

Chapitre 5

Conception des chaussées aéronautiques



Aéroport de Marseille Provence - Vue générale des chaussées aéronautiques

De portée d'abord générale, les développements ci-après vont rapidement bifurquer sur deux types de chaussée auxquels leurs structures, tout à fait différentes, ont conduit autrefois à attribuer des modes de fonctionnement correspondant à la fois aux matériaux alors employés et aux outils de calcul alors disponibles.

Il s'agit, d'une part, des **chaussées rigides** qui répartissent les charges appliquées sur une surface très étendue du sol support au moyen d'une dalle de béton fléchissant élastiquement. Du fait de cette large répartition, le sol support est peu contraint, de sorte que la ruine de la chaussée s'amorcera ici, non dans le sol support, mais dans la dalle lorsque celle-ci, perdant ses caractéristiques mécaniques par effet de fatigue, ne pourra plus résister à la déformation due au trafic.

Il s'agit, d'autre part, des **chaussées souples** qui superposent au sol support plusieurs couches de matériaux offrant de meilleures qualités mécaniques sans pour autant être supposées davantage capables de travailler à la traction. Vulnérables là où les qualités mécaniques sont les plus faibles, ces chaussées sont destinées à périr non par usure de leurs constituants mais par rupture de leurs sols supports.

L'introduction des matériaux enrobés, à la fin des

années cinquante, de même que leur évolution font que la tranche supérieure des chaussées souples fonctionne dans des conditions se rapprochant davantage de celles d'une dalle de chaussée rigide (notion de **chaussée semi-rigide**).

Alors que le dimensionnement des chaussées souples s'est, dans le domaine routier, adapté à cette réalité, celui des chaussées aéronautiques s'en remet encore à la méthode **C.B.R.** pour définir leur **épaisseur équivalente** et à l'expérience de l'Ingénieur pour déterminer leur constitution.

Les indications données ci-après en 5-2-1 sont donc à considérer comme devant, à relativement court terme, être d'abord complétées puis remplacées par l'introduction d'une nouvelle méthode de dimensionnement.

En tout état de cause, les développements qui vont suivre n'ont pour autre ambition que celle de fournir tous éléments utiles à l'usage du document pratique de dimensionnement édité par le S.T.B.A. et comprenant l'ensemble des outils de dimensionnement des chaussées aéronautiques pour les aéronefs en service. En attendant que la nouvelle méthode de calcul des chaussées souples soit mise au point, ces outils pourront être, dans un premier temps, constitués par les abaques existants auxquels pourront être joints divers outils informatiques tels que SOUPLEX et RIGIX.

5-1 Charge de calcul et méthode de dimensionnement



Saint-Denis-Gillot - Avion à l'atterrissage

Photobanque STEBA / A. PARINGAUX

La masse d'un avion est la somme de :

- sa masse à vide opérationnelle,
- sa charge marchande (passagers, fret, poste),
- sa masse de carburant dépendant elle-même, au décollage, de la longueur d'étape et ne conservant plus, à l'atterrissage, que la partie des réserves non consommées.

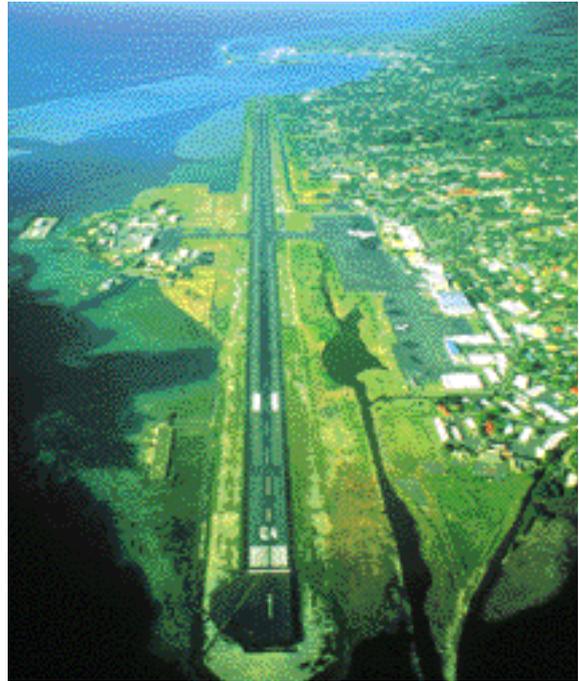
Les différences entre masses réelles au décollage et à l'atterrissage pouvant être importantes, distinction **pourra** être faite entre les unes et les autres suivant la distribution du trafic sur l'aire de mouvement, le taux d'utilisation de chaque seuil de piste et le cheminement des appareils qui en résulte sur les différentes chaussées.

