées :

- l'hiver exceptionnel,
- l'hiver rigoureux non exceptionnel.

Les indices de gel des hivers exceptionnels et des hivers rigoureux non exceptionnels des principales stations météorologiques sont fournis dans le manuel pratique (vol. 2).

• LES PARAMETRES THERMIQUES

Les paramètres thermiques des sols supports ou des couches de chaussée (capacité calorifique, chaleur latente, coefficient de conductibilité thermique) dépendent de leur nature et des caractéristiques géotechniques. Ils sont calculés en utilisant les abaques et tableaux donnés dans le Manuel Pratique (vol. 2).

Pour les matériaux ne figurant pas dans les tableaux et abaques, une étude particulière doit être demandée à un laboratoire.

7.4. PROTECTION DES CHAUSSEES CONTRE LE GEL-DEGEL

7.4.1. NIVEAUX DE PROTECTION

Trois niveaux de protection sont possibles, ils dépendent :

- de l'importance de l'aérodrome,
- de la fonction de la chaussée,
- de l'homogénéité horizontale du sol support.

PROTECTION TOTALE :

Cette protection est calculée de telle manière que la profondeur de gel pour l'hiver rigoureux exceptionnel ne puisse atteindre les couches de chaussées ou le sol support éventuellement gélifs.

PROTECTION FORTE :

Le principe est identique à celui de la protection totale mais la profondeur de gel est celle de l'hiver rigoureux non exceptionnel.

PROTECTION REDUITE

La protection réduite laisse admettre dans les conditions de l'hiver rigoureux non exceptionnel que :

- le gel puisse pénétrer de quelques centimètres dans les couches gélives,
- le trafic soit réduit pendant le dégel.

La profondeur de pénétration admissible dépend du cas étudié et doit être fixée avec demande d'avis auprès du Service Technique des Bases Aériennes. Le tableau suivant donne le niveau de protection recommandé :

NIVEAUX DE PROTECTION CONTRE LE GEL

Trafic annuel passagers de l'aérodrome	SOL SUPPORT	
	homogène	non homogène
Supérieur à 200 000 Pistes et voies de circulation	FORTE	TOTALE
	Aires de stationnement	FORTE
Compris entre 50 000 et 200 000 Pistes et voies de circulation	FORTE	FORTE
	Aires de stationnement	REDUITE
Inférieur à 50 000 Pistes et voies de circulation	REDUITE	REDUITE
	Aires de stationnement	REDUITE

7.4.2. MOYENS DE PROTECTION

Selon la profondeur atteinte par gel et le niveau de protection requis, la protection consiste à :

- remplacer les matériaux gélifs des couches de chaussée atteintes par le gel par des matériaux non gélifs,
- augmenter l'épaisseur des couches non gélives ou interposer une couche formant écran thermique au-dessus des couches ou du sol gélif. A ce stade, il peut être nécessaire de recommencer certains calculs de dimensionnement ou de vérification au gel.

8. CHARGES ADMISSIBLES

La détermination des charges admissibles pour les chaussées existantes constitue le problème réciproque du dimensionnement. En fait, trois types de questions se regroupent sous ce titre :

- 1 — Pour une chaussée considérée, comment publier des renseignements sur sa portance (ou force portante ou résistance) en fonction de ses caractéristiques.
- 2 — Inversement, à partir de ces renseignements comment en déduire la charge admissible pour tout avion.
- 3 — Sous quelles conditions accorder les dérogations lorsque les charges réelles dépassent les charges admissibles.

De plus, deux systèmes de publication de renseignements sur la résistance des chaussées coexistent à la date d'application de la présente Instruction :

- la METHODE PAR ATERRISSEURS-TYPES, utilisée jusqu'à présent par la France,
- la METHODE ACN/PCN, qui est une norme de l'OACI figurant à l'annexe 14 de la convention relative à l'Aviation Civile Internationale, est applicable aux Etats signataires à compter du 26.11.81 : elle doit se substituer progressivement à la précédente.

Le présent chapitre a donc pour but :

- de décrire les deux méthodes ainsi que leurs conditions d'utilisation,
- de préciser les mesures transitoires qui résultent de l'utilisation des deux méthodes,
- d'indiquer comment sont prises les décisions d'octroi des dérogations pour les deux méthodes.

8.1. PUBLICATION DES RENSEIGNEMENTS SUR LA PORTANCE DES CHAUSSEES

8.1.1. METHODE DES ATERRISSEURS-TYPES

La quasi-totalité des avions actuels étant équipée d'atterrisseurs à roue simple, à jumelage ou à boggie, les chaussées sont caractérisées par trois valeurs de charges admissibles correspondant chacune à la charge limite autorisée sur l'atterrisseur-type à raison de dix mouvements par jour pendant dix ans (trafic normal).

Exemple : 20 tonnes pour la Roue Simple Isolée, 35 tonnes pour le Jumelage et 50 tonnes pour le Boggie sont notés symboliquement :

20 T/RSI - 35 T/J - 50 T/B

Les caractéristiques des atterrisseurs-types sont choisies parmi les plus sévères de celles des atterrisseurs d'avions existants (cf. 2.1.1.). Ce mode de fixation des charges admissibles présente l'inconvénient de négliger les variations que présente dans la réalité une même catégorie d'atterrisseurs : d'un modèle d'avion à un autre, la voie de l'atterrisseur et la pression des pneumatiques peuvent être sensiblement différentes, modifiant notablement à poids égal, l'action exercée sur la chaussée. Il faudrait donc en toute rigueur fixer une charge admissible par modèle d'avion sur une chaussée donnée ce qui dans la pratique n'est évidemment pas applicable.

Toutefois, chaque fois que la précision du calcul le justifie (cas des dérogations), il est pris en compte les caractéristiques exactes des atterrisseurs, ce qui ne prive pas certains avions des avantages que leur vaut la conception de leur train d'atterrissage.

8.1.2. METHODE ACN/PCN

La portance d'une chaussée destinée à des aéronefs dont la masse sur l'aire de trafic est supérieure à 5 700 kg est communiquée en indiquant tous les renseignements suivants :

- a) numéro de classification de chaussée (PCN)
- b) type de chaussée considérée pour la détermination des numéros ACN-PCN
- c) catégorie du sol support
- d) pression maximale admissible des pneumatiques
- e) base d'évaluation.

L'ACN (Aircraft Classification Number) ou numéro de classification d'avion est un nombre qui exprime l'effet RELATIF d'un avion à une masse donnée sur une chaussée pour une catégorie type spécifiée du sol support.

Le PCN (Pavement Classification Number) ou le numéro de classification de chaussée est le nombre qui exprime la portance d'une chaussée pour une exploitation sans restriction.

Différents numéros PCN peuvent être communiqués si la résistance d'une chaussée est soumise à des variations saisonnières sensibles.

Le numéro de classification de chaussée (PCN) indique qu'un avion dont le numéro de classification (ACN) est inférieur ou égal à ce PCN peut utiliser la chaussée sous réserve de limitation due à la pression des pneumatiques.

• **Description des symboles utilisés**

Les renseignements concernant le type de chaussée considérée pour la détermination des numéros ACN et PCN, la résistance du sol support, la pression maximale admissible des pneus et la base d'évaluation sont communiqués en utilisant les lettres de code ci-après :

Catégorie d'indications	Lettre de code
1 — TYPE DE CHAUSSEE souple rigide * Si la construction est composite ou non normalisée, une note le précisant est ajoutée.	F R
2 — CATEGORIE DE RESISTANCE DU SOL SUPPORT Résistance élevée caractérisée par $K = 150 \text{ MN/m}^3$ et représentant toutes les valeurs de K supérieures à 120 MN/m^3 pour les chaussées rigides ou par $\text{CBR} = 15$ et représentant toutes les valeurs CBR supérieurs à 13 pour les chaussées souples.	A
Résistance moyenne caractérisée par $K = 80 \text{ MN/m}^3$ et représentant une gamme de valeurs K de 60 à 120 MN/m^3 , ou par $\text{CBR} = 10$ et représentant une gamme de valeurs CBR de 8 à 13 pour les chaussées souples.	B
Résistance faible caractérisée par $K = 40 \text{ MN/m}^3$ et représentant une gamme de valeurs de K de 25 à 60 MN/m^3 pour les chaussées rigides, ou par $\text{CBR} = 6$ et représentant une gamme de valeurs de CBR de 4 à 8 pour les chaussées souples.	C
Résistance ultra-faible caractérisée par $K = 20 \text{ MN/m}^3$ et représentant toutes les valeurs de K inférieurs à 25 MN/m^3 pour les chaussées rigides, ou par $\text{CBR} = 3$ et représentant toutes les valeurs de CBR inférieures à 4 pour les chaussées souples.	D
3 — PRESSION MAXIMALE ADMISSIBLE DES PNEUMATIQUES Catégorie de pression des pneumatiques. Elevée (pas de limite de pression) Moyenne (pression limitée à 1,50 MPa) Faible (pression limitée à 1,00 MPa) Très faible (pression limitée à 0,50 MPa)	W X Y Z
4 — BASE D'EVALUATION Evaluation technique. Etude spécifique des caractéristiques de la chaussée et utilisation de techniques d'études du comportement des chaussées.	T
Evaluation faisant appel à l'expérience acquise sur les avions Connaissance du type et de la masse spécifique des avions utilisés régulièrement et que la chaussée supporte de façon satisfaisante.	U

Exemples :

1 : Si la portance d'une chaussée rigide reposant sur un sol support de résistance moyenne a, par évaluation technique, été fixée à $\text{PCN} = 80$ et s'il n'y a pas de limite de pression des pneus, les renseignements communiqués sont les suivants :

$$\text{PCN} = 80/R/B/W/T$$

2 : Si la force portante d'une chaussée composite, qui se comporte comme une chaussée souple et qui repose sur un sol support de résistance élevée, a été évaluée, en utilisant l'expérience acquise sur les avions, à PCN = 50, et que la pression maximale admissible des pneus soit de 1,00 MPa, les renseignements communiqués sont les suivants :

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

Note - construction composite

• Calcul et publication des ACN

Le numéro ACN d'un avion est déterminé conformément à des procédures normalisées qui sont associées à la méthode ACN/PCN (cf. annexe, partie 5, p. 69).

Tableau C
ACN DES PRINCIPAUX AVIONS
COMMERCIAUX

L'ACN est calculé en fonction des positions du centre de gravité. Le centrage extrême arrière correspondant à la masse maximale sur l'aire de trafic est normalement utilisée pour calculer l'ACN. Dans des cas exceptionnels, le centrage extrême avant peut avoir pour effet que la charge appliquée sur l'atterrisseur avant soit plus critique.

Plusieurs types d'avion actuellement en service ont été évalués sur des chaussées rigides et des chaussées souples sur la base des quatre catégories de sol support indiqués précédemment. Les résultats pour les principaux avions sont présentés dans le tableau ci-contre. Les résultats détaillés par modèle figurent également dans les tableaux de caractéristiques des avions, volume 2 (manuel pratique) de l'Instruction.

Avions	Masses %		Pression (MPa)	ACN							
	maxi. mini.	sur alt. principal		Chaussées rigides				Chaussées souples			
				A	B	C	D	A	B	C	D
A-300B2	142 000 85 690	46.5	1.23	37	44	52	60	40	45	55	70
B-707-320B	148 778 64 764	46.0	1.24	19	22	26	30	21	23	26	35
B-727-200 (Standard)	78 471 44 293	46.4	1.15	14	15	18	20	15	16	17	23
B-737-100	45 722 25 942	46.3	1.02	46	48	51	53	41	43	49	54
B-747-100	334 751 162 703	23.125	1.55	23	25	26	27	21	22	24	28
Caravelle	55 960 31 800	46.0	0.88	24	26	28	29	22	23	26	30
Concorde	185 066 78 698	48.0	1.26	12	13	14	15	12	12	13	15
DC-8-63	162 386 72 002	47.6	1.34	44	51	60	69	46	50	60	81
DC-9-41	52 163 27 821	46.65	1.10	18	20	23	26	19	20	22	28
DC-10-40	253 105 122 567	37.7	1.17	8	9	10	12	8	9	10	12
IL-62	161 570 66 400	45.5	1.65	61	71	82	91	65	72	81	98
L-1011	195 952 108 862	47.4	1.33	21	22	23	29	21	22	26	32
Mercure	54 080 31 080	46.5	0.87	17	19	23	26	18	19	22	29
				52	163	163	178	13	14	15	18
				44	53	64	75	53	59	70	97
				20	21	24	28	22	23	26	32
				47	54	62	70	48	52	61	76
				17	17	19	21	16	16	18	23
				45	52	62	73	52	56	66	91
				24	25	28	33	25	27	29	38
				30	32	34	36	27	29	34	37
				15	16	18	19	14	15	17	20

Les deux masses totales indiquées dans la colonne 2 du tableau ci-dessus pour chaque type d'avion sont la masse maximale sur l'aire de trafic et la masse à vide en ordre d'exploitation.

Pour calculer l'ACN pour toute valeur intermédiaire, il convient d'admettre que l'ACN varie linéairement entre ces deux masses.

L'ACN est calculé pour la pression standard de gonflage des pneumatiques de l'avion considéré. Dans l'éventualité où la pression effective d'utilisation des pneumatiques est sensiblement différente de cette valeur standard, des abaques permettent de réaliser la correction (cf. annexe, partie 5, p. 70).

8.1.3. MISE EN APPLICATION DE LA METHODE ACN/PCN

CHAUSSÉES ANCIENNES.

Cas 1 : La portance de la chaussée a été évaluée récemment

a) L'évaluation montre qu'il n'est pas nécessaire de réaliser des travaux de renforcement avant 10 ans compte tenu du trafic prévu : un PCN est évalué techniquement (code T) et publié ;

b) l'évaluation montre qu'il est nécessaire d'exécuter des travaux de renforcement :

• ces travaux ne sont pas urgents : un PCN évalué par expérience du trafic existant (code U) est publié. Un PCN évalué techniquement (code T), inférieur au précédent est également communiqué au gestionnaire pour lui permettre de gérer au mieux les chaussées (en particulier celles des aires de stationnement). Parallèlement le renforcement est étudié,

- ces travaux sont urgents : c'est en général le cas lorsque la chaussée est en train de se dégrader sous le trafic existant. Il est alors inutile de publier un PCN et il suffit de conserver les charges par atterrisseurs-types éventuellement abaissées en fonction des résultats de l'évaluation et de la programmation des travaux.

Cas 2 : La portance de la chaussée n'a pas été évaluée récemment

a) la chaussée se trouve dans un état normal : un PCN évalué par expérience du trafic existant (code U) est publié ;

b) la chaussée présente des signes anormaux de fatigue : il est nécessaire de procéder à une évaluation de la portance (cf. § 9, p. 44). En attendant, les charges admissibles par atterrisseurs-types publiées sont soit conservées, soit abaissées suivant l'état de la chaussée.

CHAUSSEES RENFORCEES

Il est possible de déterminer techniquement un PCN (code T) en fonction du renforcement réalisé :

a) le renforcement réalisé est celui défini lors des études consécutives à l'évaluation de la portance : ce PCN permettra de recevoir pendant la durée de vie normale le trafic prévu ;

b) le renforcement réalisé est inférieur à celui défini lors des études consécutives à l'évaluation de la portance : ce PCN ne permettra pas de recevoir pendant la durée de vie normale le trafic prévu. Il sera nécessaire d'effectuer le choix entre :

- la publication de ce PCN évalué techniquement (code T) qui entraînera des restrictions (charges, nombre de mouvements),
- La publication d'un PCN plus fort, correspondant au trafic prévu (code T) mais qui entraînera un risque de diminution de la durée de vie.

CHAUSSEES NEUVES

Un PCN évalué techniquement (code T) est publié dans tous les cas.

REMARQUE : SUIVI TECHNIQUE DES CHAUSSEES

Un suivi technique des chaussées doit être réalisé quel que soit leur âge. Ce suivi porte sur l'évolution des caractéristiques de la chaussée et sur le trafic réel. La méthodologie correspondante fera l'objet d'une instruction particulière.

Le suivi technique permettra de réactualiser les PCN.

8.1.4. CALCUL DES VALEURS PUBLIABLES

• DONNEES NECESSAIRES

Les données nécessaires sont :

- l'épaisseur équivalente totale et le CBR du sol support pour les chaussées souples,
- l'épaisseur de la dalle, la contrainte admissible de traction par flexion, le module de réaction corrigé du sol support pour les chaussées rigides.

Ces données résultent selon le cas :

- pour les chaussées anciennes d'une étude d'évaluation de la portance, effectuée dans les conditions décrites au chapitre 9 ;
- pour les chaussées renforcées de l'étude d'évaluation de la portance préliminaire au renforcement, des caractéristiques réelles du renforcement.

