

Aérodromes

Construction

par **Ivy MOUCHEL**
Chargé d'études Caractéristiques de surface

et **Jérôme PETITJEAN**
Chargé d'études Dimensionnement des chaussées
Service technique des bases aériennes (STBA)
Direction générale de l'aviation civile (DGAC)

1. Caractéristiques géométriques des aires de mouvement	C 4 453 - 2
1.1 Profil en long de l'axe de la piste	— 2
1.2 Profil en travers de la piste	— 2
1.3 Profil en long et en travers des bandes de piste.....	— 2
1.4 Profil en long et en travers des voies de circulation.....	— 3
1.5 Profil en long et en travers des aires de stationnement.....	— 4
2. Terrassements	— 4
3. Drainage	— 4
3.1 Drainage des eaux de ruissellement.....	— 4
3.2 Drainage des eaux souterraines.....	— 4
4. Chaussées aéronautiques	— 4
4.1 Particularités des chaussées aéronautiques.....	— 4
4.2 Types de chaussées	— 5
4.3 Dimensionnement des chaussées.....	— 6
4.4 Évaluation et auscultation des chaussées	— 9
4.5 Gestion des chaussées – Méthode ACN/PCN.....	— 12
4.6 Renforcement des chaussées	— 13
Pour en savoir plus	[Doc. C 4 454]

La majorité des problèmes posés par l'étude et la construction des aires de mouvement ne sont pas propres aux aérodromes : ils se posent de façon assez voisine lors de l'étude et de la réalisation de routes et autoroutes. Ainsi, les textes généraux applicables aux travaux publics, et notamment les Cahiers des clauses techniques générales (cf. [Doc. C 4 454]), s'appliquent également aux travaux sur aérodromes, sous réserve des différences qui seront indiquées.

Le présent article ne prétend pas, par conséquent, décrire l'ensemble des méthodes d'étude et des procédés de construction utilisés pour la conception des aérodromes, mais vise plutôt à faire ressortir les éléments qui leur sont particuliers.

Cet article clôt une série consacrée aux aérodromes :

- *Aérodromes. Description et classification* [C 4 450] ;
- *Aérodromes. Conception* [C 4 451] ;
- *Aérodromes. Prise en compte des données locales* [C 4 452] ;
- *Aérodromes. Construction* [C 4 453] ;
- *Aérodromes. Pour en savoir plus* [Doc. C 4 454].

Le lecteur se reportera utilement à l'article *Projet et construction de routes* [C 5 500] et [C 5 501] dans ce traité.

1. Caractéristiques géométriques des aires de mouvement

Les caractéristiques des aires de mouvement sont variables en fonction de la classification présentée dans l'article *Aérodromes. Description et classification* [C 4 450].

1.1 Profil en long de l'axe de la piste

■ Le profil en long d'une piste doit être aussi plat et horizontal que possible ; les pentes moyennes (calculées en divisant la différence d'altitude entre le point le plus haut et le point le plus bas de la piste, par sa longueur) sont ainsi très inférieures aux valeurs courantes du domaine routier (inférieures à 2 % ; cf. tableau 1 de l'article [C 4 451]). Des spécifications de profil en long en tout point sont également imposées.

De plus, pour permettre l'exécution des approches de précision de catégories II et III, aucune portion des 900 premiers mètres de la piste du côté de l'approche aux instruments ne doit présenter de pente longitudinale supérieure à 0,8 % en valeur absolue. Il est, de plus, recommandé que le profil en long de ces 900 premiers mètres de la piste soit sensiblement horizontal. Cette même restriction est applicable aux pistes équipées pour les approches de précision de catégorie I et utilisables pour les entraînements aux atterrissages automatiques.

En outre, sur le premier et le dernier quarts de la longueur de la piste, la pente longitudinale ne doit pas dépasser 0,8 % dans les cas suivants :

- lorsque le chiffre de code est 3 et avec une approche de précision de catégorie II ou III ;
- lorsque le chiffre de code est 4.

Pour des raisons de sécurité, il convient de limiter les changements de pentes et de retenir des rayons de courbure importants.

■ Lorsque les changements de pente sont inévitables, la **distance de visibilité** doit être préservée afin que tout point situé à x m au-dessus d'une piste (x variant suivant la lettre de code de l'aérodrome ; cf. [C 4 451] tableau 1) soit visible de tout autre point situé également à x m au-dessus de la piste jusqu'à une distance au moins égale à la moitié de la longueur de la piste.

■ Enfin, pour permettre une bonne qualité de réception des signaux émis par le localiser, le profil en long doit assurer la **visibilité radio-électrique** directe sur toute la largeur de la piste entre :

- d'une part, les points d'une droite horizontale perpendiculaire à la piste, passant par le point situé sur l'axe de piste à 1 mètre au-dessus de la base du réseau aérien du localiser ;
- d'autre part, les points des droites horizontales perpendiculaires à l'axe de piste, passant par tous les points de la trajectoire de l'aéronef où doit être assuré le guidage ILS (*Instrument landing system* – cf. § 5.2.1 [C 4 451]) jusqu'aux points de la droite horizontale située à la verticale du seuil opposé à :

- 15 m en catégories I et II d'approche de précision,
- 6 m en catégorie III.

1.2 Profil en travers de la piste

■ Les **profils en travers** des pistes sont de préférence composés de deux versants plans symétriques formant un toit afin de limiter la longueur d'écoulement des eaux de pluie sur la piste.

On peut toutefois admettre des profils en travers à deux pentes dissymétriques dans le cas d'un élargissement de la piste si le fait d'effectuer celui-ci d'un seul côté conduit à une diminution sensible du volume des travaux.

On peut également admettre des profils en travers à un versant plan unique, notamment en cas de vent traversier fréquent où un tel profil, descendant dans le sens de ce vent traversier, facilite l'écoulement des eaux de pluie.

■ La **détermination des pentes**, à donner aux versants plans, résulte d'un compromis entre deux exigences contradictoires. Si en effet une piste doit être aussi plate que possible afin de faciliter la circulation des avions et diminuer la fatigue de leurs trains d'atterrissage, elle doit par contre présenter des pentes suffisantes pour assurer l'évacuation des eaux de pluie, dans le double but d'éviter les phénomènes de glissance et d'hydroplanage, et de limiter la percolation d'eau dans le corps de piste.

Les valeurs maximales de pente transversale retenues pour les pistes revêtues sont :

Code lettre					
A	B	C	D	E	F
2 %	2 %	1,5 %	1,5 %	1,5 %	1,5 %

Les pistes non revêtues ne permettent pas un écoulement aussi rapide des eaux de pluie. Leurs pentes transversales doivent donc être plus importantes que celles des pistes revêtues. Elles sont comprises entre 2,5 % et 3 %.

■ Recommandations particulières

● Il convient qu'en tout point d'une piste la pente transversale soit au moins égale – et même de préférence supérieure – à la pente longitudinale. C'est ainsi que, dans les cas où le profil en long des pistes de code A, B ou C présente des pentes supérieures à 1,5 %, on est conduit à adopter des pentes transversales pouvant atteindre 2 %.

● Lors du renforcement d'une piste présentant un profil en toit symétrique, on peut admettre des pentes transversales allant jusqu'à 2,5 % en dehors d'une bande centrale d'une largeur au moins égale aux deux tiers de celle de la piste, si ce choix permet d'éviter la reprise des accotements et du balisage latéral éventuel.

● Le profil en travers est en principe le même sur toute la longueur de la piste. Lorsqu'il ne peut en être ainsi, il convient de s'assurer que tout profil en long de la piste satisfait aux dispositions énoncées pour le profil en long de l'axe.

1.3 Profil en long et en travers des bandes de piste

Le lecteur se reportera également au tableau 3 de l'article [C 4 451].

Les profils en long et en travers des bandes de piste doivent répondre à des conditions plus exigeantes dans la partie aménagée que dans la partie simplement dégagée.