Sera par contre systématiquement prise en compte la répartition de la **masse de l'avion** entre ses atterrisseurs. Fonction du centrage de l'avion, cette répartition varie peu. En l'absence d'indications précises, 95 % de la masse totale de l'avion sont admis comme étant distribués entre les atterrisseurs principaux.

Une distinction par zones de l'aire de mouvement peut encore être faite, qui s'attache au déplacement de l'avion sur la chaussée.

Ainsi le passage d'un avion n'est-il qu'accidentel sur certaines parties de l'**aire de mouvement** (parties latérales de la piste, **prolongement d'arrêt**).

Les avions sollicitent les matériaux de chaussée avec des fréquences et des vitesses différentes suivant les aires. Lorsque l'avion est à l'arrêt (postes de stationnement), la sollicitation est plus forte que lorsqu'il circule à faible vitesse (voies de rela-

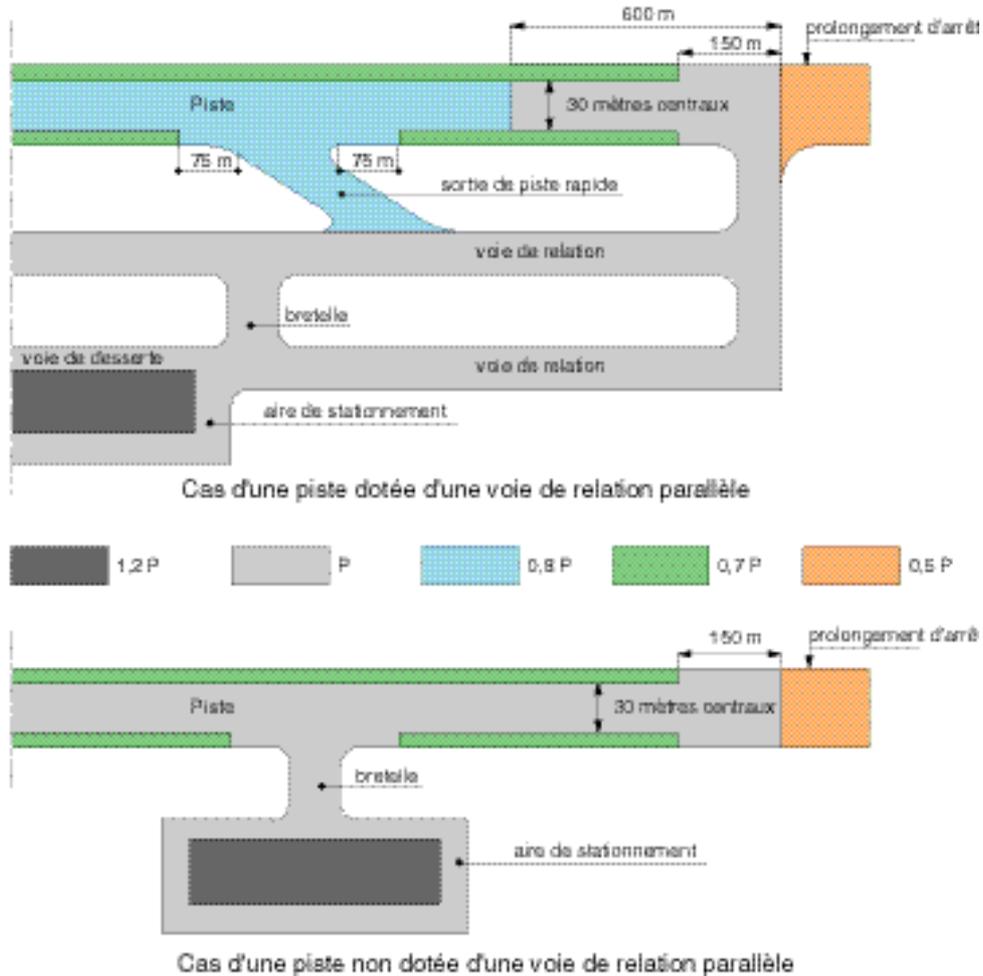


Vue aérienne de la piste de Tahiti-FAA

Photobanque STEBA / Graphik - V. PAUL

tion et de desserte, extrémités de la piste voire même sur toute sa longueur si elle est utilisée comme voie de relation) et, a fortiori, que lorsqu'il se déplace rapidement (piste dans les phases de décollage ou d'atterrissage), la charge étant alors réduite par la sustentation des ailes. C'est ainsi que, contrairement à une perception largement répandue, la zone d'impact compte parmi les moins sollicitées compte tenu de la masse réduite à l'atterrissage.