Dans le cadre du suivi technique des chaussées, il est recommandé d'effectuer après la mise en service (soit deux ans après environ) une évaluation des chaussées renforcées et des chaussées neuves pour vérifier que leur portance publiée a bien été atteinte.

• CALCUL

- **Méthode par atterrisseurs-types** : la charge admissible P_0 pour un atterrisseur-type est déduite des formules ou de l'abaque correspondants à partir des caractéristiques du sol support et de la chaussée.

— **Méthode ACN/PCN** : le détail des calculs est indiqué dans le volume 3 (manuel pratique de détermination des charges admissibles).

Les quatre lettres de code qui suivent le PCN sont choisies de la manière suivante :

Type de chaussée : la classification est établie selon les définitions du paragraphe 1.1., page 7.

Catégorie de résistance du sol support : le tableau de la page 37 permet immédiatement de déterminer la catégorie correspondant au CBR ou au module de réaction K du sol support de la chaussée considérée.

Le problème ne se pose que pour CBR = 8 ou pour K = 60 MN/m² justifiables aussi bien de la catégorie B que de la C. Une appréciation doit être faite cas par cas. (Exemple : piste présentant trois zones homogènes caractérisées par des CBR respectifs de 6, 7 et 8. Les deux premiers sont rattachés à la catégorie C. Il est alors judicieux de choisir la catégorie G pour le troisième afin de faciliter la comparaison des PCN.)

Pression maximale des pneumatiques

Le code W (pas de limitation de pression) est en général adopté.

Les autres codes, qui limitent la pression, ne sont retenus que lorsqu'il existe un risque démontré pour la couche de roulement de la chaussée.

Méthode d'évaluation

Le choix de la lettre de code (T ou U) ressort des directives du paragraphe 8.1.3. précédent.

8.1.5. VALEURS PUBLIEES

Les charges admissibles détaillées par aire exprimées par la méthode ACN/PCN ou celle par atterrisseurs-types sont publiées dans les Manuels d'Information Aéronautique, dans le chapitre AGA, paragraphe 2, consacré à la description détaillée des aérodromes.

Les charges admissibles publiées dans le répertoire des aérodromes contenu dans le Manuel d'Instruction Aéronautique, chapitre AGA, paragraphe 3, sont celles de la piste et éventuellement des voies y donnant accès. Ces charges sont exprimées par la méthode ACN/PCN ou provisoirement par celle des atterrisseurs-types. Ce sont des valeurs qui sont utilisées pour déterminer l'admissibilité des avions sur l'aérodrome.

Cette publication tient compte des éléments suivants :

- lorsque la piste comporte des types de chaussées différentes, une publication doit être faite pour chacun des types,
- lorsque la piste ou une partie de piste est d'un type unique mais comporte différentes zones non homogènes en portance, les charges admissibles de la zone la plus faible sont retenues pour caractériser l'ensemble de la piste ou de la partie de piste.

Exemple : La portance des différentes aires d'un aérodrome sont les suivantes :

<i>Piste : PM</i>	<i>0 à PM 1 200</i>	<i>PCN 50/F/B/W/T</i>	<i>(PM : point métrique)</i>
	<i>PM 1 200 à PM 2 000</i>	<i>PCN 45/F/B/W/T</i>	
	<i>PM 2 000 à PM 2 850</i>	<i>PCN 60/R/C/W/T</i>	

Bretelle *PCN 48/F/B/W/T*

Aire de stationnement :

Postes 1 et 2 PCN 30/F/B/W/T
Postes 3 et 4 PCN 40/F/A/W/T

Publication dans le Manuel d'Information Aéronautique - AGA 2 : Les renseignements précédents sont reproduits intégralement.

Publication dans le Manuel d'Information Aéronautique - AGA 3 :

PM 0 à PM 2 000 (structure souple) : PCN 45/F/B/W/T

PM 2 000 à PM 2 850 (structure rigide) : PCN 60/R/B/W/T

Remarque : En toute rigueur il conviendrait de publier toutes les charges admissibles détaillées par aire. Dans la pratique, les valeurs de portance dont il est tenu compte ne concernent que chaque piste et les voies y donnant accès (publication AGA 3).

Les raisons principales sont les suivantes :

- nécessité de présenter des renseignements concis pour être facilement utilisables par les compagnies aériennes,*
- la piste et les voies y donnant accès sont des aires de passage obligé. Leur portance conditionne l'accès des avions à l'ensemble de l'aérodrome,*
- des aires de stationnement dont la portance est inférieure à celle de la piste peuvent néanmoins avoir une durée de vie identique à cette dernière dès lors qu'elles sont correctement gérées. Il convient donc d'éviter que cette portance inférieure ne pénalise l'ensemble de l'aérodrome.*

Enfin, il revient au gestionnaire de l'aérodrome de rester vigilant à l'égard de toutes les aires. Il doit veiller notamment à gérer correctement les aires de stationnement en évitant d'accueillir les avions les plus lourds sur le même poste de stationnement à moins que ce dernier n'ait été dimensionné dans ce but. Il est conseillé, à chaque fois qu'un doute apparaîtra, d'effectuer une étude particulière de la portance.

8.2. UTILISATION DES VALEURS PUBLIEES

8.2.1. PRESSIONS LIMITEES

Lorsque le PCN comporte une lettre de code indiquant une limitation de la pression de gonflage des pneumatiques (cf. § 8.1.4., p. 39), les avions dont la pression effective de gonflage des pneumatiques dépasse la valeur limite correspondant à la lettre de code ne peuvent pas être admis sur la chaussée, quelle que soit leur charge.

Dans la pratique, les cas où existent une limitation de pression sont très rares. Cette limitation a pour but de se prémunir contre les risques de dégradation de certaines couches de roulement du fait du poinçonnement des pneumatiques. Exemples : chaussées non revêtues ou seulement protégées par un enduit.

Par contre, lorsque un avion se présente avec une pression de gonflage des pneumatiques inférieure à la valeur pour laquelle les ACN standards ont été calculés, il est possible de tenir compte de cet avantage en effectuant une correction en baisse de l'ACN de l'avion selon les indications portées en annexe (vol. 1 - annexe p. 70).

8.2.2. DETERMINATION DES AVIONS ADMISSIBLES

• Méthode par atterrisseur-type

La charge admissible P_a sur l'atterrisseur de l'avion considéré est celle publiée pour l'atterrisseur-type correspondant.

Exemple : valeurs publiées 20 T/RSI - 35 T/J - 50 T/B.

La charge admissible P_a sur le jumelage du Boeing 727, est égale à 35 tonnes.

Sur cet exemple, le B 727 peut être admis sans étude particulière jusqu'à 35 tonnes sur son jumelage.

• Méthode ACN/PCN

La charge admissible P_{ta} d'un avion se calcule à partir du PCN par la relation :

$$P_{ta} = m + (M - m) \cdot \frac{PCN - ACN_{min}}{ACN_{max} - ACN_{min}}$$

ACN max. : valeur d'ACN correspondant à la masse maximale au roulage M .

ACN min. : valeur d'ACN correspondant à la masse à vide en ordre d'exploitation m .

Exemple : PCN 46/R/B/W/T

Pour le Boeing 727 et la catégorie B de sol support :

ACN max. = 48 pour $M = 78\,471$ kg

ACN min. = 25 pour $m = 44\,293$ kg

Pourcentage de la charge totale sur le jumelage : 0,464.

(Voir tableau caractéristique avion manuel pratique, vol. 2).

$$\text{d'où } P_{ta} = 44\,293 + (78\,471 - 44\,293) \cdot \frac{46 - 25}{48 - 25} = 75\,499 \text{ kg}$$

ou $P_a = 75\,499 \cdot 0,464 \approx 35\,000$ kg sur l'atterrisseur principal.

8.2.3. COMPARAISON DES CHARGES REELLES ET DES CHARGES ADMISSIBLES DEDUITES DES PUBLICATIONS

a) Si la charge réelle P est inférieure ou égale à la charge admissible P_a ou si l'ACN est inférieur ou égal au PCN, l'avion considéré peut être admis sans restriction (charge, nombre de mouvements).

Remarque : en toute rigueur l'avion ne devrait venir que dans la limite de la fatigue normale que peut encore subir la chaussée. Pour une chaussée neuve, cette limite est de 36 500 mouvements équivalents ou 10 mouvements par jour pendant 10 ans de la charge normale de calcul. Pour une chaussée existante, cette limite est égale à 36 500 mouvements équivalents diminués du nombre de mouvements équivalents écoulés depuis la mise en service.

Dans la pratique, le risque de fatigue accélérée de la chaussée en raison de la venue d'un avion à une charge réelle P inférieure à la charge admissible P_a est très faible. En effet ce risque n'intervient que pour un nombre de mouvements réels important, en principe pour des fréquences supérieures à 10 mvt/j et qui n'étaient pas prévues au moment du dimensionnement (sinon P_a serait supérieur ou égal à P). Ce cas correspond à des circonstances rares de fort développement du trafic qui doivent de toute manière inciter à corriger la charge admissible P_a publiée à la mise en service donc à prendre en compte le risque nouveau de fatigue. L'avion peut donc venir sans restriction.

b) Si la charge réelle P est supérieure à la charge admissible P_a ou si l'ACN est supérieur ou égal au PCN, une étude particulière doit être menée (cf. § 8.3.) et peut conduire pour l'avion considéré :

- soit à l'absence de restriction
- soit à une exploitation limitée nécessitant une autorisation limitant la charge et/ou le nombre de mouvements
- soit à une interdiction d'accès.

8.3. PROCEDURE EN CAS DE DEPASSEMENT DES CHARGES

Hypothèse 1 : des charges admissibles par atterrisseurs-types sont publiées

Il faut tenir compte de la géométrie réelle de l'atterrisseur de l'avion considéré. Pour cela, la charge admissible P_0 de ce dernier est calculée à partir de l'abaque correspondant pour les caractéristiques de la chaussée étudiée (épaisseur équivalente et CBR pour les chaussées souples, module de réaction corrigé, épaisseur de la dalle, contrainte admissible de traction par flexion pour les chaussées rigides).

Trois cas peuvent alors se présenter selon les valeurs de la charge réelle P et de la charge admissible P_0 :

a) $P < P_0$: ce cas ramène à celui du paragraphe 8.2.3. a) précédent, où $P < P_a$, et l'avion est admis sans restriction.

b) $P_0 < P \leq 1,1 P_0$: l'avion peut être autorisé ; toutefois, il convient de vérifier que le nombre total annuel de mouvements des avions significatifs ne dépasse pas de plus de 5 % le total annuel des mouvements réels significatifs pris en compte dans le dimensionnement.

c) $1,1 P_0 < P$ ou la condition du b) précédent n'est pas respectée : il convient d'effectuer un calcul particulier décrit ci-après (autorisations).

Hypothèse 2 : un PCN est publié

Lorsque le PCN publié est inférieur à l'ACN de l'avion considéré, deux cas peuvent se présenter :

a) $PCN < ACN \leq 1,1 PCN$ pour les chaussées souples
ou $PCN < ACN \leq 1,05 PCN$ pour les chaussées rigides : l'avion peut être autorisé ; toutefois il convient de vérifier que le nombre total annuel de mouvement réels des avions significatifs ne dépasse pas de plus de 5 % le total annuel des mouvements réels significatifs pris en compte dans le dimensionnement.

b) $1,1 PCN < ACN$ pour les chaussées souples
ou $1,05 PCN < ACN$ pour les chaussées rigides ou la condition du a) précédent n'est pas respectée.

Il convient alors de se ramener à la charge admissible P_0 de l'avion considéré. La suite des opérations est alors identique à ce qui est décrit pour la première hypothèse mais la comparaison est établie entre P_0 et la charge réelle pondérée P' pour chaque partie d'aire.

Autorisations

Les décisions d'octroi ou de refus des autorisations sont prises de la manière suivante :

1. Le trafic équivalent total que supporte la chaussée est calculé :
 - la méthode de calcul du trafic équivalent est celle décrite pour le dimensionnement optimisé (cf. partie 1 - § 6, p. 30),
 - il convient de prendre les charges réelles P pour les chaussées dont la publication a été établie par la méthode des atterrisseurs-types et les charges réelles pondérées P' dans l'autre cas.
 - le trafic réel est ramené à une fréquence quotidienne (en mouvements par jour) et par conséquent le trafic équivalent aussi (voir remarque).
2. Si le trafic équivalent total est supérieur à 10 mouvements équivalents par jour, l'autorisation doit être refusée à moins que l'on admette une usure plus rapide des chaussées. Une telle décision peut être économiquement justifiée si l'on souhaite permettre l'accroissement du trafic aérien sans renforcement, au moins provisoire, de l'infrastructure.
3. Si le trafic équivalent total est inférieur à 10 mouvements par jour l'avion peut être autorisé à la charge P mais en limitant sa fréquence aux valeurs suivantes et sous réserve d'un suivi des chaussées, selon les indications du tableau ci-dessous :

Valeurs du rapport P/P_0 ou P'/P_0 } selon le cas	Nombre limite de mouvements de la charge réelle P	Suivi des chaussées
1,1 - 1,2	1 par jour	suivi recommandé
1,2 - 1,3	1 par semaine	suivi obligatoire régulier et fréquent
1,3 - 1,4	2 par mois	
1,4 - 1,5	1 par mois	

D'autre part aucun mouvement de l'avion considéré ne doit conduire à un dépassement de plus de 50 % de la charge admissible P_0 (P ou P' doit être inférieur à $1,5 P_0$). Dans le cas d'un tel dépassement, l'autorisation doit être refusée quel que soit le trafic équivalent total (toutefois, pour les pistes, cette règle ne s'applique pas aux atterrissages d'urgence).

Remarque : Au lieu de raisonner en trafic journalier, il serait plus rigoureux de considérer un trafic cumulé pour tenir compte de l'importance du trafic passé. Il est procédé de cette manière chaque fois que la précision de l'étude le justifie. Exemple : chaussée dégradée en fin de durée de vie.

9. EVALUATION DES CHAUSSEES

9.1. GENERALITES

9.1.1. L'évaluation des chaussées existantes est un outil indispensable pour une bonne gestion du patrimoine qu'elles représentent. Elle répond aux trois objectifs principaux suivants :

- prévoir à quel moment il doit être procédé à des opérations d'entretien ou à des travaux plus importants ;
- apprécier les qualités résiduelles des chaussées afin de préciser la solution technique et économique d'entretien ou de rénovation et le dimensionnement d'un éventuel renforcement ;
- définir le trafic admissible.

9.1.2. Cette évaluation doit s'intéresser à la fois aux caractéristiques **structurelles** et aux caractéristiques **fonctionnelles** des chaussées.

Les caractéristiques structurelles du complexe chaussée/sol support conditionnent sa portance.

Les caractéristiques fonctionnelles concernent l'état de la surface de la chaussée et ses possibilités d'utilisation en toute sécurité par les avions. Ce sont :

- la qualité du profil en long des pistes et notamment l'uni qui détermine les accélérations verticales que subissent les avions au roulage,
- la glissance qui commande les possibilités de contrôle directionnel et de freinage des avions,
- l'intégrité de la surface (épaufures, désenrobage, etc.) dont les défauts peuvent causer des dégâts aux avions (ingestion de gravillons par les réacteurs, éclatement des pneus).

Les caractéristiques structurelles et les caractéristiques fonctionnelles ne sont d'ailleurs pas indépendantes : ainsi l'état de surface peut donner des indications sur des déficiences éventuelles de la structure ; réciproquement une structure inadaptée au trafic conduit à des dégradations de la surface.

9.1.3. L'évaluation des chaussées est une opération très complexe qui nécessite la synthèse par une équipe spécialisée des éléments suivants :

- 1 — Site de l'aérodrome,
- 2 — données climatologiques (hydrologie, gel,...),
- 3 — données géotechniques et hydrogéologiques (nappe phréatique),
- 4 — données sur le sol support, sur la construction de la chaussée ainsi que sur les éventuels travaux ultérieurs (entretien, renforcement, etc.),
- 5 — observations de l'état de surface de chaussée : relevé des dégradations et examen du système de drainage,
- 6 — mesures non destructives permettant de déterminer certains paramètres en rapport avec les caractéristiques de la chaussée (uni, glissance, portance),
- 7 — mesure de l'épaisseur des couches de chaussée et évaluation des caractéristiques géotechniques des chaussées et du sol support (sondages).

9.1.4. Les paragraphes suivants se limitent à l'évaluation de la portance des chaussées. Le but de cette évaluation est d'attribuer à une chaussée existante et à son sol support des valeurs de paramètres structurels représentatifs de sa portance et directement utilisables dans les calculs de charge admissible et de renforcement :

- CBR du sol support et épaisseur équivalente totale pour une chaussée souple ;
- module de réaction corrigé K du sol support, épaisseur de la dalle de béton et contrainte admissible de traction par flexion du béton pour une chaussée rigide.