■ **Hors partie aménagée**, la pente longitudinale ne devra pas dépasser :

- 1,5 % lorsque le chiffre de code est 4 ;
- 1,75 % lorsque le chiffre de code est 3 ;
- 2 % lorsque le chiffre de code est 1 ou 2 (valeur également recommandée pour les pistes non revêtues).

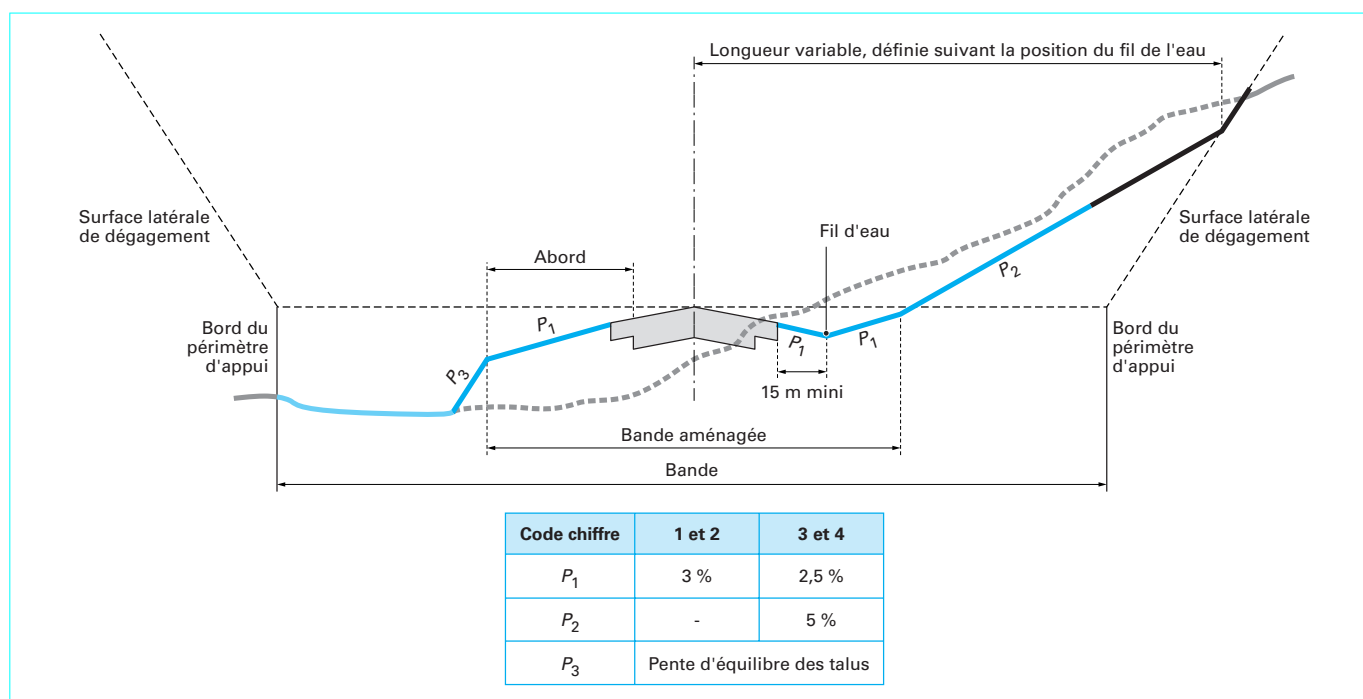


Figure 1 – Pentas transversales des bandes de piste

■ **Sur la bande aménagée**, les pentes transversales doivent être suffisantes pour empêcher toute accumulation d'eau à la surface sans pour autant dépasser les valeurs de :

- 2,5 % lorsque le chiffre de code est 3 ou 4 ;
- 3 % lorsque le chiffre de code est 1 ou 2.

La figure 1 définit les pentes transversales ne devant pas être dépassées sur la bande.

1.4 Profil en long et en travers des voies de circulation

■ La **pente longitudinale** d'une voie de relation n'excédera pas les valeurs suivantes :

- 3 % pour les lettres de code A et B ;
- 1,5 % pour les lettres de code C, D, E et F.

Nota : pour les gros porteurs, une pente de l'ordre de 1 % est recommandée, pour les lettres de code D, E et F compte tenu en particulier de la masse des avions à pleine charge. Dans le cas où, pour des questions financières ou techniques, il n'est pas envisageable de descendre en deçà de 1,5 %, le projeteur devra s'attacher autant que faire se peut à ne pas appliquer cette pente sur des distances trop longues.

Tout changement de pente longitudinale doit s'effectuer de manière à ce que le passage d'une pente à une autre soit réalisé par des surfaces courbes dont la pente ne variera pas de plus de :

- 1 % par 25 m (rayon de courbure minimal de 2 500 m) pour les lettres de code A et B ;
- 1 % par 30 m (rayon de courbure minimal de 3 000 m) pour les lettres de code C, D, E et F.

Lorsqu'un changement de pente sur une voie de relation est inévitable, la distance de visibilité doit être préservée de manière telle que :

- de tout point situé à une hauteur de 1,5 m au-dessus de la voie de relation, il soit possible de voir toute la surface de cette même

voie sur une distance d'au moins 150 m lorsque la lettre de code est A ;

- de tout point situé à une hauteur de 2 m au-dessus de la voie de relation, il soit possible de voir toute la surface de cette même voie sur une distance d'au moins 200 m lorsque la lettre de code est B ;

- de tout point situé à une hauteur de 3 m au-dessus de la voie de relation, il soit possible de voir toute la surface de cette même voie sur une distance d'au moins 300 m, lorsque la lettre de code est C, D, E ou F.

■ De même que pour les pistes, les **profils en travers** des voies de relation sont de préférence composés de deux versants plans symétriques formant un toit. On peut toutefois, pour eux aussi, admettre des profils en travers à pente unique, ou encore à deux versants dissymétriques, si ces solutions conduisent à une diminution sensible du volume des travaux.

Les pentes transversales d'une voie de relation doivent être suffisantes pour éviter l'accumulation des eaux sur la chaussée.

- Pour les voies de relation **revêtues**, les valeurs maximales à prendre en compte sont celles données par le tableau 1.

Tableau 1 – Valeurs maximales des pentes transversales des voies de relation revêtues

Pente maximale	Code lettre					
	A	B	C	D	E	F
	2 %	2 %	1,5 %s	1,5 %	1,5 %	1,5 %

- Pour les voies de relation **non revêtues** de code A, les pentes transversales doivent être comprises entre 2,5 % et 3 %. La vitesse des aéronefs étant relativement faible, elles ne nécessitent pas

d'aménagement de dévers dans les courbes. Toutefois, en cas de passage d'un profil symétrique à deux versants à un profil à pente unique en section courante, la variation de la pente transversale doit s'effectuer sur une distance suffisante permettant de respecter la règle de changement de pente.

1.5 Profil en long et en travers des aires de stationnement

Le choix de la valeur à donner à la pente d'une aire de stationnement résulte d'un compromis entre la nécessité de se rapprocher au maximum de l'horizontale, pour faciliter le mouvement des avions et des véhicules d'assistance ou de maintenance au sol, et l'obligation de favoriser l'écoulement rapide des eaux de ruissellement.

Ainsi, la pente du poste de stationnement ne doit être supérieure à 1 % dans aucune des directions ; une valeur de 0,5 % dans toute direction correspondant à la direction transversale des avions est recommandée.

De plus, il est recommandé de prévoir une pente descendante dans le sens de départ de l'avion. En effet, lors de la mise en mouvement, la puissance des moteurs (ou du tracteur en manœuvre de poussée) doit être plus élevée que pendant le roulage normal en raison de l'inertie à vaincre. Une pente descendante facilite donc le mouvement de démarrage.

Enfin, dans la mesure du possible, il faut éviter de diriger la pente vers le front des installations pour éviter le risque d'accumulation d'eau devant les bâtiments en cas de dysfonctionnement du réseau de drainage.