La sophistication des voilures, de leurs dispositifs hypersustentateurs et destructeurs de portance ainsi que le calage négatif de l'aile avec ces dispositifs rentrés, lorsque l'avion repose sur l'ensemble de ses atterrisseurs, rendent difficile la prise en compte combinée de ces différents éléments lors d'un décollage ou d'un atterrissage. Néanmoins, les charges seront pondérées, dans les zones où les différences de situations ci-dessus peuvent être appliquées, selon les indications rassemblées dans la figure 5-1.



5-1 Pondération des charges réelles selon la fonction des aires

Cette **pondération de charge** sera généralement* au moins appliquée là où elle constitue majeure partie.

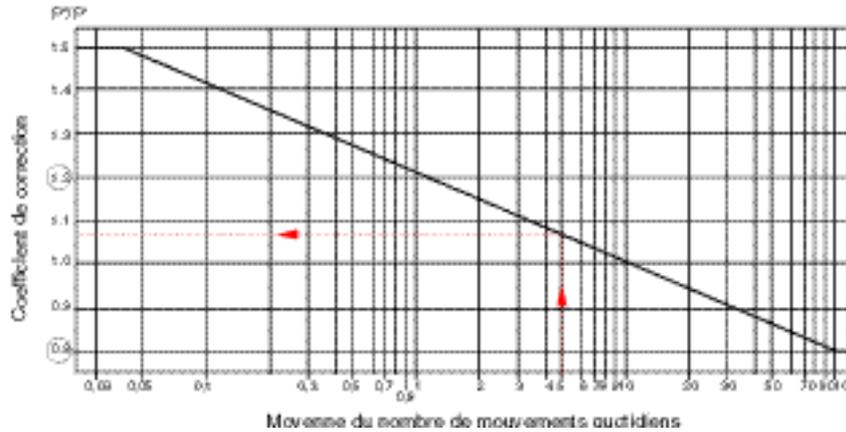
Ailleurs - hors donc les zones de stationnement de l'aire de trafic - il est recommandé de confronter l'économie pouvant être espérée de cette prise en compte aux difficultés qui pourraient en résulter à l'exécution (les décrochements dans les profils du fond de forme sont particulièrement déconseillés) voire même ultérieurement (possibilité ménagée d'allonger la piste sur un prolongement d'arrêt).

L'intensité, pondérée ou non, de la charge transmise à une chaussée aéronautique par l'atterrisseur principal d'un avion de type donné ne suffit toutefois pas pour déterminer l'aptitude de cette chaussée à accueillir cet avion.

L'application répétée d'une même charge P à une chaussée a en effet conduit depuis longtemps à observer que :

- la déformation sous charge comme la déformation résiduelle après déchargement croissent à peu près linéairement avec le logarithme du nombre d'applications,
- les constantes intervenant dans ces relations sont elles-mêmes fonctions de la charge P ,
- lorsque ce nombre d'applications dépasse une certaine valeur, les relations précédentes laissent place à une rapide accélération des déformations annonçant elle-même la ruine de la chaussée.

* Cette majoration peut par contre ne pas être appliquée aux aires de stationnement des aéroports à fort trafic compte tenu des faibles durées de stationnement liées à la rotation des avions.



5-2 Correction de la charge réelle en fonction de l'intensité moyenne du trafic

Des observations qui précèdent, il résulte que :

- une chaussée arrivera en phase ultime de vieillissement lorsque la charge la plus contraignante, à laquelle elle doit être soumise régulièrement, sera près d'avoir atteint le nombre maximal d'applications toléré de sa seule part par la chaussée,
- une chaussée, dont le potentiel doit être de supporter, pendant une durée de vie donnée, n_1 applications par jour d'une même charge P_1 , peut recevoir, pendant la même durée de vie, n_2 applications par jour d'une autre charge P_2 .