Pour déterminer ces paramètres, il convient de procéder selon deux approches différentes mais complémentaires :

- par une démarche exactement inverse de celle du dimensionnement : la **méthode inverse du dimensionnement** ;
- par des **essais de chargements de plaque non destructifs** en surface de la chaussée, qui fournissent directement la charge admissible pour un atterrisseur à roue simple.

9.2. METHODE INVERSE DU DIMENSIONNEMENT

La méthode de dimensionnement décrite précédemment dans l'Instruction a pour but, en utilisant des données concernant le sol support, de déterminer une structure de chaussée pouvant recevoir un trafic donné pendant une certaine durée de vie moyennant un entretien « normal ». Inversement connaissant les caractéristiques du sol support et la structure de la chaussée, cette méthode permet de déterminer le trafic susceptible d'être reçu pendant un temps déterminé. Ceci constitue la base de l'évaluation de la portance par la méthode inverse du dimensionnement.

Toutefois lorsque cette méthode est utilisée seule, elle se heurte à de grandes difficultés pour déterminer les paramètres structurels à prendre en compte pour caractériser une chaussée existante et son sol support. Même s'il existe des archives concernant la construction de la chaussée, les éventuels travaux d'entretien ou de renforcement réalisés dans le passé et sur le trafic passé, cette méthode exige que de nombreux sondages et essais soient réalisés dans la chaussée. En outre les résultats demeureront généralement incertains du fait de la difficulté d'apprécier certains paramètres (coefficients d'équivalence des couches de chaussée souple, transferts de charge entre dalles de béton, etc.) et du risque de manque de représentativité des sondages.

Enfin la méthode inverse de dimensionnement n'est applicable que pour une chaussée correctement constituée (en particulier pour les chaussées souples, les couches doivent être collées et de qualité croissante de bas en haut).

9.3. ESSAIS DE PLAQUE NON DESTRUCTIFS

La méthode d'essais de plaque non destructifs à utiliser est décrite en annexe. Ces essais peuvent fournir directement en un grand nombre de points la charge admissible pour une roue simple sur une chaussée souple et la charge admissible en coin de dalle et des informations sur la qualité des transferts de charge pour les chaussées rigides.

Ces essais sont insuffisants pour déterminer la charge admissible d'avions à atterrisseurs à roues multiples ou pour servir de base au dimensionnement d'un renforcement : il faut alors avoir recours à la méthode inverse du dimensionnement. Toutefois les essais de plaque permettent de diminuer notablement le nombre des essais destructifs à réaliser pour appliquer cette méthode et augmentent sensiblement la fiabilité des résultats.

9.4. CAMPAGNE D'EVALUATION DE LA PORTANCE

9.4.1. L'importance des moyens mis en œuvre dépend de l'objectif recherché et des données connues de la chaussée.

Si la chaussée est ancienne et ses caractéristiques mal connues, il faut mettre en œuvre l'ensemble des moyens décrits ci-après.

S'il s'agit d'une chaussée récente pour laquelle des archives suffisantes sont disponibles ou d'une chaussée ayant fait l'objet d'une évaluation complète du type précédent il suffit en général pour suivre l'évolution de la portance de réaliser des essais de plaque non destructifs.

Il en est de même pour une chaussée ayant fait l'objet d'une évaluation complète préalable pour vérifier la qualité d'un renforcement.

9.4.2. DELIMITATION DES ZONES HOMOGENES

La première phase de l'étude a pour but de délimiter des zones homogènes d'après la structure, le comportement et l'état.

Les chaussées sont classées en premier lieu par leur fonction (pistes, voies de circulation, aires de stationnement, bretelle). Sur chaque chaussée, les renseignements d'archives portant sur la construction initiale, les travaux d'entretien et de réfection successifs permettent un premier découpage en zones homogènes en structure.

Pour chacune de ces zones, une étude du trafic supporté (masses, nombre de mouvements) et une inspection détaillée des chaussées (aux fins d'établir un relevé des dégradations) sont effectuées.

Des essais de déformabilité conduisent au découpage final en zones homogènes d'après le comportement mécanique :

- sur structure rigide, le Dispositif de Mesure de Battements de Dalles (DMBD) du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées est utilisé,
- sur structure souple, plusieurs types d'appareils peuvent être utilisés :
 - le déflectographe Lacroix du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
 - l'influographe du S.T.B.A.
 - le viagraphes du Centre d'Etude du Bâtiment et des Travaux Publics
 - la poutre Benkelman.

Les deux premiers appareils cités sont les plus utilisés :

Le déflectographe Lacroix est très répandu mais ne permet d'observer la chaussée que sous une charge maximale de 6,5 tonnes sur un jumelage donc très inférieure aux charges habituellement supportées par les chaussées aéronautiques.

L'influographe n'existe qu'en exemplaire unique mais permet d'étudier la déformation de la chaussée sous un jumelage d'avion pour une charge pouvant atteindre 25 tonnes.

Le viagraphes ou la poutre Benkelman sont utilisés occasionnellement, lorsqu'il n'est pas possible de mettre en œuvre l'un ou l'autre des appareils cités précédemment.

La délimitation de chaque zone homogène en portance doit aussi être complétée par des renseignements concernant le drainage, l'uni, la glissance...

Enfin des essais de plaque non destructifs sont réalisés en nombre relativement important (80 à 100 sur un aérodrome moyen). Ils permettent d'apprécier l'homogénéité de comportement des chaussées au même titre que les interventions précédentes mais fournissent surtout la charge admissible pour une roue simple isolée sur chaque point d'essai (cf. annexe, partie 6).

9.4.3. CARACTERISATION DES ZONES HOMOGENES

L'ensemble des moyens précédents a permis de délimiter des zones homogènes par leur structure et leur comportement.

Après détermination de la charge admissible de la zone homogène (cf. annexe, partie 6), un ou plusieurs sondages doivent être réalisés pour caractériser la zone.

Ces sondages sont implantés en un ou des points où ont été pratiqués des essais de plaque qui ont donné un résultat voisin de la charge admissible retenue pour la zone. Quelques sondages sont parfois aussi réalisés en des points singuliers (points où la charge admissible est particulièrement faible par exemple). A titre d'ordre de grandeur, 5 à 7 sondages suffisent sur la piste d'un aérodrome moyen, selon l'homogénéité des structures rencontrées. Ces sondages doivent avoir une section d'environ 1,5 m² et ont pour but :

- de déterminer la structure de la chaussée, notamment l'épaisseur des couches, et de contrôler in situ et en laboratoire la qualité des matériaux en place,
- de réaliser chaque fois que possible des essais CBR in situ ou des essais de module de réaction sur le sol support,
- de mesurer la teneur en eau et la densité en place du sol support et d'y prélever des échantillons intacts ou remaniés pour analyse et essais en laboratoire.

9.4.4. INTERPRETATION ET SYNTHESE DES RESULTATS

Les méthodes utilisées pour l'exploitation et la synthèse des résultats sont indiquées en annexe, partie 6.

Ce travail doit être réalisé par des spécialistes. En pratique, il pourra être fait appel au Service Technique des Bases Aériennes.

Enfin dans le cas d'une étude préliminaire à un renforcement, l'évaluation de la portance doit être complétée par une évaluation de l'uni.

10. RENFORCEMENT DES CHAUSSEES

10.1. GENERALITES

Le problème du renforcement des chaussées d'aérodromes peut se poser soit lorsqu'il s'agit d'adapter les aires de mouvement à de nouveaux appareils plus exigeants, soit lorsqu'il doit être remédié à des insuffisances de portance. Ces deux préoccupations sont fréquemment mêlées dans la réalité.

Il faut noter toutefois que le renforcement n'est pas la seule solution possible pour remédier à l'inadaptation d'une chaussée à un trafic présent ou futur :

- la construction d'une chaussée neuve sur un nouvel emplacement est une solution qui peut faire disparaître les sujétions liées au maintien du trafic pendant les travaux et permettre un remaniement du plan de masse dans le sens d'une meilleure adaptation aux conditions nouvelles de trafic ;
- la substitution est une solution qui consiste à détruire la chaussée existante et à reconstruire une chaussée au même niveau. Cette solution qui, dans le cas d'une piste, peut être limitée en section courante aux trente mètres centraux du profil en travers, élimine les problèmes de raccordement. Dans ce cas, c'est en général, parmi toutes les solutions la plus coûteuse. En revanche, la substitution peut être intéressante pour le renforcement des postes de stationnement.

Le choix d'une solution (renforcement, construction d'une chaussée neuve, substitution) résulte d'une étude très précise tenant compte de tous les critères techniques, économiques et opérationnels.

Dans la suite, il ne sera question que des renforcements.

10.1.1. CHOIX D'UNE STRUCTURE DE RENFORCEMENT

Sur une chaussée, souple ou rigide, il est possible de prévoir un renforcement souple ou rigide.

Le choix d'une structure de renforcement doit tenir compte :

- des coûts de construction et d'entretien,
- des objectifs de gestion des chaussées,
- des conditions locales d'approvisionnement en matériaux,
- des délais d'exécution et des possibilités de phasage des travaux,
- des perturbations apportées à l'exploitation de l'aérodrome pendant le chantier,
- du climat...

Sur chaussées souples, les renforcements sont pratiquement toujours réalisés avec une structure souple compte tenu des facilités de phasage et d'utilisation des chaussées après exécution d'une partie des travaux. Le renforcement par une structure rigide est rarement employée.

Les chaussées rigides sont difficiles à renforcer. Les renforcements souples sont préférables aux renforcements rigides. Les cas où cette dernière possibilité peut s'envisager sont très peu fréquents.

10.1.2. CHOIX DES PROFILS

- **Profil en long** : avant tout renforcement de piste ou de voie de circulation il est nécessaire de réaliser une évaluation de l'uni. Cette dernière pourra conduire à un reprofilage ;
- **Profil en travers** : (cas des renforcements souples uniquement) : des économies notables sur le coût d'un renforcement de piste peuvent être réalisées par l'adoption de réductions d'épaisseurs en profil en travers et sous réserve de compatibilité avec les normes géométriques de profil en travers (en profil courant, la pente maximum tolérée est de 1,5 % sur les trente mètres centraux et 2,5 % au-delà).

Le raccordement sur les rives doit être recherché avec le minimum d'épaisseur afin de limiter les sujétions dues au balisage encastré en bord de chaussée. Le raccordement minimal atténué ou supprimé également les sujétions de surélévation des accotements.

10.1.3. ETUDE PRELIMINAIRE

- Une évaluation de la portance est nécessaire pour apprécier la qualité résiduelle de la chaussée (cf. chapitre 9) ;
- Une appréciation de l'uni doit également être recherchée pour les pistes et voies de circulation (cf. § 10.1.2.).

10.2. RENFORCEMENT DES CHAUSSEES SOUPLES

10.2.1. RENFORCEMENT SOUPLE

L'épaisseur du renforcement est déterminée par différence entre l'épaisseur équivalente nécessaire d'une chaussée neuve et l'épaisseur équivalente de la chaussée existante. Dans la détermination de cette dernière, il est tenu compte des deux remarques suivantes :

- d'une part les coefficients d'équivalence des couches de chaussées doivent être corrigés en fonction de leur état réel,
- d'autre part le coefficient d'équivalence d'une couche de chaussée à un niveau donné ne pourra être supérieur au coefficient d'équivalence de la couche rapportée au-dessus.

Par exemple si un enrobé en bon état (coefficient 2) est surmonté par une grave-bitume (coefficient 1,5), le coefficient d'équivalence de l'enrobé sera pris égal à 1,5.

10.2.2. RENFORCEMENT RIGIDE

Ce cas de renforcement est très peu fréquent.

Lorsqu'une chaussée souple est renforcée par une dalle de béton, elle n'intervient dans le calcul de celle-ci qu'en tant que couche de fondation. Le module K à attribuer à cette couche de fondation est déterminé d'après les indications de la figure 4 p. 22. L'épaisseur de la dalle est ensuite déterminée selon les indications des chapitres 4, 5 et 6.

10.3. RENFORCEMENT DES CHAUSSEES RIGIDES

10.3.1. RENFORCEMENT SOUPLE

• Epaisseur de renforcement

Lorsque la chaussée existante est très fragmentée, il est prudent de la considérer comme une chaussée souple de même épaisseur, ce qui revient au cas précédent.

Dans ce qui suit, est uniquement considéré le cas où la chaussée rigide existante est encore saine.

L'épaisseur de renforcement est alors fournie par la relation :

$$e = 3,75 (F.ht - h) \quad (6)$$

e ; ht ; h : cm

F : coefficient sans unité

- dans cette relation e est une épaisseur équivalente selon la définition donnée (chapitre 3.3.). Les matériaux utilisés pour un renforcement doivent être au moins de la qualité pour couche de base c'est-à-dire posséder un coefficient d'équivalence au moins égal à 1,
- h est l'épaisseur de la dalle de béton existante,
- ht est l'épaisseur théorique d'une dalle neuve, abstraction faite de la dalle existante. Cette épaisseur est calculée avec la contrainte admissible $\bar{\sigma}_b$, et le module de réaction corrigé K valables pour la dalle existante,
- F est un coefficient de réduction de l'épaisseur ht dont la valeur est donnée par la figure 8 en fonction du module K précédemment cité,
- l'épaisseur équivalente du renforcement ne doit pas être inférieure à 25 cm, sauf recours à des enrobés spéciaux qui s'adaptent aux déformations. En effet, du fait de l'existence des joints, et des conditions de travail des dalles, il est nécessaire que le béton soit surmonté d'une couche de matériaux d'épaisseur suffisante pour retarder la remontée des fissures au droit des joints et des anciennes fissures,

- la relation (6) ci-dessus n'est d'ailleurs valable que pour des valeurs conduisant à une épaisseur équivalente e supérieure à 20 cm.

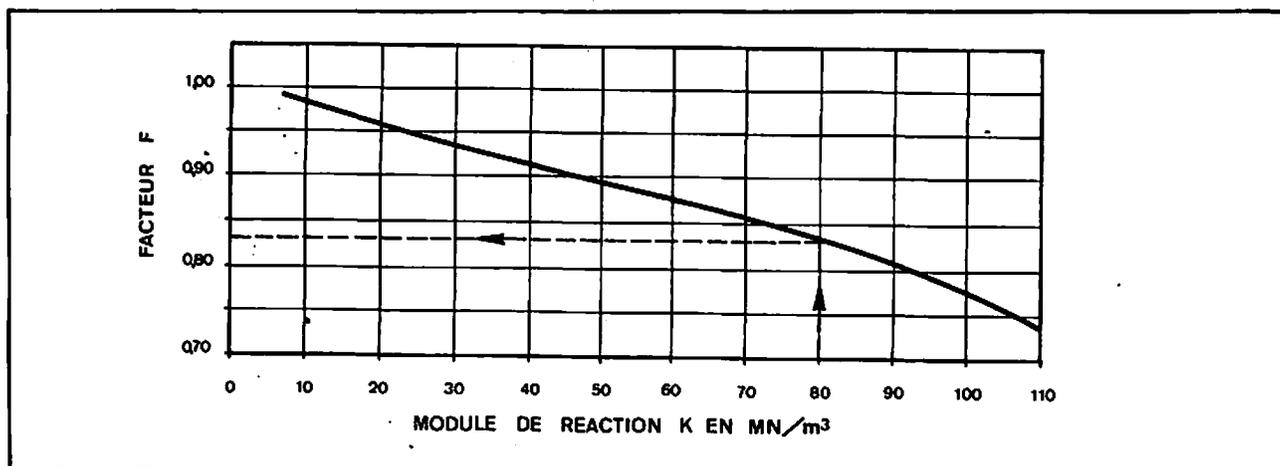


Figure 8. — Renforcement souple/rigide. Abaque pour le calcul du facteur F .

• Dispositions constructives

Dans le cas d'application d'enrobés directement sur du béton, le problème le plus préoccupant et encore mal résolu est celui de la réapparition des joints de la chaussée rigide en surface du renforcement. Pour lutter contre cette fissuration, il est préconisé de désolidariser la couche d'enrobés de la dalle sur une certaine largeur de part et d'autre du joint (par exemple à l'aide d'une couche de sable ou en interposant un textile). Il est aussi possible, au contraire, de faire réapparaître les joints en surface par sciage et de les traiter avec un produit de colmatage afin d'éviter une fissuration anarchique. Cette solution facilite l'entretien mais diminue la portance de la chaussée.

Des précautions doivent aussi être prises pour certains types de joints anciens (en particulier les joints de dilatation) présentant une large ouverture et recouverts d'une faible épaisseur de renforcement. Il est alors conseillé de les dégarnir.