2. Terrassements

Mis à part quelques aspects spécifiques (dimensions de la zone à terrasser, épaisseur de la chaussée et engazonnement), les terrassements d'aérodromes présentent les mêmes caractéristiques que ceux des routes ; ils ne seront donc pas développés dans cet article (cf. articles [C 5 500] et [C 5 501]).

3. Drainage

Le lecteur consultera l'article *Terrassement – Projet* [C 5 355] dans ce traité.

D'une manière générale, on peut distinguer deux types de drainage :

- le drainage des eaux de ruissellement ;
- le drainage des eaux souterraines.

3.1 Drainage des eaux de ruissellement

Chaque zone homogène d'une plate-forme aéroportuaire bénéficie d'un traitement particulier. On en distingue quatre au total :

- la **zone vie** (aérogares, parkings, voitures, voiries d'accès...) ; elle ne possède pas de spécificité aéronautique et son système d'assainissement se conçoit comme celui d'une zone urbaine ;
- les **aires d'activités industrielles** où sont installés les équipements nécessaires à la maintenance lourde des avions et aux activi-

tés liées au fret. Ces équipements sont bien souvent des installations classées et doivent respecter la réglementation qui leur est appliquée ;

- les **aires de manœuvre** comprenant pistes et voies de circulation ;
- les **aires de stationnement** sur lesquelles s'effectuent les opérations de chargement et déchargement, de maintenance légère, d'avitaillement et de dégivrage des avions.

En ce qui concerne les deux derniers cas, pour un dimensionnement de réseau de drainage, la méthode rationnelle est le plus souvent utilisée et c'est l'événement pluvial de période de retour égale à 10 ans qui est retenu. Le réseau de drainage remplit alors plusieurs fonctions :

- évacuer rapidement les eaux de ruissellement de la surface des aires de manœuvre afin de réduire les risques d'aquaplanage et de dérapage des avions ;
- protéger le corps de chaussée contre les infiltrations d'eaux ;
- éviter les ravinements et stagnation d'eaux sur les bandes aménagées et les plates-formes autour des aides radioélectriques ;
- éviter les rejets directs dans le milieu naturel, non conformes aux dispositions de la loi sur l'eau.

Pour les pistes et voies de circulation, lorsque cela est possible, il convient d'avoir recours à l'infiltration en place, tout en s'assurant que les corps de chaussée ne seront pas contaminés.

Pour les aires de stationnement, compte tenu de la pollution chronique (produits de dégivrage...) et du risque de pollution accidentelle (kérosène...), il convient de recueillir l'intégralité des eaux de ruissellement sur les surfaces revêtues et de les traiter par l'intermédiaire de bassins de rétention et de déshuileurs, avant un rejet à débit contrôlé vers le milieu naturel.

3.2 Drainage des eaux souterraines

Les eaux souterraines comprennent d'une part, les eaux de nappe phréatique et d'autre part, les eaux d'infiltration.

Si ce type de drainage est nécessaire, il convient de vérifier ses conséquences sur les circulations d'eaux souterraines.

En général, les ouvrages consistent en des tranchées drainantes situées en bordure de chaussées revêtues, au niveau du fond de forme. Ces tranchées ont trois objectifs :

- récupérer les eaux d'infiltration ayant traversé la chaussée, évitant ainsi leur stagnation dans la couche de forme ;
- empêcher les eaux d'infiltration au niveau de la bande de contaminer le corps de chaussée ;
- empêcher la remontée des eaux de la nappe phréatique dans le corps de chaussée.

Le drainage des eaux souterraines est souvent un problème délicat à traiter. Il est conseillé de faire appel à des laboratoires spécialisés pour la conception et le dimensionnement de celui-ci.

Pour de plus amples renseignements réglementaires et techniques, il sera utile de se référer au guide *Eau et aéroport* [1].

4. Chaussées aéronautiques

4.1 Particularités des chaussées aéronautiques

Les chaussées aéronautiques doivent présenter des qualités d'usage identiques à celles des chaussées routières mais elles sup-

portent des sollicitations très variables tant en intensité qu'en nombre (selon les zones de circulation et de manœuvre, et selon l'importance des aérodromes).

En effet, les caractéristiques essentielles qui différencient ces chaussées et leurs couches de surface sont répertoriées dans le tableau 2.

Cette différence de conception se traduit principalement par un choix différent des caractéristiques des constituants et de formulation, ainsi que par une adaptation des modalités de mise en œuvre et de contrôle.

4.2 Types de chaussées

On distingue principalement deux types de chaussées : les chaussées souples et les chaussées rigides. Par le jeu des renforcements successifs, plusieurs cas complexes pourront se présenter (couches bitumineuses sur dalle en béton, structures inverses, superposition de dalle de béton), mais dans le cadre de cet article ne seront présentées que les deux grands types de chaussée.

4.2.1 Chaussée souple

La chaussée souple se caractérise par le fait que toutes les couches qui la composent ne présentent pas une très grande résistance

à la flexion. La diffusion sur le fond de forme des efforts générés par l'atterrissage de l'avion est essentiellement assurée par l'épaisseur du corps de chaussées (figure 2).

■ La **couche de roulement** est constituée de béton bitumineux aéronautique (NFP 98 31 [2]) de granulométrie 0/10 ou 0/14, continu ou discontinu. La qualité première recherchée pour la couche de surface est l'imperméabilisation optimale de la chaussée, qui est obtenue par une très forte compacité du matériau (entre 3 % et 6 % de teneur en vide), à partir d'une formulation riche en bitume pur (teneur en liant : généralement entre 6 % et 6,5 %) choisie de préférence en classe 50/70 (pour les sollicitations moyennes) ou 35/50 (pour les fortes sollicitations).

Nota : les classes de bitume sont définies selon la norme NF EN 12591. Cette classification est établie selon la pénétrabilité nominale à 25 °C d'une aiguille normalisée (méthode NF EN 1426). Ainsi, un bitume de classe 50/70 signifie que sa pénétrabilité à 25 °C est comprise entre 5 mm et 7 mm.

Sur les aires de stationnement ou autres aires fortement sollicitées, il faudra s'assurer de l'obtention de très bonnes performances mécaniques du matériau, en particulier d'une bonne résistance au fluage sous sollicitation tangentielle. Enfin, sur les postes de stationnement, il faudra prévoir une protection anti-kérosène de la surface de la chaussée.

■ Afin de bien assurer le transfert de contraintes entre couches superposées, les **interfaces** doivent être collées par des matériaux hydrocarbonés.

Tableau 2 – Caractéristiques différenciant les chaussées routières et aéronautiques	
Chaussées routières (cf. articles [C 5 500] [C 5 501])	Chaussées aéronautiques
<ul style="list-style-type: none"> • très grande canalisation des charges génératrice du phénomène d'orniérage, • très grande circulation de charges (jusqu'à 50 000 mouvements par jour ; dimensionnement pour un trafic de 10⁶ à 10⁷ mouvements sur 10 ans) relativement peu élevées (42 t en masse totale et 6,5 t maxi par roue), qui engendre une fatigue principalement due à la répétition importante des charges entraînant de faibles déformations, • pressions de gonflage de 7 à 8 bars avec des pressions de contact inférieures à ces valeurs, • vitesse de référence maximale de 130 km/h. • sollicitations particulières de la part des véhicules, qui nécessitent une bonne adhérence des pneumatiques sur la chaussée afin d'assurer la meilleure tenue de route possible et des conditions d'arrêt satisfaisantes, • uni de la surface lié au confort de l'utilisateur, • rugosité évoluant essentiellement par le polissage des granulats au cours du temps. 	<ul style="list-style-type: none"> • dispersion du trafic sur la bande axiale de la piste (occupation du tiers central de la piste), • dispersion latérale importante, • très faible circulation (de quelques mouvements à plus de 1 000 mouvements par jour ; dimensionnement pour un trafic de 10⁴ sur 10 ans) de charges diverses (jusqu'à 400 t voire plus en masse totale, et 38 t pour un jumelage et 80 t pour un boggie), qui induit une fatigue due à une répétition restreinte de charges engendrant de grandes déformations, • pressions de gonflage jusqu'à 15 bars et des pressions de contact encore plus élevées (jusqu'à 20 bars), • vitesses variables : <ul style="list-style-type: none"> — très faible, générant alors des phénomènes de poinçonnement (poste de stationnement, vitesse nulle) ou de cisaillement important sur la couche superficielle (virage sur les raquettes ou aires de stationnement), — très élevées (atteignant de plus de 300 km/h), au décollage et à l'atterrissage notamment, générant dans ce dernier cas des contraintes tangentielles très importantes lors de la mise en rotation des roues, • conditions géométriques et d'environnement qui soumettent pendant une durée prolongée les enrobés à l'action des eaux de ruissellement, de l'ensoleillement... • uni de la surface lié à la sécurité des aéronefs lors du roulage à grande vitesse, • rugosité beaucoup plus évolutive due au dépôt de gomme (l'OACI recommande une macrotexture voisine de 1 mm pour les chaussées neuves), • trafic dont les contraintes d'exploitation et de sécurité ne permettent généralement pas son interruption ni même son aménagement sans de grandes difficultés, en vue d'entretenir ou de rénover les couches de roulement.