10.3.2. RENFORCEMENT RIGIDE

• Epaisseur de renforcement

L'épaisseur de la dalle de renforcement est fournie par la formule :

$$h_R = \sqrt[1.4]{h_t^{1.4} - C \cdot h^{1.4}} \quad (7)$$

$h_R, h_t, h = \text{cm}$

C : coefficient sans unité.

- h_t est l'épaisseur théorique d'une dalle neuve, déterminée en fonction de la contrainte admissible du nouveau béton et du module de réaction corrigé de la fondation existante,
- h est l'épaisseur de la dalle de béton existante,
- C est un coefficient destiné à tenir compte de la qualité de la chaussée existante.

$C = 1$ pour une chaussée en bon état,

$C = 0,75$ pour une chaussée présentant quelques fissures d'angles mais pas de dégradations généralisées,

$C = 0,35$ pour une chaussée entièrement fragmentée.

Dans la pratique, c'est très généralement l'une de ces deux dernières valeurs que l'on applique.

Les abaques 6.1. à 6.3., du manuel pratique de dimensionnement (volume 2) permettent de déterminer h_R pour les trois valeurs de C .

La relation donnée ci-dessus n'est valable que si la dalle de renforcement est appliquée directement sur la chaussée existante. Dans le cas où une couche de matériaux est interposée (généralement des enrobés) entre les deux dalles, par exemple dans le but de reprofiler la chaussée existante, l'épaisseur du renforcement est calculée par la formule :

$$h_R = \sqrt{h_i^2 - Ch^2} \quad (8)$$

$h_R, h_i, h = \text{cm}$
C coefficient sans unité

Dans cette expression, la signification des paramètres et les valeurs du coefficient C sont les mêmes que précédemment. Cette formule conduit à des épaisseurs de renforcement légèrement plus importantes.

Les abaques 6.4. à 6.6., du manuel pratique de dimensionnement (volume 2) permettent de déterminer h_R pour les trois valeurs de C.

- **Dispositions constructives**

Pour éviter la réapparition des joints de la chaussée existante sous forme de fissures dans la dalle de renforcement, il est nécessaire que les joints de cette dernière soient exactement superposés aux joints existants. Tous les joints de l'ancien dallage doivent être surmontés de joints (d'un type quelconque) du nouveau dallage.

En particulier, comme les dalles anciennes ont généralement été conçues avec des largeurs inférieures à celles des dalles actuelles, des joints longitudinaux de retrait-flexion supplémentaires pourront être nécessaires au droit des joints de construction de l'ancienne chaussée. La disposition des différents joints du renforcement nécessite donc une étude préalable approfondie si des mécomptes veulent être évités. Compte tenu des difficultés correspondantes de réalisation et de son coût, le renforcement rigide/rigide est très rarement adopté.

11. CHAUSSEES LEGERES

11.1. GENERALITES

Les chaussées légères sont destinées exclusivement aux avions dont la masse totale n'excède pas 5,7 tonnes. Elles font l'objet d'une méthode de dimensionnement simplifiée et de normes constructives moins sévères que celles qui s'appliquent aux chaussées destinées aux avions plus lourds.

Ces chaussées doivent être interdites aux avions dont la masse totale dépasse 5,7 tonnes. Si des véhicules routiers empruntent les chaussées (camions d'entretien par exemple), leur charge doit être limitée à 5 tonnes par essieu ou par ensemble d'essieux voisins. Cette limitation s'applique également pendant la construction de la chaussée, étant entendu qu'il demeure souhaitable d'y restreindre autant que possible la circulation des engins de chantier.

Pour des raisons économiques, les chaussées légères ont pratiquement toujours une structure souple qui comporte généralement de bas en haut : la couche de fondation, la couche de base et la couche de roulement. Les règles données ci-après sur la constitution et l'épaisseur de ces couches sont valables pour l'ensemble des chaussées de l'aire de manœuvre (piste, voies de circulation, aires). Des dérogations peuvent être justifiées dans certains cas pour des raisons économiques, lesquelles constituent un des critères déterminants du choix, compte tenu de la catégorie d'aérodromes considérée.

11.2. DETERMINATION DE L'EPAISSEUR DE LA CHAUSSEE

Dans toute la suite de ce chapitre, il ne sera question que d'épaisseurs réelles.

11.2.1. COUCHE DE ROULEMENT

La couche de roulement la mieux adaptée est un tapis bitumineux de faible épaisseur compatible avec les possibilités de mise en œuvre des matériaux utilisés. De façon générale, les règles de l'art routières s'appliquent à ce type de revêtement.

Une solution plus économique consiste à réaliser un enduit bicouche après une imprégnation de la couche de base. Cependant cette solution présente quelques inconvénients :

- mauvaise étanchéité de la couche de roulement,
- présence de gravillons libres,
- mauvais vieillissement.

Dans les deux cas, les formulations doivent être adaptées aux conditions particulières de ce type de chaussée, qui reçoivent un trafic très faible. (Absence de compactage sous le trafic).

11.2.2. COUCHE DE BASE

L'épaisseur de la couche de base est normalement de 15 cm. La couche est constituée d'une grave non traitée partiellement concassée. Les graves traitées aux liants hydrauliques sont à éviter.

11.2.3. COUCHE DE FONDATION

L'épaisseur de la couche de fondation est donnée en fonction du CBR du sol support par la figure 9. Le CBR est déterminé conformément aux indications des paragraphes 3.2.1. et 3.2.2. Selon le cas la couche de fondation sera réalisée :

- soit par l'amélioration du sol en place sur une épaisseur égale à la valeur indiquée pour la sous-couche sur la figure 9,
- soit par l'apport d'une couche de matériaux peu coûteux de type graveleux ou sableux.

Il peut être nécessaire de réaliser une sous-couche drainante et anti-contaminante. Dans ce cas, son épaisseur est déduite dans le calcul de la couche de fondation.

11.2.4. PROTECTION CONTRE LE GEL

Dans les régions où existe le risque de gel, la mise hors gel d'un sol support gélif risque de conduire à des structures très importantes, parfois incompatibles avec les objectifs d'une chaussée légère. L'épaisseur de chaussée calculée selon les indications précédentes et sans tenir compte du gel sera donc conservée. Il est alors recommandée :

- de ne pas utiliser de matériaux gélifs,
- d'apporter si nécessaire des restrictions de trafic en période de dégel.

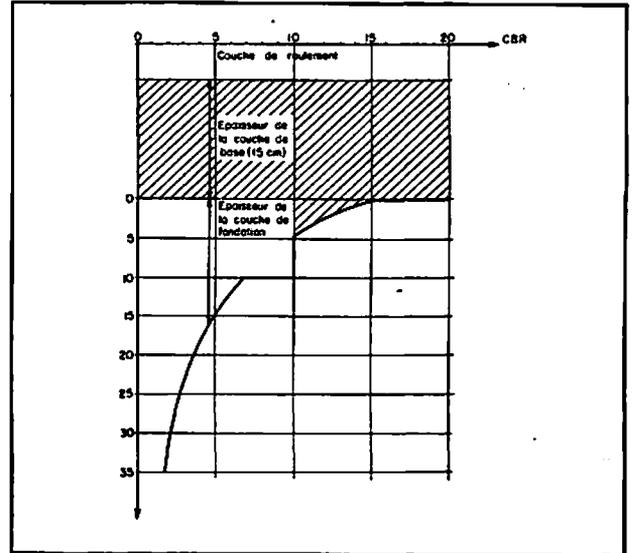


Figure 9. — Abaque de dimensionnement des chaussées légères.

11.3. CHARGES ADMISSIBLES

La masse maximale des avions admissibles sur une chaussée légère est de 5 700 kg.

La pression des pneumatiques des avions ne devra pas dépasser 0,9 MPa (environ 9 kg/cm²) pour éviter tout risque de poinçonnement.

En conséquence, les renseignements à publier sur la résistance des chaussées (PCN) conformément aux dispositions prévues pour les chaussées légères par la méthode ACN/PCN se mettront sous la forme unique : 5 700 kg/0,9 MPa

PARTIE 2

ANNEXE

1. METHODES D'ETUDE DES CHAUSSEES SOUPLES

Le dimensionnement des chaussées souples utilise la méthode CBR pour des charges isolées. Un procédé permet de convertir la charge sur un atterrisseur quelconque en une charge sur une « roue simple équivalente ».

La fatigue de la chaussée est traduite par la loi de Miner (cumul des dommages) et fait l'objet du chapitre 3 de la présente annexe.

1.1. METHODE CBR

1.1.1. PRINCIPE

Le complexe formé par le sol support et la chaussée est assimilé à un massif semi-infini, homogène, isotrope, de type Boussinesq.

Le critère retenu pour le dimensionnement des chaussées souples est celui de la contrainte verticale σ_z au niveau du sol support.

La formule CBR permet de calculer l'épaisseur e de chaussée pour laquelle est admissible la contrainte verticale produite par une charge P appliquée 10 000 fois avec une pression q uniformément répartie sur l'aire a d'un cercle. En toute rigueur, la méthode CBR ne réfère pas à la contrainte verticale σ_z mais au cisaillement maximal que peut subir le sol, l'essai CBR étant un essai de poinçonnement. Ce dernier permet cependant une caractérisation simple mais empirique du sol.

1.1.2. FORMULE

La formule CBR utilisée pour le calcul des abaques a été établie expérimentalement par le Corps of Engineers américain. Elle est la suivante :

$$e = \sqrt{\frac{P}{10,2 q}} \left[4,231 - 5,013 \log \frac{\text{CBR}}{q} + 2,426 \left(\log \frac{\text{CBR}}{q} \right)^2 - 0,473 \left(\log \frac{\text{CBR}}{q} \right)^3 \right] \quad (9)$$

e : cm P : kg q : MPa

Pour des calculs manuels, la formule simplifiée peut être utilisée sans inconvénient lorsque le rapport CBR/q est inférieur ou égal à 20 (l'erreur sur l'épaisseur par rapport à la formule précédente n'excède pas 4 %).

$$e = \sqrt{P \left(\frac{1}{0,57 \text{ CBR}} - \frac{1}{32 q} \right)} \quad (10)$$

e : cm P : kg q : MPa

En système de coordonnées logarithmiques portant P en abscisse et e en ordonnée les abaques figurent un faisceau de droites CBR parallèles lorsque le CBR varie et pour une pression donnée. La formule CBR se met en effet sous la forme :

$$\log e = \frac{1}{2} \log P + B$$

où B est une fonction du CBR.

1.1.3. EPAISSEUR EQUIVALENTE

En fait les formules (9) et (10) fournissent une épaisseur réelle pour un massif homogène constitué par un matériau de référence (grave non traitée, concassée et bien graduée et de module d'élasticité $E = 500$ MPa).

Dans la réalité, la chaussée est composée de plusieurs couches présentant des qualités mécaniques très différentes.

La notion de coefficient d'équivalence permet de résoudre cette difficulté. Cette question a été étudiée par le L.C.P.C. (référence 1) suite aux essais américains du A.A.S.H.O. (référence 11).

A titre indicatif, le coefficient d'équivalence d'une couche de module E est égal à :

$$\sqrt[3]{\frac{E}{500}} \quad E : \text{MPa}$$

Le coefficient d'équivalence de certains matériaux (enrobés bitumineux par exemple) est variable dans la mesure où le module varie lui-même en fonction de certains paramètres physiques (température, fréquence de sollicitations...). Les valeurs constantes proposées dans le dimensionnement sont donc en fait des moyennes.

1.2. DETERMINATION DES ROUES SIMPLES EQUIVALENTES

1.2.1. DEFINITION GENERALE

La roue simple équivalente (RSE) à un atterrisseur est la roue simple isolée fictive qui produirait la même action maximale que produit l'atterrisseur à une profondeur donnée, dans le massif de Boussinesq considéré.

Par « action » est entendu contrainte verticale ou contrainte de cisaillement ou déformation. Il existe donc, à une profondeur donnée, plusieurs valeurs de RSE selon l'action que l'on considère. De même la RSE peut se calculer « à pression constante et aire variable » ou « à aire constante et pression variable ».

1.2.2. METHODE DE BOYD ET FOSTER

Une méthode de détermination de la RSE a été mise au point par les ingénieurs Boyd et Foster du Corps of Engineers américain pour le cas du jumelage et du boggie.

La méthode a été ensuite généralisée aux autres types d'atterrisseurs.

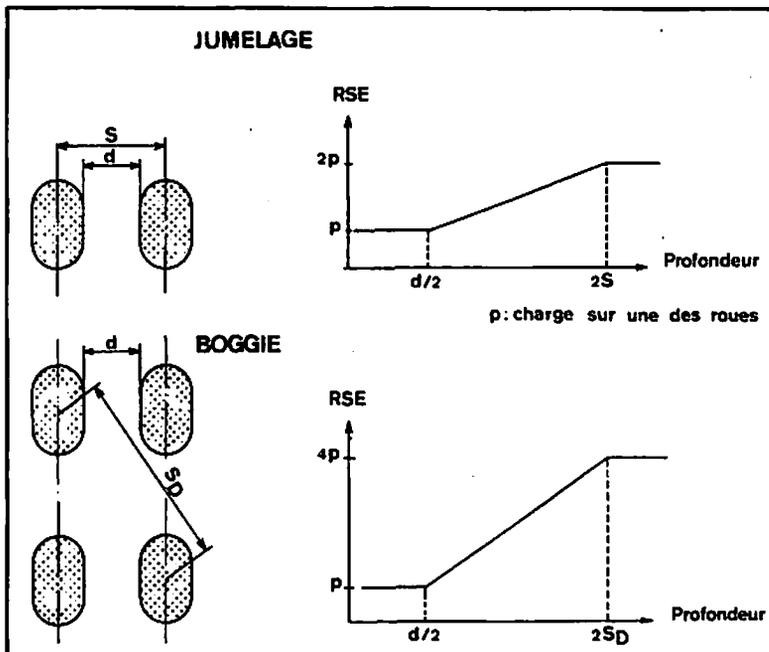


Figure 10. — Diagrammes de Boyd et Foster pour le jumelage et le boggie

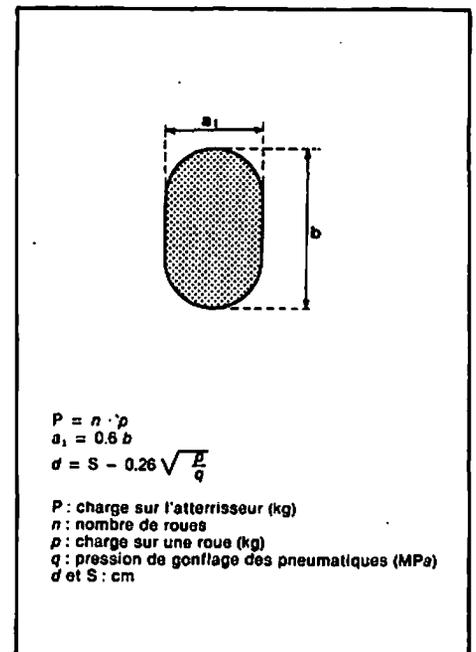


Figure 11

• Jumelage et Boggie

A partir des considérations théoriques résultant de la théorie de Boussinesq et des résultats expérimentaux (référence 12), il est possible de déterminer la profondeur en deçà de laquelle les deux roues d'un jumelage agissent indépendamment l'une de l'autre sur le sol (pour le critère de contrainte verticale), et la profondeur au-delà de laquelle elles se comportent comme une roue unique, de poids égal au poids du jumelage. Il est établi que la première profondeur vaut $d/2$ et la deuxième $2S$, d et S ayant les significations indiquées sur la figure 10. Ces résultats sont étendus à un atterrisseur à boggie, en remplaçant S par la diagonale du boggie S_D . Les points de coordonnées $(d/2, p)$ et $(2S, P)$, avec P poids de l'atterrisseur et p poids d'une roue, sont portés sur un graphique

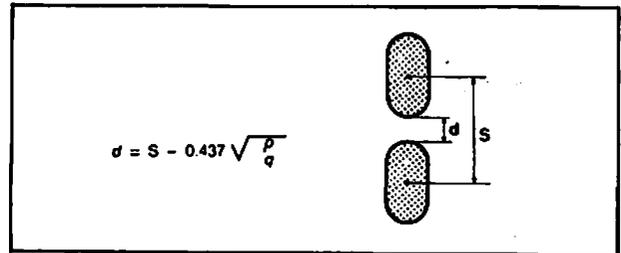
en coordonnées logarithmiques. Il est admis qu'entre ces deux points, la charge simple équivalente ou roue simple équivalente varie linéairement avec la profondeur.