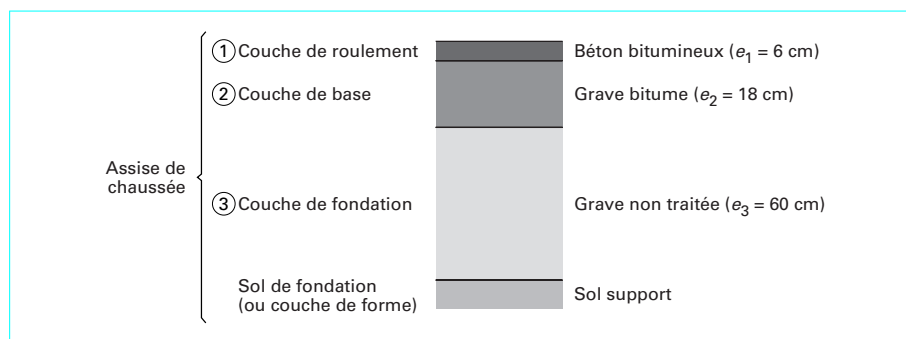


Figure 2 – Couches composant une chaussée souple. Les épaisseurs des couches sont données pour un Airbus A 330-300 à charge maximale (trafic : 10 mouvements par jour) sur un sol support de CBR 6

■ Il est de plus fortement conseillé de choisir des matériaux hydrocarbonés pour la **couche de base** et la **couche de liaison** ; en effet, l'expérience des couches de base traitées en grave ciment ou grave laitier (chaussées semi-rigides) est décevante dans le domaine des chaussées d'aérodromes (remontées de fissures qui, compte tenu du trafic et des conditions d'exploitation, ne se referment pas, d'où des pénétrations d'eau dans le corps de chaussée...). De même, dans le cadre de chaussées composites, ces problèmes de remontées de fissures sont fréquents ; il convient de se référer au guide *Techniques anti-remontées de fissures* [3] publié par le STBA.

Dans le cas des chaussées dites *légères* (destinées aux avions de moins de 5,7 t), la couche de base est choisie en matériaux non liés.

■ Les matériaux retenus pour la **couche de fondation** auront des caractéristiques identiques à celles recherchées lors d'une utilisation pour chaussée routière.

4.2.2 Chaussée rigide

C'est la couche de surface, en béton hydraulique et donc fortement rigide, qui constitue l'élément principal de la résistance de ce type de chaussée (figure 3). Elle joue à la fois le rôle de la couche de base et de la couche de surface d'une chaussée souple. Elle repose sur une ou plusieurs couches de fondation dont le rôle est moins de participer réellement à la portance de la piste que d'assurer à la dalle de béton un support régulier et continu qui lui permettra de travailler dans les meilleures conditions.

Afin d'éviter le phénomène de pompage, la couche de fondation est réalisée avec un matériau formulé pour ne pas être érodable (béton maigre ou association grave ciment et béton poreux).

Nota : le phénomène de pompage est une pathologie des chaussées en béton présentant des fondations érodables. Lors du passage d'une charge roulante sur un joint longitudinal, la mise en charge de la dalle aval est brutale (alors que celle de la dalle amont est progressive) ce qui a pour effet de chasser l'eau (incompressible) qui a pu s'infiltrer au niveau des joints, entraînant alors un déplacement des fines de la fondation. Il en découle une mise en escalier des dalles.

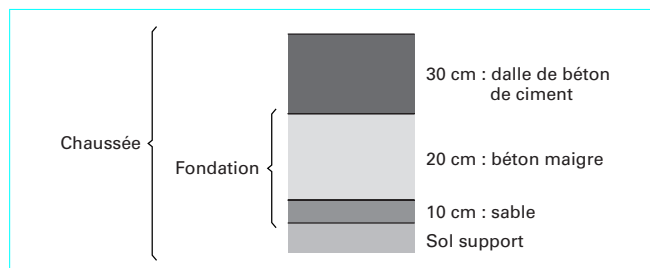


Figure 3 – Chaussée rigide. Les épaisseurs des couches sont données pour un Airbus A 330-300 à charge maximale (trafic : 10 mouvements par jour) sur un sol support de module $K = 100 \text{ MN/m}^3$

Les transferts de charge sont assurés par des joints longitudinaux de construction (de type rainure et languette ou, plus couramment aujourd'hui, de type sinusoïdal). Dans le cas de chaussées fortement sollicitées, il est conseillé de prévoir un système complémentaire de goudonnage des joints.

Les produits utilisés pour fermer les joints doivent dans tous les cas assurer une étanchéité parfaite, et pour cela bien adhérer aux parois des dalles, conserver leur souplesse au cours des années et résister aux attaques provoquées par les carburants (risque d'infiltration d'eau).

Concernant les dispositions constructives des chaussées en béton, il sera utile de se référer au *Guide technique des chaussées aéronautiques en béton hydraulique* [4] publié par le STBA.

4.2.3 Choix du type de chaussée

Le choix du type de chaussées résulte de considérations techniques et économiques.

■ La **chaussée en béton**, dont le renforcement est toujours difficile et coûteux, convient plutôt mieux aux aérodromes à fort trafic qui sont obligés d'avoir des pistes dimensionnées pour un trafic très important et qui disposent d'une deuxième piste permettant de délester la première durant les travaux de renforcement.

Ce type de revêtement convient également mieux sur les aires recevant de fortes contraintes de poinçonnement (postes de stationnement des avions gros porteurs) et sur certaines aires militaires sur lesquelles un revêtement hydrocarboné serait exposé au risque de brûlure sous l'effet du dégagement des gaz des réacteurs d'avions militaires (phase de postcombustion sur les seuils de piste ou roulage à faible vitesse).

■ La **chaussée souple** est plus économique, plus facile à renforcer et bien adaptée aux faibles trafics : elle peut être conçue relativement mince pendant les premières années de fonctionnement de l'aéroport, puis être renforcée au fur et à mesure de l'apparition d'avions plus lourds ou de l'augmentation du trafic.

4.3 Dimensionnement des chaussées

La méthodologie est présentée en détail dans le document de référence *Instruction sur le dimensionnement des chaussées d'aérodrome* [5].

Contrairement à la méthode suivie pour dimensionner les chaussées routières, il n'existe pas d'essieu de référence dans le domaine aéronautique.

L'atterrisseur principal de chaque avion (roue simple isolée, tandem ou boggie) est ramené à une roue simple équivalente par la méthode de Boyd et Foster.