Ce diagramme est reporté sur le fond d'abaque où figurent les droites CBR. Son intersection avec une droite CBR fournit en abscisse la roue simple équivalente (RSE) et en ordonnée l'épaisseur équivalente e de la chaussée.

L'intérêt pratique de cette représentation est de déterminer P et e à partir de l'intersection de deux droites.

Il est supposé que la forme des empreintes de roues est un rectangle complété par deux demi-cercles (figure 11). Avec des empreintes circulaires, des valeurs élevées de la charge pourraient conduire à des valeurs négatives de d .

• Généralisation



p : charge sur un pneumatique
 q : pression de gonflage des pneumatiques (MPa)
 d et S : cm

Figure 12

— Tandem.

— Configuration complexe :

La détermination de S ou de S_n est faite selon les indications de la figure 13. La roue de référence est la plus proche du centre de gravité géométrique de l'empreinte des pneus. S ou S_n est la distance de centre à centre séparant cette roue de référence de la roue la plus éloignée.

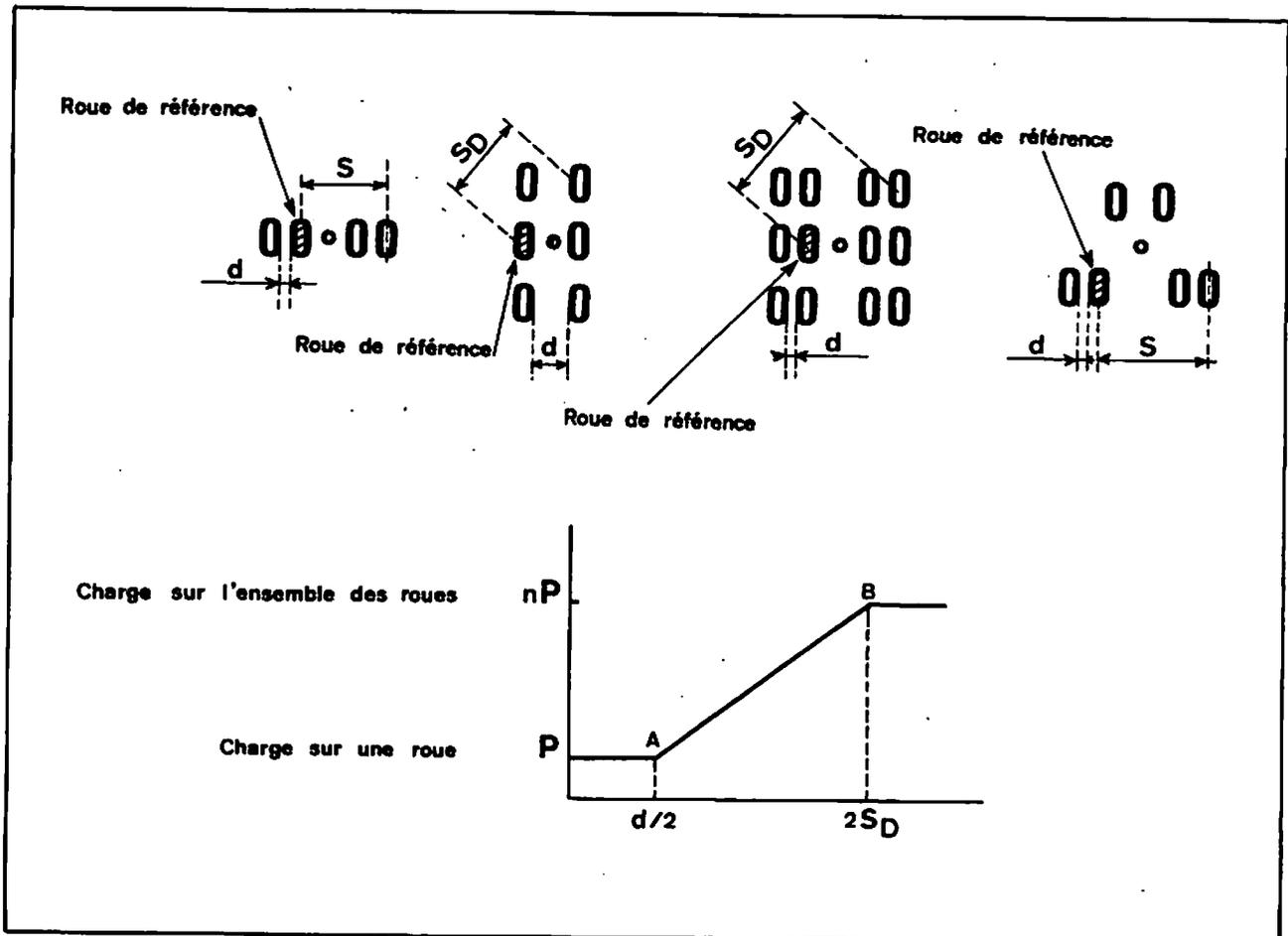


Figure 13. — Généralisation du diagramme de Boyd et Foster.

1.2.3. AUTRE METHODE DE DETERMINATION DE LA RSE

La méthode de Boyd et Foster s'applique aux avions équipés d'atterrisseurs dont l'espacement est suffisamment grand pour que l'action de chaque atterrisseur puisse être considérée isolément (hypothèse retenue pour la méthode de dimensionnement).

Si le train d'atterrissage de l'avion est tel que S_n , défini comme précédemment n'est pas petit par rapport à la distance entre atterrisseurs, la méthode de Boyd et Foster ne s'applique pas. Une autre méthode du Corps of Engineers américain est alors utilisée. Ses fondements théoriques ne sont cependant pas différents de la méthode de Boyd et Foster.

Dans le cas d'un jumelage ou d'un boggie, cette méthode fournit des résultats (épaisseur ou RSE) voisins de ceux obtenus avec la méthode de Boyd et Foster.

- Critère retenu

Le critère retenu pour la détermination de la RSE est celui de la déflexion verticale sur le sol support.

- Principe

La théorie de Boussinesq établit que la déflexion produite en un point par une charge P répartie uniformément sur l'aire d'un cercle de rayon a , avec une pression q , a pour expression :

$$W = f \cdot \frac{qa}{E} \quad \left(a = \sqrt{\frac{P}{\pi \cdot q}} \right) \quad (11)$$

f , coefficient de déflexion, est fonction de la profondeur z du point considéré, de sa distance r à l'axe de la charge et du rayon a de celle-ci :

$$\begin{aligned} \text{pour } r = 0, f &= 1,5 \cdot \left(1 - \frac{z^3}{D^3} \right) \quad \text{avec } D = (z^2 + r^2)^{1/2} \\ \text{pour } r \neq 0, f &\text{ n'a pas d'expression analytique.} \end{aligned}$$

Les valeurs de f peuvent être lues indifféremment sur l'abaque ou sur le tableau de la figure 14.

E est le module d'élasticité du massif de Boussinesq dont le coefficient de Poisson est d'autre part supposé être égal à 0,5.

Pour un groupe de n roues identiques (charge P , rayon a , pression q), la déflexion totale en un point quelconque s'écrit :

$$W = \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n f_i \cdot \frac{qa}{E} = \frac{qa}{E} \sum_{i=1}^n f_i \quad \left(a = \sqrt{\frac{P}{\pi q}} \right)$$

La charge P , de la roue simple de même rayon a et de pression q_s qui produirait la même déflexion W dans l'axe du point est telle que :

$$W = f \cdot \frac{q_s a}{E} \quad \left(a = \sqrt{\frac{P_s}{\pi q_s}} \right)$$

d'où :

$$\frac{q_s}{q} = \frac{\sum f_i}{f} = \frac{P_s}{P}$$

Il suffit alors d'appliquer ce principe à la définition de la RSE.

La RSE est, à une profondeur donnée, la roue simple isolée fictive qui produirait la même déflexion maximale que l'atterrisseur considéré :

$$RSE = P \cdot \frac{\sum f_i}{f} = P \cdot \frac{f_m}{f} \quad (12)$$

La valeur de la roue simple équivalente est indépendante du module E et le calcul se fait à aire constante, ce qui introduit une pression fictive q' variable de la RSE.

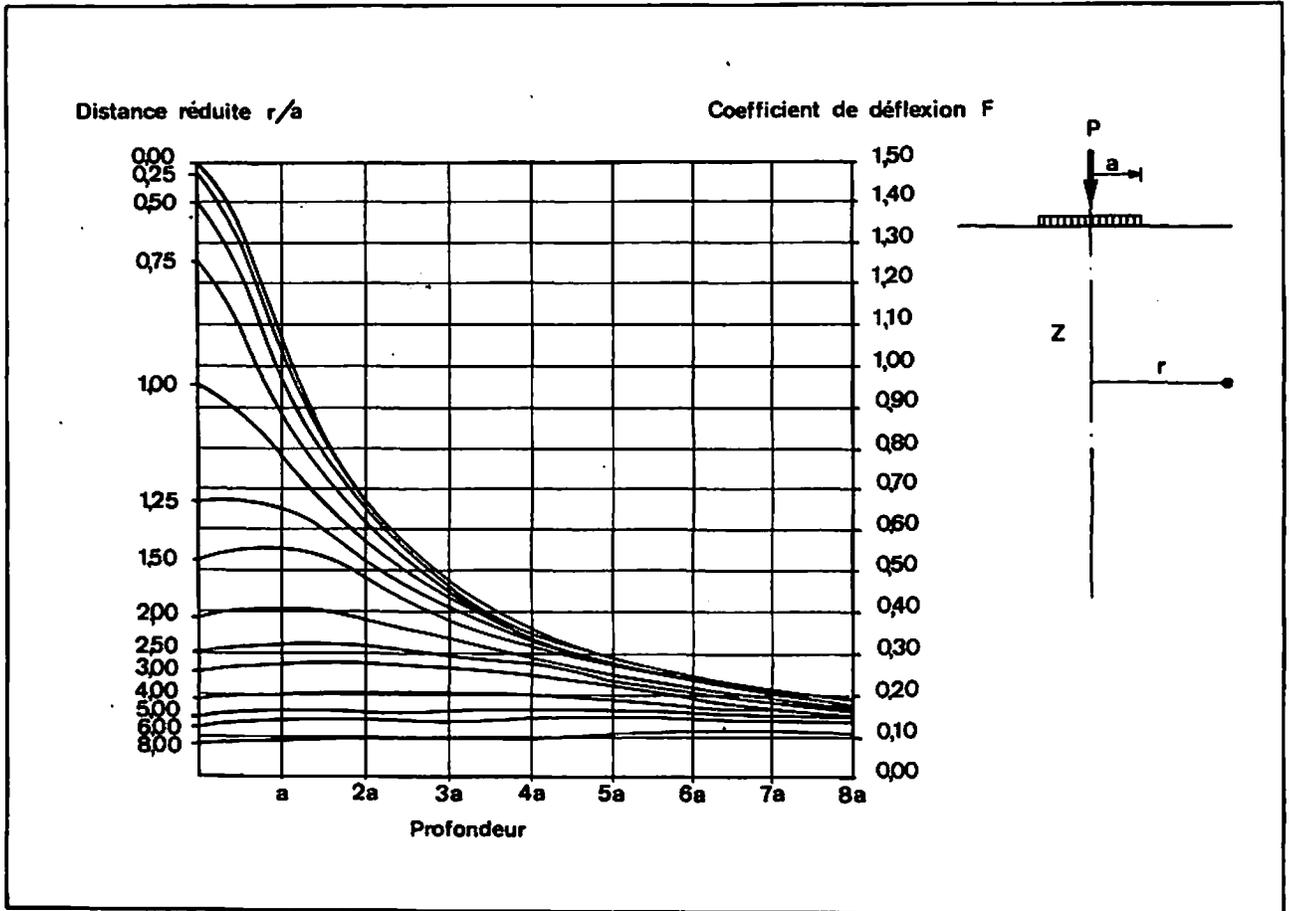


Figure 14. — Abaque et tableau pour le calcul des coefficients de déflexion dans un massif de Boussinesq.

(z et r exprimés en multiples du rayon)

z ↓	r →	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14
0		1.500	1.485	1.438	1.354	1.219	0.955	0.703	0.534	0.388	0.254	0.189	0.150	0.125	0.107	0.094	0.074	0.063	0.053
0.1		1.493	1.477	1.430	1.344	1.204	0.950	0.709	0.536	0.384	0.254	0.189	0.151	0.125	0.107	0.094	0.074	0.063	0.053
0.2		1.471	1.455	1.405	1.315	1.169	0.940	0.722	0.541	0.390	0.254	0.189	0.151	0.125	0.107	0.094	0.074	0.063	0.053
0.3		1.437	1.420	1.365	1.275	1.128	0.925	0.731	0.549	0.393	0.255	0.190	0.151	0.125	0.107	0.094	0.074	0.063	0.053
0.4		1.393	1.376	1.323	1.229	1.088	0.908	0.735	0.556	0.397	0.256	0.190	0.151	0.125	0.107	0.094	0.074	0.063	0.053
0.5		1.342	1.324	1.271	1.180	1.048	0.888	0.734	0.562	0.401	0.257	0.191	0.151	0.126	0.108	0.094	0.075	0.062	0.053
0.6		1.286	1.269	1.218	1.130	1.009	0.867	0.729	0.566	0.404	0.259	0.191	0.151	0.126	0.108	0.094	0.075	0.062	0.053
0.7		1.229	1.212	1.163	1.055	0.971	0.828	0.721	0.568	0.408	0.261	0.192	0.151	0.126	0.108	0.094	0.075	0.062	0.053
0.8		1.171	1.156	1.110	1.034	0.935	0.822	0.711	0.568	0.412	0.262	0.192	0.152	0.126	0.108	0.094	0.075	0.062	0.053
0.9		1.115	1.101	1.058	0.994	0.906	0.799	0.698	0.566	0.414	0.263	0.193	0.152	0.126	0.108	0.094	0.075	0.062	0.053
1.0		1.061	1.069	1.009	0.947	0.866	0.776	0.685	0.563	0.416	0.265	0.194	0.153	0.127	0.109	0.094	0.075	0.063	0.054
1.2		0.960	0.949	0.918	0.868	0.803	0.731	0.656	0.552	0.417	0.269	0.196	0.155	0.128	0.109	0.095	0.075	0.063	0.054
1.5		0.832	0.824	0.787	0.765	0.719	0.666	0.610	0.529	0.414	0.273	0.199	0.155	0.129	0.110	0.095	0.076	0.063	0.054
2.0		0.671	0.666	0.635	0.632	0.604	0.572	0.537	0.483	0.398	0.275	0.203	0.159	0.131	0.111	0.096	0.076	0.063	0.054
2.5		0.557	0.554	0.546	0.533	0.516	0.495	0.473	0.436	0.374	0.272	0.205	0.162	0.133	0.113	0.097	0.077	0.063	0.054
3.0		0.474	0.473	0.467	0.459	0.448	0.434	0.419	0.393	0.348	0.265	0.205	0.163	0.135	0.114	0.099	0.078	0.064	0.054
4.0		0.364	0.363	0.361	0.357	0.351	0.344	0.337	0.323	0.298	0.245	0.199	0.163	0.136	0.116	0.101	0.079	0.065	0.055
5.0		0.294	0.294	0.292	0.290	0.287	0.284	0.279	0.271	0.256	0.222	0.188	0.159	0.135	0.117	0.102	0.080	0.066	0.056
6.0		0.247	0.247	0.246	0.245	0.243	0.240	0.237	0.232	0.223	0.200	0.175	0.152	0.133	0.116	0.102	0.081	0.067	0.056
7.0		0.212	0.212	0.212	0.211	0.210	0.208	0.206	0.204	0.197	0.181	0.162	0.145	0.128	0.114	0.101	0.082	0.063	0.057
8.0		0.188	0.185	0.185	0.184	0.184	0.183	0.181	0.179	0.175	0.164	0.150	0.136	0.123	0.110	0.099	0.081	0.068	0.053
9.0		0.166	0.166	0.165	0.165	0.164	0.163	0.162	0.160	0.158	0.149	0.139	0.128	0.117	0.107	0.097	0.080	0.068	0.053
10.0		0.150	0.150	0.149	0.148	0.148	0.148	0.147	0.146	0.143	0.137	0.129	0.120	0.111	0.102	0.094	0.080	0.068	0.058

• Calcul pratique

Dans la pratique, il est inutile de calculer les déflexions elles-mêmes, mais il suffit de raisonner sur les coefficients de déflexion f . Les étapes de calcul sont alors les suivantes :

Le calcul ci-dessous doit être renouvelé à différentes profondeurs pour tracer un diagramme complet de variation de la RSE avec la profondeur.

a) Des valeurs multiples d'un rayon sont choisies.

b) Divers emplacements en plan sont fixés et la déflexion est calculée pour chacun d'eux. Il est nécessaire de choisir au moins un point dans l'axe de chacune des charges (après simplifications dues aux éventuelles symétries) et au centre de gravité, plus quelques points intermédiaires choisis judicieusement.

c) Les coefficients f , sont recherchés. Ils correspondent aux différentes roues de l'atterrisseur pour l'emplacement envisagé. Les coefficients f , sont additionnés.

d) Le calcul est renouvelé pour les différents emplacements choisis en b) et le coefficient f_m est déterminé : il s'agit de la valeur maximale de la somme déterminée en c) trouvée sur l'ensemble des emplacements testés.

e) Pour la profondeur envisagée, le coefficient f pour une roue simple isolée est calculée. Cette roue a une aire de contact égale à celle d'une des roues de l'atterrisseur.

f) La RSE est déterminée par la relation (12).