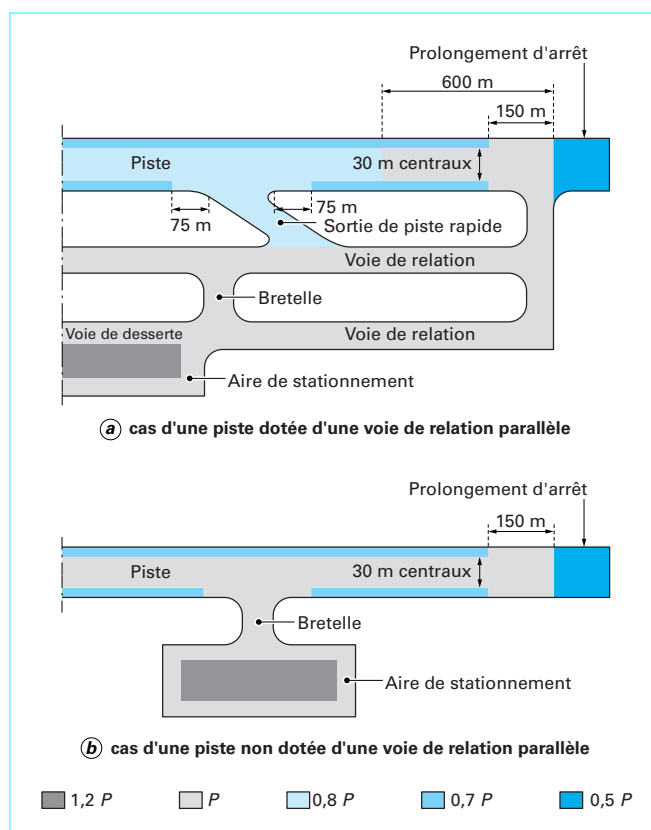


Figure 4 – Pondération des charges réelles selon la fonction des aires. Cas d'une piste non dotée d'une voie de relation parallèle

La charge de calcul (P) est déterminée pour chaque avion ; elle est fonction de la masse totale de l'avion, de la répartition des masses sur l'atterrisseur principal, ainsi que d'un coefficient de pondération dépendant des aires considérées (figure 4).

Le trafic de dimensionnement étant de 10 mouvements par jour, on ramène le trafic de dimensionnement (N mouvements par jour à la charge pondérée P) à un trafic équivalent (10 mouvements par jour à la charge équivalente P') par la formule :

$$P' = P \times (1,2 - 0,2 \cdot \lg(N))$$

4.3.1 Dimensionnement des chaussées souples

La durée de vie retenue pour une chaussée souple est de 10 ans. Le sol support est caractérisé par son indice CBR (California bearing ratio) déterminé au sens de la norme NF P 94-078 (cf. § 2.1.5.2 [C 5 500] et [Doc. C 4 454]).

L'épaisseur équivalente e de la chaussée est donnée par la formule suivante (établie par le US Corps of Engineers) :

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

avec P' charge équivalente à 10 mouvements par jour,
 q pression des pneumatiques.

L'épaisseur équivalente totale est définie comme la somme pondérée par un coefficient d'équivalence des épaisseurs réelles des différentes couches constituant la chaussée (tableau 3).

Tableau 3 – Coefficients d'équivalence c utilisés pour définir l'épaisseur équivalente

Matériaux neufs	Coefficient d'équivalence
Béton bitumineux à module élevé	2,5
Béton bitumineux aéronautique	2
Enrobé à module élevé	1,9
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	1
Sable	0,5

La formule de l'indice CBR peut se mettre aisément sous forme d'abaques présentés dans l'Instruction [5] (figure 5).

La méthode de dimensionnement des chaussées souples peut se mettre en œuvre en utilisant deux abaques :

- le premier donne l'épaisseur équivalente totale e ; les paramètres d'entrée sont la charge P' et l'indice CBR . L'abaque s'utilise comme indiqué figure 5 ;

- ensuite, il faut déterminer l'épaisseur équivalente minimale de matériaux traités à mettre en œuvre, à l'aide de l'abaque représenté figure 6 (les paramètres d'entrée sont l'épaisseur équivalente totale e précédemment déterminée et le CBR du sol support) :

Le choix final de la structure se fait en fixant les épaisseurs des différentes couches de matériaux, de façon à vérifier les conditions suivantes (cf. figure 2) :

$$\sum_i (e_i \cdot c_i) \geq e$$

$$e_1 \cdot c_1 + e_2 \cdot c_2 \geq e_{\text{matériaux traités}}$$

avec (e_1, c_1) couple épaisseur équivalente, coefficient d'équivalence pour la couche de roulement,

(e_2, c_2) couple épaisseur équivalente, coefficient d'équivalence pour la couche de base.

On note qu'il n'y a donc pas une réponse unique au dimensionnement, plusieurs couples (e_i, c_i) pouvant remplir les conditions.

L'épaisseur des différentes couches doit bien évidemment tenir compte des limitations constructives.

Enfin, le choix du type de matériaux est bien sûr fonction des contraintes locales.

4.3.2 Dimensionnement des chaussées rigides

La durée de vie retenue pour une chaussée rigide est de 20 ans. Le sol support est caractérisé par son module de réaction K . Pour le dimensionnement, la seule caractéristique du béton prise en compte est la contrainte admissible de traction par flexion σ_{bt} . Elle est égale à la résistance en traction par flexion à la rupture du béton mesurée à 90 jours et notée f_{t90} , divisée par un coefficient de sécurité CS :

$$\sigma_{bt} = \frac{f_{t90}}{CS}$$

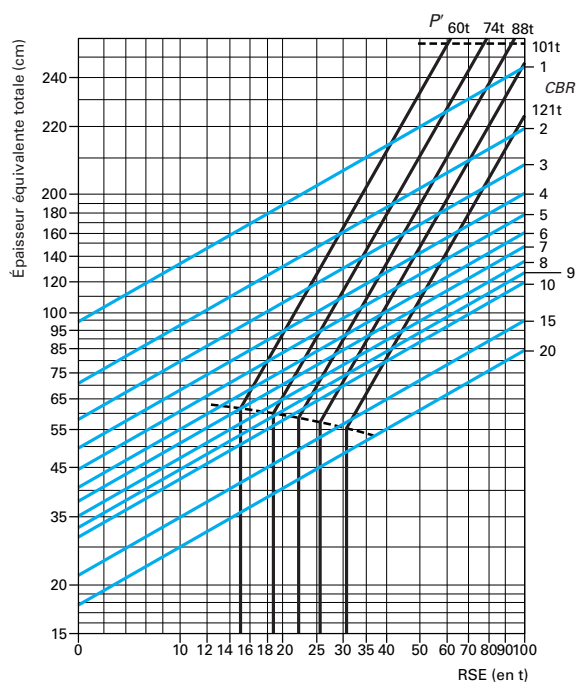
Ces paramètres représentent les caractéristiques de l'atterrisseur de l'avion considéré et sont utilisés pour construire l'abaque

AIRBUS A330-300

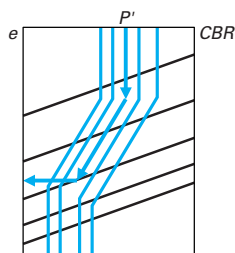
ATTERRISSEUR PRINCIPAL
BOOGIE

CHAUSSÉE SOUPLE

Pression = 1,31 MPa
Voie = 1,397 m
Empattement = 1,981 m
SD = 2,424 m

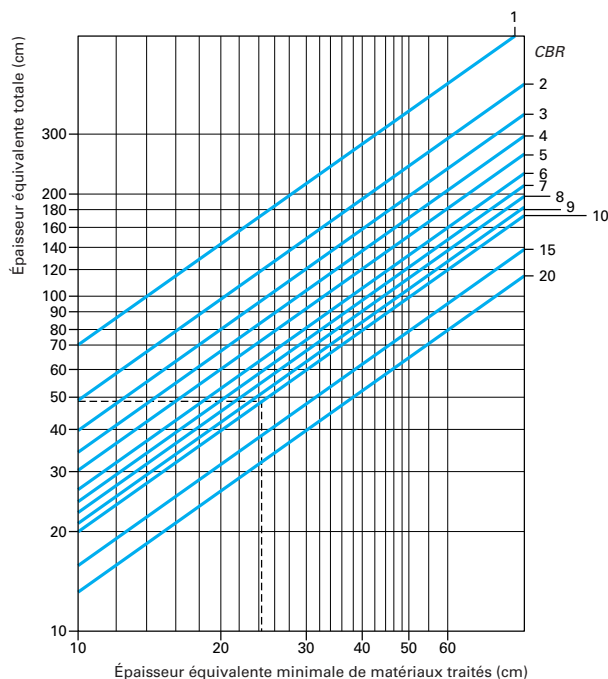


(a) exemple d'abaque

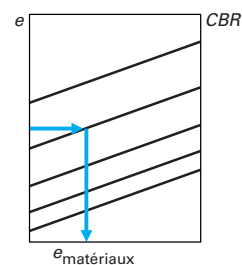


(b) utilisation de l'abaque

Figure 5 – Abaque permettant de déterminer l'épaisseur équivalente totale e d'une chaussée souple