1.3. EPAISSEUR MINIMALE DE MATERIAUX TRAITES

L'abaque de la figure 3 (partie 1) qui fournit l'épaisseur équivalente minimale de matériaux traités en fonction de l'épaisseur équivalente totale de la chaussée et du CBR du sol support, est établi de la manière suivante :

- un CBR de 30 est la valeur minimale qu'il convient d'obtenir sur le dessus de la couche de fondation,
- comme il est indiqué au paragraphe 1.1., l'épaisseur équivalente totale e de la chaussée pour une charge P , considérée à la pression q , est donnée en fonction du CBR par la formule (9) qui peut se mettre sous la forme :

$$e = \sqrt{\frac{P}{q} \cdot f(\text{CBR}, q)}$$

- cette même formule permet de calculer l'épaisseur équivalente e_1 de chaussée qui doit surmonter la fondation du CBR 30 :

$$e_1 = \sqrt{\frac{P}{q} \cdot f(30, q)}$$

$$\text{ou encore } e_1 = e \cdot \frac{f(30, q)}{f(\text{CBR}, q)} \quad (13)$$

- l'abaque n° 3 est tracé pour une valeur constante de pression : $q = 0,9 \text{ MPa}$,
- en système de coordonnées logarithmiques portant e_1 en abscisse et e en ordonnée, l'abaque figure un faisceau de droites parallèles lorsque le CBR varie, la relation (13) pouvant se mettre sous la forme :

$$\log e_1 = \log e + E \text{ où } E \text{ est une fonction du CBR.}$$

2. METHODES D'ETUDE DES CHAUSSEES RIGIDES

Le critère de dimensionnement des chaussées rigides est la contrainte admissible de traction par flexion dans la dalle de béton. Le moment de flexion de la dalle est calculé par la méthode de la Portland Cement Association (PCA) avec les hypothèses de Westergaard.

2.1. METHODE DE WESTERGAARD

Les hypothèses de Westergaard sont :

- le sol se comporte comme un liquide dense. Sa réaction est proportionnelle à l'enfoncement. Le sol est caractérisé par son module de réaction K ,
- la théorie des plaques est appliquée à la dalle. Celle-ci est caractérisée par son module d'élasticité E et son coefficient de Poisson ν ,
- les charges sont situées au centre d'une dalle infinie.

Pour tenir compte des dimensions finies des dalles et des conditions de transferts de charges entre elles, un coefficient de sécurité est appliqué à la contrainte admissible du béton. Cette méthode forfaitaire apporte une précision suffisante dans les calculs et évite le recours à des méthodes plus adéquates mais difficiles à mettre en œuvre (exemple : méthode des éléments finis).

2.2. METHODE DE LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION

Dans un premier temps, les ingénieurs Pickett et Ray et la Portland Cement Association (PCA) avaient mis au point une méthode graphique utilisant des diagrammes d'influence (référence 13) pour calculer le moment de flexion pour tous les types d'atterrisseurs. Par la suite, une méthode de calcul des moments permettant un traitement sur ordinateur a été établie par R.G. Packard et la PCA (références 14 et 15). Sur la base de ces travaux, un programme dont les résultats sont tout à fait convergents avec ceux des études citées, a été appliqué par le Service Technique des Bases Aériennes aux différents avions recensés dans le présent document.

Il convient donc de noter que l'intérêt du programme de calcul automatique n'est pas tant de fournir une plus grande précision dans la détermination de la contrainte maximale, cette précision paraissant assez illusoire, que de permettre une étude aisée des actions des différents atterrisseurs à différentes masses.

Ce paragraphe donne quelques indications sur les principes du programme informatique de la PCA et de son adaptation par la STBA pour le tracé des abaques.

Ces renseignements ne sont destinés qu'à faciliter l'intelligence de la méthode de dimensionnement et non à inciter le calcul manuel qui conduirait dans tous les cas à des développements longs.

2.2.1. RECHERCHE AUTOMATIQUE DE L'EFFORT MAXIMAL DANS LA DALLE

Les paramètres E , ν et K , ainsi que l'épaisseur h de la dalle se combinent et interviennent dans les calculs sous forme d'une grandeur appelée **rayon de rigidité relative** dont l'expression est :

$$l = \sqrt{\frac{E h^3}{12 (1 - \nu^2) K}} \quad (14)$$

E : MPa — K : MN/m² — l et h : m

Le programme assimile le contour de l'empreinte des pneumatiques à une ellipse définie comme présentée sur la figure 15 :

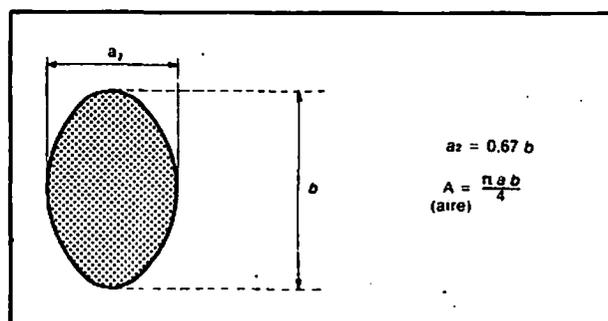


Figure 15. — Forme géométrique des empreintes de pneumatiques pour l'étude des chaussées rigides.

Soit à rechercher le moment de flexion produit par un atterrisseur dans une dalle caractérisée par son rayon de rigidité relative l .

Le programme calcule dans un premier temps l'expression du moment $M(r)$ produit en un point O et selon la direction Ox , par une charge répartie avec une pression constante q sur un secteur OMM' , délimité par les demi-droites d'angles polaires θ et $\theta + \Delta\theta$, et par le cercle de rayon r : (figure 16).

Le programme calcule le moment produit par l'aire hachurée sur la figure, soit $M(r_2) - M(r_1)$ (à condition que $\Delta\theta$ soit suffisamment petit), et par conséquent, il permet de calculer par intégration le moment produit par des empreintes de formes quelconques.

Le moment produit par un atterrisseur à roues multiples est égal à la somme des moments produits par chacune des roues.

Par exploration des différentes positions possibles, le calcul automatique permet d'obtenir la position de l'atterrisseur procurant dans la direction Ox la composante maximale du moment en O et la valeur de ce moment. Avec la méthode de calcul manuelle, il n'est possible de rechercher la valeur du moment que pour un petit nombre de positions de l'atterrisseur. La position cherchée est variable avec les caractéristiques de l'atterrisseur, la charge sur l'atterrisseur et le rayon de rigidité relative de la dalle.

Connaissant la composante κ du moment de flexion maximale, la contrainte de traction maximale dans la dalle est donnée par la formule classique :

$$\sigma = \frac{6 \kappa}{h^2}$$

h étant l'épaisseur de la dalle.

2.2.2. ETABLISSEMENT ET UTILISATION DES ABAQUES

Les abaques des avions figurant dans l'instruction ont été établis pour plusieurs valeurs de charges et de modules de réaction. Le programme PCA d'origine fait l'hypothèse que les empreintes ont une aire constante. Il a semblé préférable de travailler à pression constante dans le programme STBA.

Pour représenter en toute rigueur les résultats des calculs, les abaques ne devraient comporter qu'une seule charge par groupe de valeurs du module. Par commodité d'emploi, des approximations ont été introduites, afin de représenter plusieurs charges sur le même abaque :

- les abaques sont justes pour la charge maximale y figurant,
- pour les autres charges, les abaques sont le plus précis pour $K = 50 \text{ MN/m}^3$ et présentent des divergences légères avec les résultats des calculs. Ces divergences ne dépassent jamais sur la valeur de la contrainte $0,1 \text{ MPa}$ si la charge considérée ne diffère pas de la charge maximale de plus de 20 %,
- dans tous les cas, les courbes des masses ne sont pas des droites mais elles en sont très voisines dans le domaine couvert par les abaques.

Compte tenu de la limite admissible pour ces approximations, les conséquences pratiques pour les tracés sont :

- la nécessité de présenter plusieurs abaques pour les atterrisseurs-types, ceux-ci couvrant une large gamme de charges,
- la possibilité de présenter sur un même abaque les résultats pour un avion la gamme des charges étant plus resserrée.

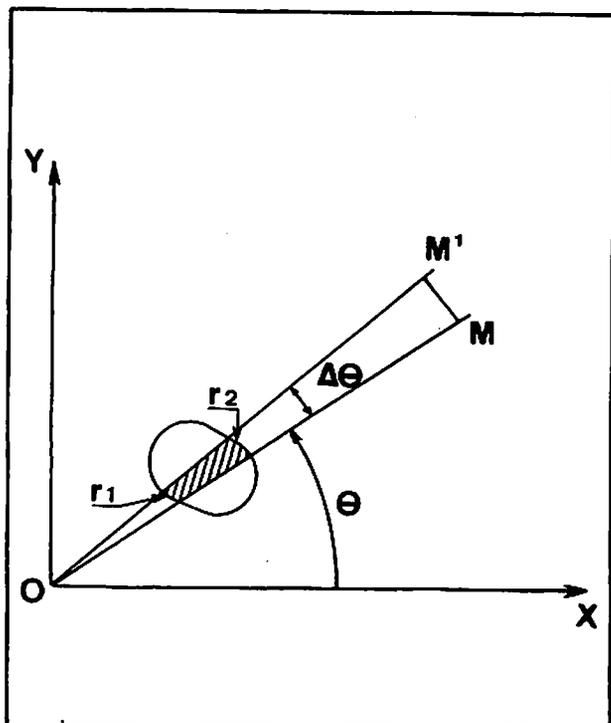


Figure 16. — Calcul du moment de flexion dans une dalle de béton.

2.2.3. INFLUENCE DES PARAMETRES E ET ν DU BETON

Dans les calculs, le module d'élasticité E du béton et le coefficient de Poisson ν du béton sont respectivement adoptés à 30 000 MPa et 0,15.

L'influence de la valeur du module d'élasticité E peut être aisément évaluée. En effet, E et K n'interviennent dans les calculs du béton que par leur rapport $\frac{E}{K}$. Par suite, lorsque E est multiplié par un coefficient λ , cela revient à diviser K par λ . Il est possible de vérifier dans les abaques la faible sensibilité du dimensionnement à ce paramètre. C'est ainsi qu'une augmentation de 10 % du module d'élasticité revient à réduire de 10 % le module K dans les calculs. L'influence de E est donc très limitée.

L'influence de λ est moins facile à évaluer puisque ν intervient dans diverses équations. Toutefois, la Portland Cement Association a montré qu'une augmentation de ν de 0,15 à 0,20 se traduisait par une augmentation de la contrainte de 4 %.

En conclusion, l'hypothèse de la constance des paramètres E et ν paraît raisonnable.

3. FATIGUE DES CHAUSSEES

3.1. LOI DE MINER

Soit une chaussée fréquentée par une famille d'avions (i) aux charges P_{ij} . Chaque avion i induit dans la chaussée une fatigue qui dépend de sa charge P_{ij} et de son nombre de passages (ou de répétitions de sa charge) n_{ij} .

Le nombre de passages (ou le nombre de répétition de sa charge) de cet avion à la charge P_{ij} correspondant à la durée de vie normale de la chaussée est N_{ij} .

Si l'avion i effectue n_{ij} passages, il produit par définition un dommage égal à :

$$\frac{n_{ij}}{N_{ij}}$$

La durée de vie normale de la chaussée est telle que :

$$\sum_{ij} \frac{n_{ij}}{N_{ij}} = 1 \quad (15)$$

La relation (15) est connue sous le nom de la loi de Miner, dite d'additivité des dommages.

Le critère de dommage (critère permettant de calculer le nombre admissible N_{ij} de passages pendant la durée de vie normale) dépend du critère de dimensionnement :

- contrainte verticale sur le sol support,
- contrainte de traction par flexion du béton,
- contrainte de traction à la base des couches traitées.

A chaque critère correspond un nombre admissible N_{ij} de répétitions à la charge P_{ij} de l'avion i . Au-delà de ce nombre, des passages de cet avion conduiraient à un risque de rupture dans la chaussée ou le sol pour le critère considéré.

Théoriquement, la somme des dommages doit être calculée pour chacun des critères. La fin de la durée de vie normale de la chaussée est obtenue dès que l'un de ces critères produit un dommage total égal à 1.

Dans le cadre de cette instruction, les chaussées souples sont dimensionnées pour le seul critère de contrainte verticale sur le sol support et les chaussées rigides pour le critère de contrainte de traction par flexion du béton.

3.2. RELATIONS D'EQUIVALENCE

Le trafic réel est composé d'avions différents, à des charges différentes et qui passent en des points différents de la chaussée.

Pour tenir compte de ces différences ainsi que de la répartition latérale du trafic, le trafic réel est ramené à un trafic équivalent subissant lui-même la même répartition latérale puis est traduit en nombre d'applications de charges en chaque point.

Pour déterminer ce nombre en chaque point, il est nécessaire d'utiliser des relations :

- entre atterrisseurs,
- entre charges et nombre de mouvements,
- entre nombre de mouvements et nombre d'applications de charge, du fait de la répartition latérale du trafic.

3.2.1. EQUIVALENCE ENTRE ATERRISSEURS

La relation d'équivalence entre atterrisseurs découle des indications déjà données à propos du dimensionnement des chaussées. Par exemple, une charge appliquée par un jumelage et une autre charge appliquée par un boggy sont équivalentes lorsqu'il leur correspond la même roue simple équivalente au niveau du sol support

(pour les chaussées souples) ou si elles produisent la même contrainte maximale de traction par flexion dans le béton (pour les chaussées rigides).

3.2.2. EQUIVALENCE ENTRE CHARGES ET NOMBRE DE MOUVEMENTS

Des essais de chargements de plaque réalisés entre 1950 et 1960 notamment par l'Aéroport de Paris ont permis de déduire la relation d'équivalence suivante :

$$P = P_0 (1,2 - 0,2 \log N) \quad (16)$$

qui traduit la condition pour que 10 répétitions d'une charge égale à la charge admissible P_0 d'une chaussée soient équivalentes à N répétitions d'une charge quelconque P .

Il peut être déduit de (16) l'autre relation :

$$N_0 = 10^{5 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right)} \quad (17)$$

qui traduit qu'une répétition de la charge P est équivalente à N_0 répétitions à la charge admissible P_0 de la chaussée.

Il convient d'insister sur le fait que les relations (16) et (17) ne sont valables que si P_0 est effectivement la charge admissible de la chaussée. Il peut être montré facilement qu'une relation plus générale d'équivalence entre N_1 mouvements d'une charge quelconque P_1 et N_2 mouvements d'une autre charge quelconque P_2 s'écrit :

$$\frac{5 P_1}{P_0} + \log N_1 = \frac{5 P_2}{P_0} + \log N_2 \quad (18)$$

où P_0 est la charge admissible de la chaussée.

Remarque sur la durée de vie des chaussées :

La durée de vie n'est pas une grandeur mesurable. Il faut la considérer comme une référence (par exemple pour comparer les durées de vie théoriques de deux structures) ou un objectif pour la gestion des chaussées. Le calcul de la durée de vie résiduelle d'une chaussée (à partir de la différence entre trafics équivalents admissible et écoulé) ne donne qu'une tendance. Ainsi, dans la réalité, la charge admissible P_0 d'une chaussée n'est jamais parfaitement constante (ne serait-ce qu'en raison des variations d'ordre climatique) de même que les charges réelles P des avions sont difficiles à comptabiliser avec précision. A une incertitude de $\pm 5\%$ sur le rapport P/P_0 , correspond d'après la formule (17) une incertitude comprise entre -44% et $+77\%$ sur N_0 .

3.2.3. EQUIVALENCE ENTRE NOMBRE DE MOUVEMENTS ET NOMBRE D'APPLICATIONS : DISTRIBUTION LATÉRALE DU TRAFIC

En un point donné (sur le sol support pour les chaussées souples ou sur une dalle pour les chaussées rigides), existe un recouvrement de charges tous les 3 à 4 mouvements réels.

De manière à permettre des conversions simples à partir des données statistiques annuelles de trafic, la valeur de 3,65 est choisie : ainsi les 36 500 mouvements équivalents du trafic normal correspondent à 10 000 recouvrements de charges.

Ce nombre est celui pris en compte dans l'établissement des abaques.

Remarque pour les aires de stationnement :

La formule (17) permet de calculer que 1 mouvement à la charge P_0 est équivalent à environ 7 mouvements à la charge $\frac{P_0}{1,2}$. Dans le cas des aires de stationnement, la pondération des charges réelles par 1,2 est donc équiva-

lente à une multiplication par 7 du nombre de mouvements réels considérés sur l'aire. Ceci traduit la conjugaison des trois effets suivants :

- une plus forte canalisation du trafic (un recouvrement par mouvement au lieu de tous les trois à quatre mouvements sur les autres aires),
- l'effet prolongé du chargement statique de la chaussée.
- des cisaillements plus importants des couches superficielles.

Le nombre de mouvements réels sur les aires de stationnement doit lui-même être évalué avec précision. Aussi ce nombre ne sera pas identique selon que les avions évoluent sur l'aire de stationnement de façon autonome (un stationnement produit un mouvement) ou sont poussés (un stationnement produit deux mouvements).

Pour une bonne gestion des chaussées, l'adoption de mesures d'exploitation assurant une meilleure répartition du trafic peut augmenter notablement la durée de vie des chaussées : par exemple, modification périodique, dans la limite des contraintes existantes, de la position des marques de guidage des avions. Malgré leur difficulté d'application, l'enjeu économique doit inciter la recherche de telles solutions.

4. GEL

A partir d'une méthode initiale permettant de déterminer la profondeur atteinte par le gel dans un massif semi-infini, homogène et isotrope possédant des propriétés géotechniques et thermiques constantes, il a été possible de réaliser le calcul de la profondeur de gel pour le cas le plus général des chaussées multicouches.

Ce calcul s'appuie sur la formule de Berggren modifiée. C'est cette formule qui est appliquée dans le cadre de cette instruction.

4.1. FORMULE DE BERGGREN MODIFIEE

La formule de Berggren modifiée telle qu'elle est utilisée pratiquement s'écrit :

$$Z = 415 \lambda \sqrt{\frac{KT}{L}} \quad (19)$$

K : coefficient de conductibilité thermique du sol gelé (cal/cm·°C·unité de temps)

l : indice de gel (°C·unité de temps)

L : chaleur latente volumique de congélation du sol (cal/cm³)

Z : profondeur de gel (cm)

λ : paramètre sans dimension.

4.2. APPLICATION AU CAS DE MULTICOUCHES

La formule (19) de Berggren modifiée a fait l'objet d'une adaptation au cas des chaussées.

La formule s'écrit sous la forme :

$$Z = 415 \lambda \sqrt{\frac{l}{\left(\frac{L}{K}\right)_{eq}}} \quad (20)$$

Le multicouche constitué par la chaussée est remplacé par un monocouche équivalent dont la valeur de $\frac{L}{K}$ est donnée par la relation :

$$\left(\frac{L}{K}\right)_{eq} = \frac{2}{Z^2} \left[\frac{d_1}{K_1} \left(\frac{L_1 d_1}{2} + L_2 d_2 + \dots + L_n d_n\right) + \frac{d_2}{K_2} \left(\frac{L_2 d_2}{2} + L_3 d_3 + \dots + L_n d_n\right) + \dots + \frac{d_n}{K_n} \left(\frac{L_n d_n}{2}\right) \right] \quad (21)$$

avec $Z = d_1 + d_2 + \dots + d_n$

d_1, d_2, \dots, d_{n-1} représentant l'épaisseur des $(n - 1)$ premières couches gelées et d_n la fraction gelée de la nième couche, le gel étant supposé atteindre cette couche sans la traverser entièrement.

Les coefficients L_i et K_i représentent respectivement la chaleur latente volumique de congélation et le coefficient de conductibilité thermique de chacune des couches.

Le paramètre λ est lié par une relation complexe (non détaillée ici) à deux autres paramètres α et μ définis comme suit :

$$\alpha = \frac{T_0 \cdot t}{l} \quad \mu = \frac{Cp \cdot l}{Lp \cdot t}$$

T_0 : température moyenne annuelle du lieu considéré (°C)

t : durée du gel (unité de temps)

l : indice de gel (°C·unité de temps)

C_p et L_p sont des valeurs pondérées des coefficients C_i (capacité calorifique volumique) et L_i (chaleur latente volumique de congélation) des différentes couches :

$$C_p = \frac{C_1 d_1 + C_2 d_2 + \dots + C_n d_n}{Z}$$

$$L_p = \frac{L_1 d_1 + L_2 d_2 + \dots + L_n d_n}{Z}$$

Le manuel pratique de l'Instruction (volume 2) fournit tous les éléments nécessaires au calcul de la profondeur de gel par cette méthode :

- valeur des indices de gel pour les différentes stations météorologiques,
- paramètres thermiques des sols et matériaux de chaussées (C_i , L_i , K_i),
- abaques pour le calcul du paramètre λ en fonction de α et μ ,
- description du calcul itératif nécessaire pour déterminer Z .

5. METHODE ACN/PCN

Ce chapitre donne les indications sur la méthode de calcul de l'ACN d'un avion et sur la méthode de détermination du PCN d'une chaussée.

5.1. PRINCIPE GENERAL

Le principe de calcul de l'ACN d'un avion est de rechercher une roue simple équivalente.

1 - Pour l'atterrisseur principal ou le groupe d'atterrisseurs principaux (exemple : boggies du B 747) de l'avion considéré, l'épaisseur de chaussée nécessaire est calculée :

- par la méthode du Corps of Engineers décrite au paragraphe 1.2.3. de la présente annexe, page 58, pour les chaussées souples (en fonction du CBR du sol support),
- par la méthode de la Portland Cement Association pour les chaussées rigides (en fonction du module de réaction du sol support et d'une valeur de la contrainte admissible de traction par flexion du béton fixée à 2,75 MPa). Cette méthode est décrite au paragraphe 2.2., page 61, de la présente annexe.

2 - La valeur de la charge sur une roue simple isolée gonflée à la pression standard de 1,25 MPa nécessitant la même épaisseur de chaussée est calculée.

3 - La valeur ainsi obtenue correspond à une charge de roue simple équivalente. En notant RSE cette charge, l'ACN est défini comme suit :

$$\text{ACN} = \frac{2}{1000} \text{RSE} \quad \text{RSE (kg)} \quad (22)$$

L'ACN est un nombre sans dimension. Le coefficient de la relation (22) a été choisi pour procurer une gamme de valeurs comprises entre 0 et 100 pour la grande majorité des avions existants.

4 - De manière à simplifier les publications, les ACN des avions ne sont calculés que pour 4 catégories de sol support caractérisées chacune par un CBR (chaussées souples) ou un module de réaction (chaussées rigides) ainsi que pour 2 masses (masse maximale au roulage, masse à vide en ordre d'exploitation).

5.2. CALCUL DE L'ACN

5.2.1. Chaussées souples

Les données de calcul sont :

- le CBR représentatif d'une des 4 classes de sol support (3, 6, 10, 15),
- les caractéristiques géométriques de l'atterrisseur et la pression standard de gonflage des pneumatiques de l'avion considéré,
- la masse (maximale au roulage ou à vide en ordre d'exploitation).

L'épaisseur de chaussée est calculée par la méthode du Corps of Engineers dont le principe est décrit au paragraphe 1.2.3. de la présente annexe. (A une légère modification près : les coefficients de déflexion sont nuls pour tout point situé à plus de 20 rayons en profondeur ou en distance à l'axe de la roue chargée).

Cette épaisseur est corrigée par un coefficient α qui dépend du nombre de roues de l'atterrisseur considéré ($\alpha = 1$ pour 1 roue, $\alpha = 0,9$ pour 2, $\alpha = 0,825$ pour 4). L'épaisseur corrigée e' est égale à αe .

La relation qui fournit la RSE gonflée à 1,25 MPa pour l'épaisseur e' ainsi trouvée est la suivante :

$$\text{RSE} = \frac{e'^2}{\frac{1}{0,5695 \text{ CBR}} - \frac{1}{32,035 q}}$$

e : épaisseur équivalente de la chaussée (cm)

q : pression de gonflage des pneumatiques (MPa)

RSE : roue simple équivalente (kg).

L'ACN est finalement donné par la relation (22).

5.2.2. CHAUSSEES RIGIDES

Les données de calcul sont :

- le module de réaction K représentatif d'une des 4 classes de sol support (20, 40, 80, 150 MN/m³),
- les caractéristiques géométriques et la pression standard de gonflage des pneumatiques de l'avion considéré,
- la contrainte admissible de traction par flexion du béton qui est fixée par convention à 2,75 MPa.

L'épaisseur de la dalle de béton est calculée par la méthode de la Portland Cement Association décrite au paragraphe 2.2. de la présente annexe.

Cette même méthode permet de calculer la valeur de la roue simple gonflée à la pression conventionnelle de 1,25 MPa pour laquelle est obtenue la même épaisseur.

La RSE ainsi définie correspond au critère de contrainte de traction par flexion du béton.

L'ACN est finalement donné par la relation (22).

5.2.3. CALCUL PRATIQUE

Les ACN des principaux avions existants ont été calculés et publiés par l'O.A.C.I. Ils figurent dans les tableaux de caractéristiques avions (volume 2 - Manuel pratique).

Pour les autres avions, des programmes Informatiques utilisables pour le calcul sont publiés dans le Manuel de conception des aérodromes, 3^e partie, chaussées — OACI.

5.3. CORRECTION DE L'ACN EN FONCTION DE LA PRESSION

Lorsque la pression effective de gonflage des pneumatiques d'un avion est sensiblement différente de la pression standard pour laquelle les ACN publiés ont été calculés, une correction peut être réalisée selon les indications suivantes :

• Chaussées souples

La formule suivante est appliquée :

$$\text{ACN corrigé} = \text{ACN} \cdot \frac{1}{0,5695 \text{ CBR} - \frac{1}{32,035 q'}} - \frac{1}{0,5695 \text{ CBR} - \frac{1}{32,035 q}} \quad (23)$$

ACN : valeur calculée avec la pression standard q

q' : pression différente de la pression standard q .

• Chaussées rigides

L'abaque ci-après est utilisé.

Il est illustré par un exemple d'avion d'ACN 40 calculé pour 1,25 MPa et dont on cherche pour 0,90 MPa (valeur trouvée : ACN = 35).

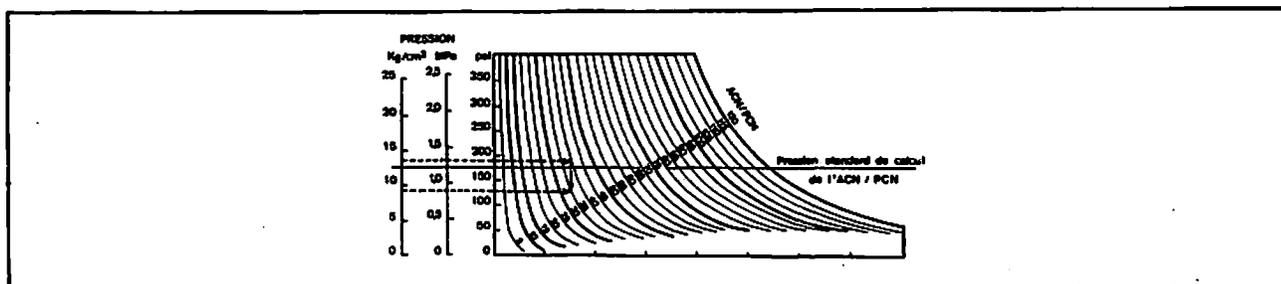


Figure 17. — Chaussées rigides : correction des ACN en fonction de la pression de gonflage des pneumatiques.

5.4. DETERMINATION DU PCN D'UNE CHAUSSEE

La description de ces calculs fait l'objet du volume 3.

6. EVALUATION DES CHAUSSEES

6.1. REMARQUES SUR LA METHODE INVERSE DE DIMENSIONNEMENT

La méthode inverse de dimensionnement est applicable dès que sont connues les caractéristiques de la chaussée et du sol support.

Dans le cas des chaussées souples, ces caractéristiques sont l'épaisseur équivalente totale et le CBR du sol de fondation. La méthode inverse n'est alors applicable avec ces seules données que si la chaussée est normalement constituée et présente des couches de qualité croissante de bas en haut. Dans le cas contraire, il convient de calculer la charge admissible à partir de chacune des couches et de ne retenir finalement que la plus faible des valeurs ainsi trouvée. Cela suppose que soient connus les CBR mesurés sur le dessus de chacune des couches.

Dans le cas des chaussées rigides, les caractéristiques sont l'épaisseur de la dalle de béton, le module corrigé du sol support et la contrainte admissible de traction par flexion. La méthode inverse est plus facilement applicable car la charge admissible dépend principalement de la dalle de béton dont il est facile de mesurer les caractéristiques.

6.2. ESSAIS DE PLAQUE NON DESTRUCTIFS

6.2.1. MODE OPERATOIRE ET EXPLOITATION DES MESURES

Les essais consistent à appliquer à la chaussée des charges répétées, suivant des cycles programmés pour un déroulement très précis, comportant :

- la mise en charge à vitesse constante, en général 2 tonnes/seconde,
- un palier où la charge est maintenue pendant 10 secondes,
- le déchargement rapide,
- un palier à charge nulle, d'une durée de 10 secondes.

Les valeurs mesurées par différents capteurs sont enregistrées automatiquement et de façon continue pendant les cycles, notamment à la fin des paliers sous la charge d'essai et sous charge nulle. Le choix des charges appliquées, les mesures effectuées et l'exploitation des résultats dépendent de la structure de la chaussée.

L'enregistrement est réalisé sur support magnétique adapté pour un traitement informatique. Un grand nombre de paramètres peut ainsi être stocké.

CHAUSSEES SOUPLES

— **Principe de l'essai** : l'essai a pour but de caractériser le comportement à la fatigue du complexe constitué par la chaussée et son sol support. L'ensemble est soumis à des cycles de chargement et de déchargement sous des charges croissantes choisies de façon à encadrer la charge de service et le tassement résiduel est mesuré après chaque cycle. De nombreuses expérimentations ont montré que, pour des charges voisines de la charge de service, ce tassement résiduel est une fonction logarithmique du nombre de cycles. La valeur des tassements, pour les dix premiers cycles, connue, cette loi est utilisée pour calculer par extrapolation la valeur du tassement après 10 000 cycles, ce qui représente l'ordre de grandeur du nombre de répétitions de la charge admissible que subit une chaussée d'aérodrome au cours de sa durée de vie. Une courbe donnant le tassement résiduel après 10 000 cycles en fonction de la charge d'essai peut alors être tracée. Selon la forme de cette courbe et la constitution de la chaussée, un critère de tassement résiduel maximal est choisi et permet de déterminer sur la courbe la valeur de la charge de service.

— **Mode opératoire** : le diamètre de la plaque d'essai est choisi de façon que la pression moyenne appliquée à la chaussée reste dans le domaine des pressions habituelles des pneumatiques des avions. Généralement est utilisé un diamètre de 42 cm pour les charges inférieures à 20 tonnes et un diamètre de 65 cm pour les charges comprises entre 20 et 50 tonnes. Quatre ou cinq capteurs sont fixés sur une poutre de référence de façon à mesurer les déformations de la chaussée sous la plaque et à l'extérieur sur un rayon afin d'obtenir l'allure de la cuvette de déflexion. Les charges d'essai font l'objet de dix cycles chacune. La première est choisie nettement

en dessous de la valeur supposée de la charge de service. Les suivantes sont définies en fonction des tassements obtenus avec les charges précédentes. Au total, il faut réaliser trois ou quatre séries de dix cycles à des charges croissantes qui encadrent la charge de service effective de la chaussée (cf. figure 18).