(a) d'abaque



(b) utilisation de l'abaque

Figure 6 – Abaque permettant de déterminer l'épaisseur équivalente minimale des matériaux traités à mettre en œuvre pour une chaussée souple

Ce coefficient de sécurité CS est fonction du type de joints de construction et de dilatation de la chaussée :

- $CS = 1,8$ pour les joints munis de dispositifs de transfert de charge efficaces ;
- $CS = 2,4$ dans le cas contraire.

Une méthode dérivée de la méthode de Westergaard donne alors l'épaisseur de la dalle, en fonction de la charge de calcul P' , du module du sol support K et de σ_{bt} .

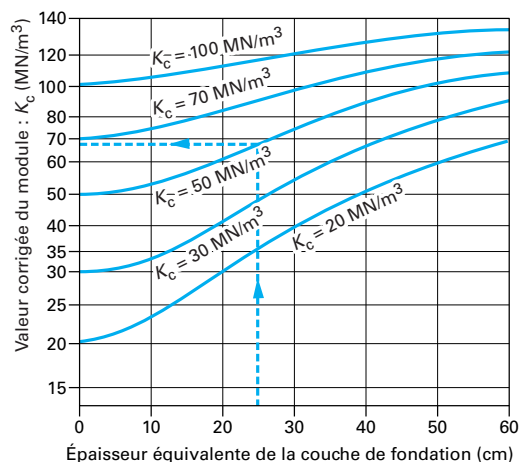


Figure 7 – Détermination du module corrigé K_c du sol pour une chaussée rigide

La méthode de dimensionnement de chaussée rigide peut également être mise en œuvre par l'utilisation de deux abaques :

- le premier est nécessaire pour corriger le module du sol support en fonction de l'épaisseur équivalente de la fondation ; on obtient ainsi le module corrigé K_c (figure 7) ;
- le second abaque permet d'obtenir directement l'épaisseur de la dalle de béton en fonction de la charge P' , du module corrigé K_c du sol support et de la contrainte admissible du béton σ_{bt} (figure 8).

Le second tome de l'*Instruction* [5] donne les abaques de dimensionnement (pour des chaussées souples et rigides) pour les avions les plus courants et développe quelques exemples de calculs. Dans les deux cas il convient de vérifier la tenue de la chaussée au gel (cf. articles [C 5 500] et [C 5 501]).

4.4 Évaluation et auscultation des chaussées

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

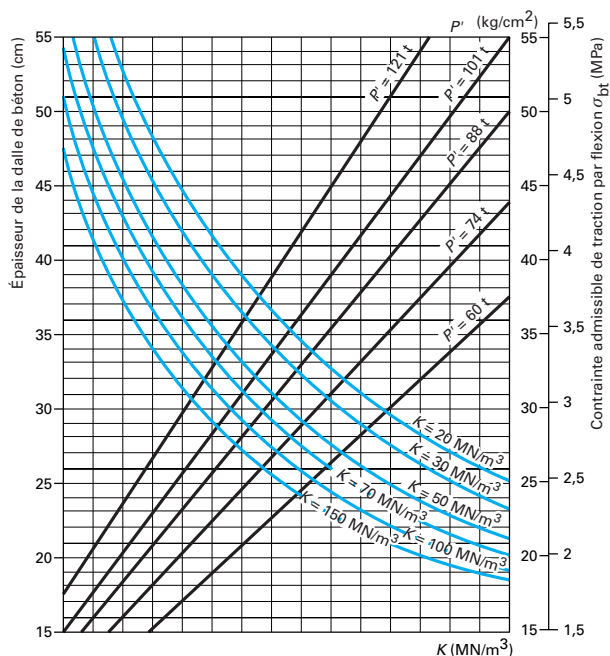
■ L'évaluation des **caractéristiques structurelles** concerne surtout la **portance** de la chaussée. Cette évaluation se déroule en deux temps :

- **inspection visuelle** de la chaussée (attribution d'un indice de service défini au paragraphe 4.4.1), à des intervalles réguliers, permettant d'apprécier rapidement et à faible coût d'éventuels problèmes d'intégrité de surface ou de structure. Cela permet de déclencher ou non des entretiens légers préventifs ou curatifs, et en cas de suspicion de problème structurel important (seuil d'alarme ou seuil critique) de déclencher une auscultation lourde ;
- **auscultation lourde** à l'aide de la remorque de portance du STBA. Cette auscultation a pour but d'évaluer la portance de la chaussée et de déterminer des paramètres structurels représentatifs

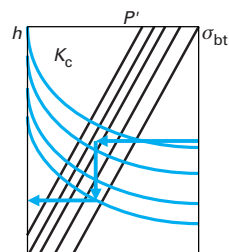
Ces paramètres représentent les caractéristiques de l'atterrisseur de l'avion considéré et sont utilisés pour construire l'abaque

AIRBUS A330-300
ATTERRISEUR PRINCIPAL
 BOOGIE
 CHAUSSEE RIGIDE

Pression = 1,31 MPa
 Voie = 1,397 m
 Empattement = 1,981 m
 SD = 2,424 m



(a) exemple d'abaque



(b) utilisation de l'abaque

Figure 8 – Détermination de l'épaisseur de la dalle de béton d'une chaussée rigide

de cette portance, directement utilisables pour des calculs d'admissibilité ou de renforcement.

On présentera au paragraphe 4.4.2 la seule méthode d'évaluation utilisée en France, réalisée par le STBA grâce à la remorque de portance.

■ Les **caractéristiques fonctionnelles** qui font l'objet d'une évaluation concernent l'état de surface de la chaussée et ses possibilités d'utilisation en toute sécurité par les avions. Ce sont :

- la qualité du profil en long et notamment l'uni de la surface 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 (épaufrures, désenrobages, etc.) dont les défauts peuvent causer des dégâts aux avions (ingestion de gravillons par les réacteurs, éclatement de pneus).

Les outils exposés ci-après permettent de réaliser cette évaluation.

4.4.1 Inspection visuelle des chaussées aéronautiques

L'indice de service (*IS*) est un indicateur numérique représentatif de l'état de la chaussée. Il peut prendre des valeurs comprises entre 0 (chaussée hors service) et 100 (chaussée neuve). Ainsi sa valeur croît-elle avec le niveau de service offert par la chaussée (tableau 4).

Tableau 4 – Indices et niveaux de service d'une chaussée aéronautique

Indice de service (IS)	Niveau de service
0 à 10	Hors service
10 à 25	Très mauvais
25 à 40	Mauvais
40 à 55	Passable
55 à 70	Moyen
70 à 85	Bon
85 à 100	Très bon

La procédure utilisée pour déterminer cet indice consiste à enregistrer, pour une zone de chaussée, les dégradations observées conformément aux recommandations du *Catalogue des dégradations* édité par le STBA [7].

Chaque zone se voit attribuer une note (figure 9) fonction des dégradations relevées, elles-mêmes caractérisées à l'aide du triplet d'informations suivant :

- le type de la dégradation (vingt-deux types retenus pour les chaussées souples, dix pour les chaussées rigides) ;
- le niveau de gravité : léger (L), moyen (M) ou élevé (E) ;
- la densité de dégradation dans la zone relevée, densité mesurée par une surface caractéristique de chaque type de dégradation.

La fréquence optimale des relevés est d'une fois par an pour l'ensemble des aires.

La connaissance de l'indice de service offre donc les possibilités de :

- déterminer des zones de comportement homogène et apprécier leurs niveaux de service respectifs (de très bon à hors service) ;
- analyser en détail les zones homogènes et repérer celles présentant des problèmes d'intégrité de surface ou de structure pouvant conduire à des travaux d'entretien ou à l'intervention de la remorque de portance.

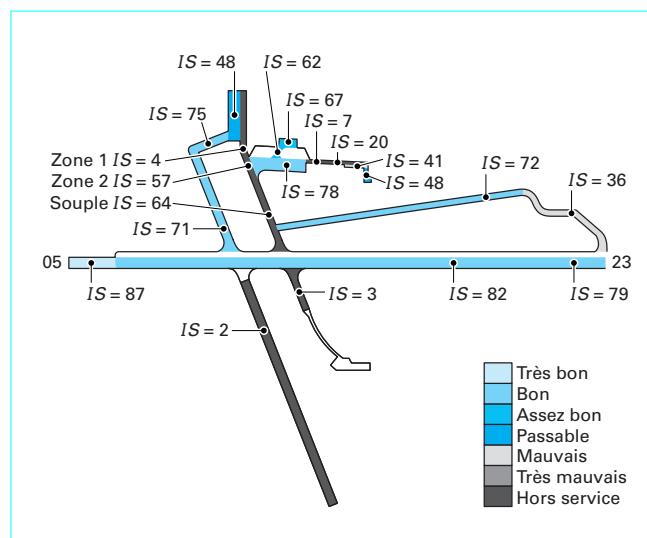


Figure 9 – Exemple de zonage de comportements homogènes des chaussées d'un aéroport

4.4.2 Évaluation de la portance des chaussées

Le but de cette évaluation [9] est d'attribuer à une chaussée existante des paramètres structuraux représentatifs de sa portance actuelle et directement utilisables dans les calculs de charge admissible et de renforcement.

La méthode consiste à établir une cohérence entre la charge de service fournie par les essais de chargement de plaque, et celle donnée par la méthode inverse de dimensionnement, c'est-à-dire :

- pour les **chaussées souples** (cf. § 4.3.1) : à partir de l'indice *CBR* du sol support (connu), déterminer l'épaisseur équivalente totale et les coefficients d'équivalence de chacune des couches ;
- pour les **chaussées rigides** (cf. § 4.3.2) : à partir du module de réaction corrigé K_c du sol support (connu) et de l'épaisseur de la dalle de béton (connue), déterminer la contrainte admissible de traction par flexion du béton σ_{bt} .

■ Objectif et principe de l'essai sur chaussée souple

L'essai de plaque sur une chaussée souple a pour but de caractériser le comportement en fatigue de la chaussée et du sol support en déterminant la charge qui, appliquée 10 000 fois à la surface de la chaussée, provoquerait un tassement limite estimé admissible.

La chaussée est soumise, à l'aide d'un vérin hydraulique et d'une plaque circulaire (figure 10), à des cycles de chargement et de déchargement sous des charges croissantes choisies de façon à encadrer la valeur supposée de la charge de service. De nombreuses expérimentations ont montré que la déformation résiduelle après déchargement croissait à peu près linéairement avec le logarithme du nombre d'applications. Cette loi est utilisée ici pour extrapoler la valeur du tassement après 10 000 cycles à partir de celui mesuré à l'issue des 10 premiers cycles. La courbe donnant le tassement résiduel après 10 000 cycles en fonction des charges d'essais peut alors être tracée. Selon l'allure de cette courbe et une valeur de tassement résiduel maximal retenue, la valeur de la charge de service à l'emplacement de l'essai est déterminée.

■ Objectif et principe de l'essai sur chaussée rigide

L'essai de plaque sur une chaussée rigide a pour but de déterminer la charge provoquant la contrainte maximale admissible en traction par flexion en un point de la dalle de béton où elle peut être mesurée.

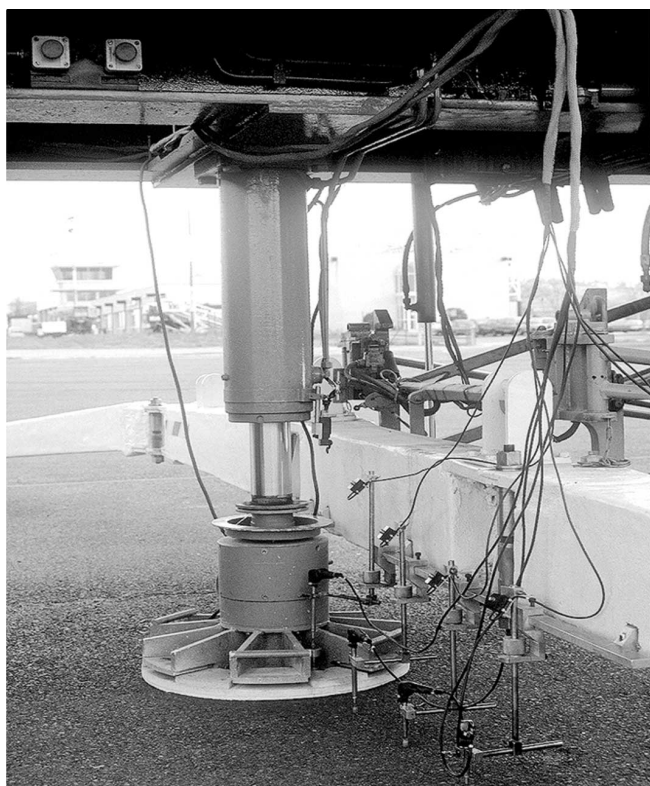


Figure 10 – Dispositif d'essai de plaque sur chaussée souple



Figure 11 – Dispositif d'essai de plaque sur chaussée rigide

Les dalles testées sont chargées en coin de manière à ce que les contraintes de traction par flexion se développent sur leur face supérieure. Seules naturellement ont valeur de test les dalles non fissurées dans cette zone.

La contrainte maximale étant alors située sur la bissectrice de l'angle du coin de dalle, le principe de l'essai consiste à disposer une série de capteurs sur cette bissectrice (figure 11) afin de déterminer, pour chaque essai de chargement, l'élongation maximale correspondant elle-même à la contrainte maximale de traction dans le béton.



Figure 12 – IMAG (Instrument de mesure automatique de glissance)

4.4.3 Contrôle de l'adhérence

L'adhérence des pneumatiques d'un avion à la piste est essentielle pour :

- le freinage à l'atterrissage ou en cas de décollage interrompu ;
- la mise en rotation des roues à l'impact à l'atterrissage ;
- le contrôle de la direction au roulage, notamment en présence de vents traversiers, en cas de fonctionnement asymétrique des moteurs (aussi bien au décollage qu'à l'atterrissage avec la poussée des moteurs inversée) ou encore à l'amorce d'une sortie rapide de piste.

La glissance sur chaussée mouillée, mais non polluée (neige, glace...), dépend de nombreux facteurs, à savoir :

- la vitesse de l'avion ;
- la forme, la structure et la pression du pneumatique ;
- la composition, la température et la nature du caoutchouc ou de la gomme ;
- l'épaisseur du film d'eau sur la chaussée ;
- la nature des granulats et du liant du revêtement.

C'est pour cette raison que le STBA et Aéroports de Paris ont développé l'Instrument de mesure automatique de glissance (IMAG [8]) permettant de mesurer le coefficient de frottement longitudinal qui traduit correctement la capacité d'un avion à freiner de manière rectiligne sur une chaussée (figure 12).

4.4.4 Contrôle de l'uni

■ L'uni est un paramètre qui traduit les dénivellations verticales de la chaussée.