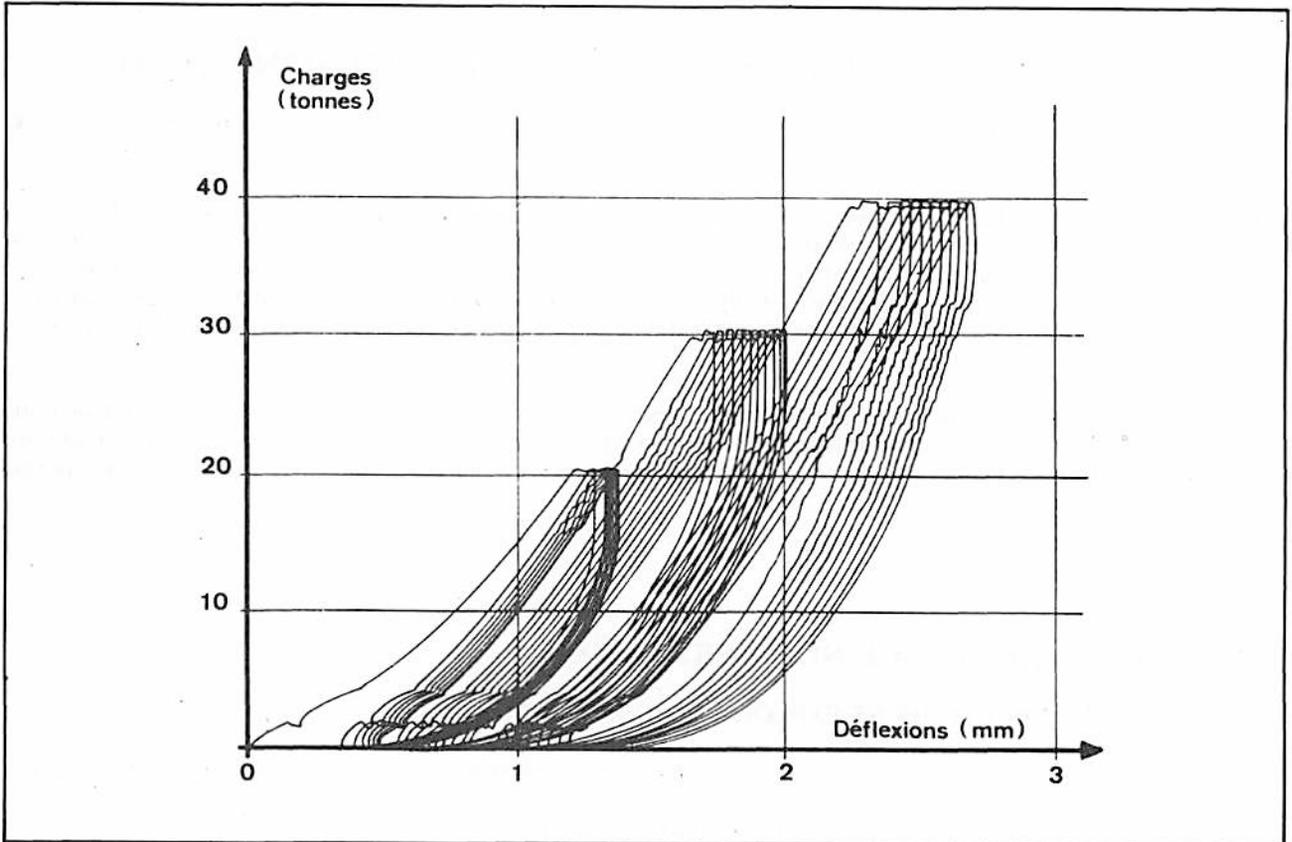


Figure 18. — Cycle de chargements sur chaussée souple.

— Exploitation des mesures

• Etude de l'évolution du tassement résiduel sous la plaque

Les tassements résiduels mesurés sous la plaque après chaque cycle font l'objet d'un traitement mathématique. Ce dernier a pour but de déterminer pour chaque charge d'essai le tassement résiduel extrapolé à 10 000 cycles.

Une courbe donnant le tassement résiduel en fonction de la charge d'essai peut donc être tracée (cf. fig. 19).

La charge admissible pour le point considéré, ou **charge de service** est la valeur correspondant à un tassement limite admissible, en général 5 mm. Pour certaines chaussées (exemple : structures semi-rigides, structures comportant une forte épaisseur de matériaux traités aux liants hydrocarbonés) d'autres critères sont sélectionnés.

• Etude de paramètres caractérisant le comportement mécanique

D'autres mesures peuvent venir compléter utilement l'étude du tassement résiduel :

- la déflexion d sous charge,
- le rayon de courbure R ,
- le produit $R.d$.

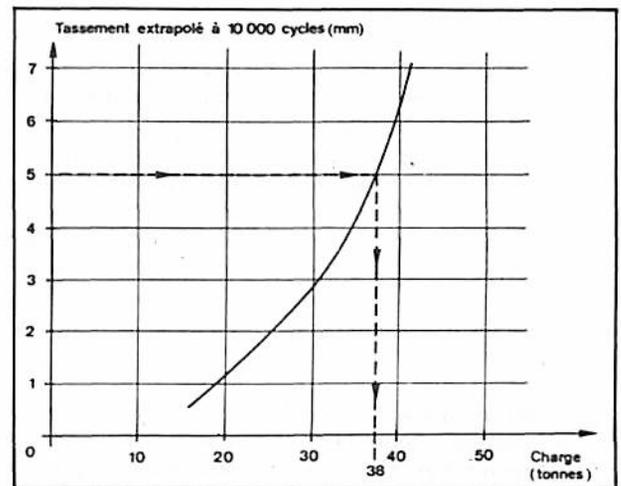


Figure 19. — Tassement résiduel extrapolé en fonction de la charge d'essai.

CHAUSSEES RIGIDES

— **Principe de l'essai** : l'essai a pour but de rechercher la contrainte maximale de traction par flexion sur la face supérieure de la dalle chargée.

Les dalles sont chargées en coin. Ce cas de chargement est en général le plus contraignant. La contrainte maximale est alors située sur la bissectrice de l'angle. Le principe des mesures consiste donc à disposer une série de capteurs d'élongation sur cette bissectrice afin de déterminer l'élongation maximale. Connaissant le module d'élasticité du béton, soit à partir d'essais spécifiques soit d'après les documents d'archives, il peut être déduit la contrainte maximale correspondante.

Il est important que les essais soient réalisés dans des conditions de température représentatives des plus mauvais transferts de charge entre dalles. Ces conditions devraient être telles qu'au cours de l'année, pas plus de 25 % des charges circulent sur la chaussée alors que la température des dalles est inférieure à celle qui y règne pendant l'essai.

— **Mode opératoire** : seule la plaque de 42 cm de diamètre est utilisée car la pression d'application a peu d'influence sur les résultats pour les chaussées rigides. Les cinq capteurs d'élongation sont disposés sur la bissectrice de l'angle correspondant au coin chargé. Seules les dalles non fissurées peuvent être testées. Quatre capteurs de déflexion sont mis en place aux quatre coins de dalles au voisinage de la plaque (cf. figure 20).

Ce dispositif permet d'apprécier la qualité des transferts de charge. Ces derniers capteurs sont fixés à une poutre de référence dont les appuis sont suffisamment éloignés.

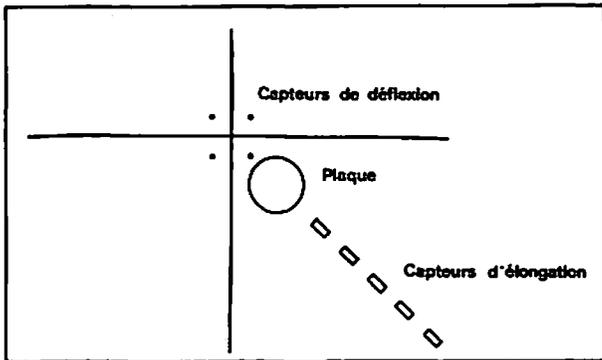


Figure 20. — Dispositif de mesures sur chaussée rigide.

Un préchargement comprenant un ou deux cycles à 5 tonnes est tout d'abord réalisé pour que se mettent bien en place les capteurs d'élongation. Ceux-ci sont alors mis à zéro. Les séries de cycles de chargements à des charges croissantes par pas de 5 tonnes sont ensuite réalisés à partir d'une valeur initiale choisie nettement en dessous de la charge de service supposée de la chaussée. Chaque charge fait l'objet d'un nombre de cycles suffisant pour stabiliser la valeur de l'élongation sous les jauges. Cinq cycles suffisent habituellement. L'essai est normalement arrêté lorsque l'élongation maximale de la surface du béton atteint $150 \cdot 10^{-6}$, de façon à éviter toute rupture de dalle.

— Exploitation des mesures

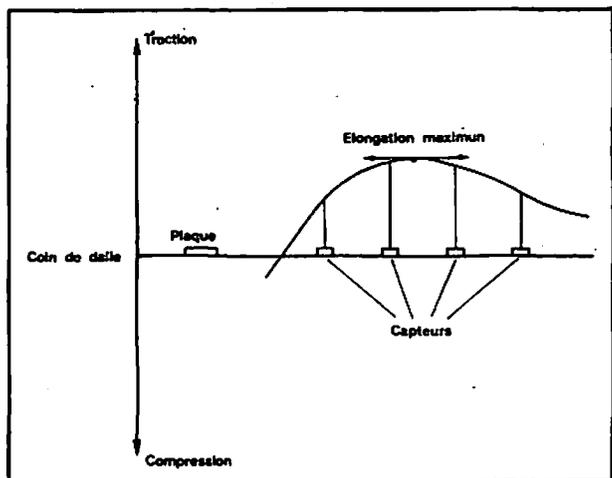
• Etude de la contrainte maximale du béton

Les capteurs fournissent l'élongation pour différentes distances du coin chargé. Une fonction d'ajustement permet de déterminer la valeur de l'élongation maximale correspondant à la charge d'essai (cf. figure 21).

Il est donc possible d'étudier l'évolution de cette élongation maximum en fonction de la charge.

La charge admissible pour le point considéré ou charge de service est la valeur correspondant à l'élongation maximale admissible. Cette dernière est déduite des caractéristiques du béton (module d'élasticité et contrainte admissible de traction par flexion).

Figure 21. — Mesure de la contrainte maximale sur une dalle de béton. ►



• Etude des transferts de charge

Les capteurs de déflexion disposés en coin permettent d'apprécier les conditions de transferts de charge et d'appui des dalles.

L'indice de transfert de la dalle pour le coin chargé est égal au rapport entre la déflexion mesurée sur ce dernier et la somme des quatre déflexions mesurées. Il varie entre 1 (absence de transfert de charge) et 0,25 (parfait transfert de charge).

6.2.2. MATERIEL

Les essais de plaque non destructifs doivent être réalisés avec un matériel adapté et performant.

Pratiquement, il pourra être fait appel au Service Technique des Bases Aériennes qui dispose de deux types de matériels :

- un équipement largement automatisé (« remorque de portance ») qui permet d'effectuer les essais dans des conditions opératoires optimales, notamment grâce à sa rapidité de mise en œuvre, à la précision et la fidélité des mesures ainsi qu'à la facilité du traitement des résultats, mais qui est relativement lourd et difficile à transporter autrement que par la route,
- un matériel facilement transportable, notamment par avion, qui est complété par des équipements lourds trouvés sur place et qui permet exactement les mêmes essais, avec toutefois une moins grande commodité en raison d'une automatisation moins poussée.

6.3. CAMPAGNE D'AUSCULTATION DES CHAUSSEES AERONAUTIQUES

Ce paragraphe complète les indications du paragraphe 9.4.4. de la première partie.

6.3.1. CARACTERISATION DES ZONES HOMOGENES

La charge admissible P_0 retenue pour caractériser une zone homogène correspond à la moyenne des charges mesurées en chaque point d'essai, diminuée d'un écart-type.

6.3.2. INTERPRETATION ET SYNTHESE DES RESULTATS

CHAUSSEES SOUPLES ET SEMI-RIGIDES

La charge admissible roue simple est fournie par les essais de chargements de plaque pour chaque zone homogène. Celle-ci est également caractérisée par une épaisseur équivalente totale de chaussée et un CBR issus des mesures in-situ ou en laboratoire. Il est donc possible d'en déduire une charge admissible roue simple d'après l'abaque correspondant. Ce n'est que dans le cas où cette valeur est identique ou proche de la première citée qu'il peut être considéré que les paramètres sont bien calés.

Dès que cette condition est remplie, il est possible de déduire des abaques de dimensionnement, la charge admissible pour tout type d'atterrisseur.

CHAUSSEES RIGIDES

Pour les chaussées rigides, il faut tout d'abord déterminer la valeur de la contrainte de rupture en traction par flexion σ_r , et le module d'élasticité E du béton. L'idéal est de disposer des résultats d'essais de rupture en traction par flexion réalisés en laboratoire sur un nombre important d'éprouvettes prismatiques sciées dans les dalles. En l'absence de ces données, les valeurs à retenir sont estimées à partir des documents d'archives. Une fois déterminés ces paramètres, l'élongation admissible ϵ_a du béton pour les essais de plaque est déduite par la relation :

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_r}{1,8 E} \quad (24)$$

Les résultats des essais de chargements de plaque en coin de dalle fournissent la charge admissible P_c « en coin de dalle » de la zone considérée, l'épaisseur de la dalle de béton et le module K du sol support.

Par contre, bien qu'il soit possible d'apprécier la qualité des transferts de charge, il est parfois difficile d'évaluer avec netteté le coefficient de sécurité CS à prendre en compte. La difficulté est résolue de la manière suivante :

a) La charge admissible P_m pour la roue simple isolée « en milieu de dalle » est calculée par la méthode inverse de dimensionnement en supposant que les transferts de charge sont efficaces. Pour ce faire, l'abaque roue simple est utilisé en retenant pour contrainte admissible la contrainte de rupture σ_r , divisée par le coefficient de sécurité de 1,8.

b) Si P_c est supérieur à P_m (cas peu fréquent), il est admis que le cas de chargement le plus contraignant pour la dalle est celui en milieu de dalle. La contrainte admissible retenue pour caractériser le béton est alors :

$$\sigma = \frac{\sigma_r}{1,8} \quad (25)$$

c) Si P_c est égal à P_m , les deux cas de chargement sont équivalents et la chaussée est caractérisée comme en b).

d) Si P_c est inférieur à P_m , il est admis que le cas de chargement en coin de dalle est plus contraignant que le cas en milieu de dalle. Il faut alors rechercher le coefficient de sécurité CS à utiliser pour retrouver au moyen des abaques la charge admissible P_c . La chaussée est alors caractérisée par la contrainte admissible du béton suivante :

$$\sigma = \frac{\sigma_r}{CS} \left(\approx \frac{\sigma_r}{1,8} \cdot \frac{P_c}{P_m} \right) \quad (26)$$

6.4. ESSAIS COMPLEMENTAIRES A L'EVALUATION DE LA PORTANCE

Comme il a été indiqué au § 9.1. de la partie I, les caractéristiques fonctionnelles et structurelles ne sont pas indépendantes.

Un rapport d'évaluation de la portance doit comporter à cet effet des éléments complémentaires portant sur la qualité du drainage, de l'uni, de la glissance, etc., des chaussées.

Ces éléments sont appréciés si nécessaires avec des moyens d'auscultation adéquats (stradographe pour la glissance, analyseur de profil en long pour l'uni, etc.).

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

1. Recommandations pour le dimensionnement des chaussées d'autoroute et des chaussées à trafic lourd. Supplément au numéro spécial B du Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers - 05.06.64.
2. Recommandations pour la réalisation des assises de chaussées en grave non traitées - SETRA/LCPC - Mai 1974.
3. Directive pour la réalisation des assises de chaussées en graves-bitume et sables-bitumes - SETRA/LCPC - Septembre 1972.
4. Directive pour la réalisation des assises de chaussées en graves-émulsion - SETRA/LCPC - Décembre 1974.
5. Directive pour la réalisation des assises de chaussées en graves-laitier et sables-laitier - SETRA/LCPC - 1973.
6. Directive pour la réalisation des assises de chaussées en grave-ciment (1969) et son complément (1975).
7. Directive pour la réalisation des assises de chaussées en graves-cendres volantes-chaux (1978).
8. Norme NF P 18-407 (juin 1970). Essai de traction par flexion.
9. Directive pour la réalisation des chaussées en béton de ciment - Ministère des Transports SETRA/LCPC (1978).
10. Catalogue 1977 des structures types de chaussées neuves - Notice d'utilisation.
11. L'essai AASHO. Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers - Numéro spécial E - Mai 1966.
12. W.K. BOYD - C.R. FOSTER - Design curves for very heavy multiple wheel assemblies - ASCEE Journal - Vol. 115 - 1950 - p. 534-546.
13. G. PICKETT - G.K. RAY - Influence charts for concrete pavements - Proceedings, American Society of Civil Engineers - Vol. 76 - Avril 1950 - n° 12 (traduction STBA n° 835).
14. R.G. PACKARD - Design of concrete airport pavement - (EB050.03P) - Engineers bulletin - PCA (1973).
15. R.G. PACKARD - Computer program of airport design - Special report - (SR029.02P) - PCA 1967.
16. Gel et dégel des chaussées - Note d'information technique - LCPC - janvier 1975.
17. Recommandation pour l'emploi des géotextiles dans les voies de circulation provisoire, les voies à faible trafic et les couches de forme. Comité français des géotextiles - 1981.