Il a une incidence sur le comportement des avions au roulage avec notamment des phénomènes vibratoires nuisibles à la conduite des aéronefs. Un mauvais uni augmente de manière significative les distances de freinage.

■ En France, l'analyseur de profil en long (APL) est utilisé pour effectuer le contrôle de l'uni longitudinal des chaussées aéronautiques (figure 13).

On considère que les longueurs d'onde auxquelles les avions sont sensibles à grande vitesse sont comprises entre 8 m et 100 m.

Le signal relevé par le profilomètre est représentatif des défauts de la chaussée. Ce signal fait l'objet d'un traitement automatique (filtrage du signal) qui se traduit, *in fine*, par une notation comprise entre 1 et 10, ces notes correspondant respectivement à un uni très mauvais et très bon pour la bande des longueurs d'onde prise en compte.



Figure 13 – APL2 (analyseur de profil en long)

Le contrôle de l'uni d'une piste est nécessaire à la réception de sa réalisation ou de son renforcement après remise aux normes du

profil. S'il est effectué grâce à l'APL, les caractéristiques minimales d'uni, qui sont définies dans le tableau 5, s'appliquent pour la couche de roulement.

4.5 Gestion des chaussées – Méthode ACN/PCN

La méthode ACN/PCN est un système international normalisé élaboré par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) qui vise à fournir des renseignements sur la résistance des chaussées aéronautiques et qui permet de ce fait d'estimer l'admissibilité de chaque avion en fonction de sa charge et de la résistance des chaussées.

Cette méthode est applicable depuis 1983 par l'ensemble des États membres de l'OACI.

4.5.1 PCN (Pavement Classification Number)

Le principe de cette méthode est relativement simple puisque l'on associe à chaque zone homogène d'une plate-forme un numéro (PCN) qui reflète la capacité portante de la chaussée.

Tableau 5 – Caractéristiques minimales de l'uni d'une piste

Exigences	Longueurs d'onde	Note minimale (de 1 à 10)	Résultats enregistrés			
			Pourcentage de tronçon présentant la note minimale			
			Chaussées neuves $L < 2000$ m	Chaussées neuves $L \geq 2000$ m	Chaussées après travaux d'entretien en plusieurs couches	Chaussées après travaux d'entretien en une couche
Exigences globales sur l'ensemble des notes de tous les profils	Petites ondes	4	100 %		100 %	100 %
		6	95 %		95 %	maintien de l'existant ⁽¹⁾
		7	80 %		80 %	
	Moyennes ondes	5	100 %		100 %	maintien de l'existant ⁽¹⁾
		8	80 %		80 %	
	Grandes ondes	7	100 %	100 %	maintien de l'existant ⁽¹⁾	maintien de l'existant ⁽¹⁾
		10	80 %	90 %		
Exigences profil par profil pour trois paires de profils centrales	Petites ondes	4				100 %
		6	100 %		100 %	maintien de l'existant ⁽¹⁾
		7	90 %		90 %	
	Moyennes ondes	6	100 %		100 %	maintien de l'existant ⁽¹⁾
		8	90 %		90 %	
	Grandes ondes	8	100 %	100 %	maintien de l'existant ⁽¹⁾	maintien de l'existant ⁽¹⁾
		10	80 %	90 %		

(1) Maintien de l'existant : note moyenne après travaux \geq note moyenne avant travaux, et, note minimale après travaux \geq note minimale avant travaux.

Cette information est publiée de manière à donner les informations suivantes :

- nature de la chaussée ;
- qualité de résistance du sol support ;
- limitation de pression de gonflage des pneumatiques des avions susceptibles de venir ;
- base d'évaluation du *PCN*.

La méthode française de calcul de la valeur du *PCN* d'une chaussée est rattachée au principe général de dimensionnement et d'auscultation ayant cours en France et décrit aux paragraphes 4.4.2, 4.4.3, 4.4.4.

4.5.2 ACN (Aircraft Classification Number)

Cet autre paramètre représente « l'agressivité » d'un avion sur une chaussée.

Il est déterminé par les constructeurs aéronautiques conformément à certaines procédures normalisées.

4.5.3 Principe général

Le principe est alors le suivant :

- si l'*ACN* est inférieur au *PCN*, l'avion peut manœuvrer sur cette aire sans restriction ;
- sinon, sous certaines conditions, l'appareil peut être accepté mais en se voyant appliquer des limitations en terme de masse ou de fréquence d'accueil. Ceci permet de ne pas pénaliser l'aspect commercial en ce qui concerne l'accueil d'avions pour lesquels l'*ACN* est supérieur au *PCN*.

La procédure, en cas de dépassement du *PCN* par l'*ACN* d'un avion, est décrite de manière exhaustive dans le *Guide pratique d'utilisation de la méthode ACN-PCN* [6].

4.6 Renforcement des chaussées

4.6.1 Renforcement d'une chaussée souple par une chaussée souple

L'épaisseur de renforcement est déterminée par la différence d'épaisseur équivalente entre la chaussée nécessaire pour accueillir le trafic prévu et la chaussée existante.

4.6.2 Renforcement d'une chaussée rigide par une chaussée rigide

■ Renforcement en couche mince

Cette solution n'est envisagée que si les dalles existantes sont en bon état. L'épaisseur du renforcement est donnée par la formule suivante :

$$h_r^{1,4} = h_t^{1,4} - C \cdot h^{1,4}$$

- avec h_t épaisseur théorique de la dalle nécessaire pour accueillir le trafic prévu,
- h épaisseur de la dalle existante,

h_r épaisseur du renforcement,

$C = 1$ si la chaussée est en bon état,

$C = 0,75$ si la chaussée présente des fissures d'angles, mais pas de dégradations généralisées.

■ Renforcement en couches épaisses

Cette solution est envisagée si la chaussée existante est en mauvais état. Les dalles sont alors fragmentées, puis compactées. La couche de béton de renforcement sera dimensionnée comme s'il s'agissait d'une chaussée neuve.

4.6.3 Renforcement d'une chaussée rigide par une chaussée souple

■ Si la chaussée existante est en mauvais état, on pourra achever de la fragmenter et la considérer pour le dimensionnement comme une couche de grave.

■ Si la chaussée rigide est encore saine, l'épaisseur équivalente du renforcement, e , est donné par :

$$e = 3,75 \times (F \times h_t - h)$$

avec h épaisseur de la dalle de béton existante,

h_t épaisseur théorique qui devrait être donnée à une dalle de béton neuve, abstraction étant faite de celle existante, épaisseur déterminée à partir de la contrainte admissible par le béton des dalles existantes et du module de réaction corrigé K_c de leur sol support (pour tenir compte de la couche de fondation de la chaussée existante),

F coefficient de réduction de l'épaisseur h dont la valeur, fonction du même module K_c peut être lue sur l'abaque représenté figure 14.

L'épaisseur équivalente du renforcement ne doit pas être inférieure à 25 cm. Du fait, en effet, de l'existence des joints comme des conditions de travail des dalles, il est nécessaire que le béton soit surmonté d'une couche de matériaux d'épaisseur telle que la remontée des fissures au droit des joints (de même qu'à celui des anciennes fissures) soit au maximum retardée.

Concernant ce type de technique, il sera utile de se référer au *Guide anti-remontée de fissures* [3] publié par le STBA.

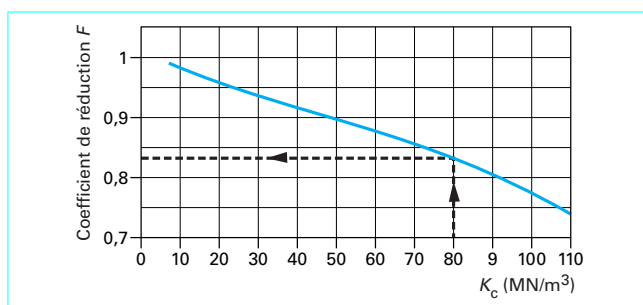


Figure 14 – Coefficient de réduction utilisé pour déterminer l'épaisseur d'un renforcement d'une chaussée rigide par une chaussée souple