L'équivalence des deux couples (P_1, n_1) et (P_2, n_2) est très importante en ce qu'elle permet de caler définitivement les «outils de dimensionnement» des chaussées sur une durée de vie et un nombre d'applications donnés.

Période pendant laquelle la chaussée ne recevra que des interventions d'entretien et à l'issue de laquelle, par contre, elle nécessitera d'être renforcée, la durée de vie structurelle de la chaussée est, **par convention** et hors toute considération économique, choisie égale à 10 ans, soit 3 650 jours.

Adaptée aux chaussées souples, cette période de 10 ans peut, de manière plus réaliste, se voir substituer celle de 20 ans pour les chaussées rigides. Les «outils de dimensionnement» étant, dans un cas comme dans l'autre, calés sur une durée de vie de 10 ans, on se replacera au besoin dans ce cadre en posant que n mouvements* par jour pendant 20 ans équivalent à $2n$ mouvements par jour pendant 10 ans.

Le **trafic normal** pris pour hypothèse par les «outils de dimensionnement», a, quant à lui, été fixé à 10 mouvements par jour.

Le passage du couple (P', n) , où P' est la charge pondérée de la charge réelle P , à la valeur $(P'', 10)$, qui est introduite dans les «outils de dimensionnement», est effectué par la formule

$$P'' = \frac{P'}{(1,2 - 0,2 \log_{10} n)}$$

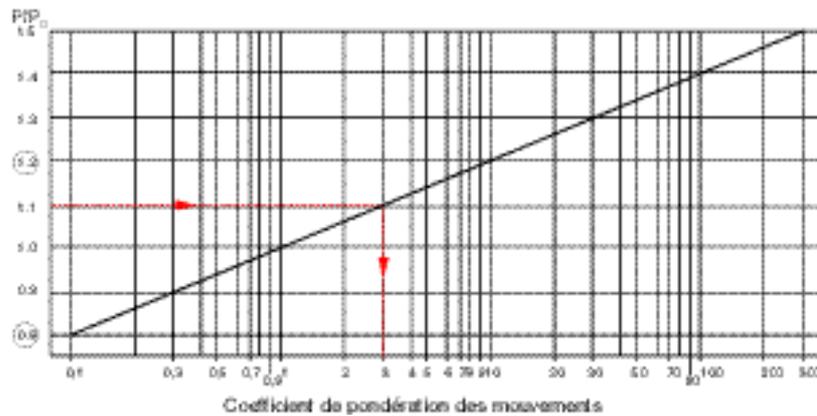
dont le coefficient correcteur $(1,2 - 0,2 \log_{10} n)$ peut être lu sur l'abaque reproduit par la figure 5-2 ci-dessus.

Tel qu'il vient d'être introduit, le dimensionnement d'une chaussée par la seule prise en considération d'une charge pondérée unique** P' appliquée par l'atterrisseur le plus contraignant d'un avion de type donné avec le nombre réel de mouvements journaliers n est dit **dimensionnement forfaitaire**. Ne prenant en compte que l'avion le plus pénalisant***, cette méthode est utilisée pour des études préliminaires, soit en l'absence de données précises, soit pour amorcer un dimensionnement optimisé.

* Généralement, un atterrissage (ou un décollage) correspond à un mouvement. Il y a cependant lieu d'être ici attentif à ce qu'un atterrissage (ou un décollage) peut, en certains cas (segment de piste compris entre une entrée-sortie et une raquette d'extrémité) correspondre à deux mouvements.

** ne distinguant par conséquent pas entre les n applications correspondant à la masse au décollage de celles correspondant à la masse à l'atterrissage.

*** Lorsque le couple (P', n) le plus pénalisant ne se détache pas de manière évidente dans le trafic escompté, un dimensionnement forfaitaire sera effectué pour chacun des couples entre lesquels il y a hésitation.



5-3 Coefficient permettant de transformer le nombre de mouvements réels en nombre de mouvements équivalents de la charge maximale correspondante aux conditions normales d'application

Le **dimensionnement optimisé** prend en compte, pour la part qu'ils sont destinés à occuper dans le trafic envisagé, tous les avions susceptibles d'avoir une action significative sur la fatigue de la chaussée.

Le principe, selon lequel deux couples « charge - nombre d'applications » sont équivalents lorsqu'ils produisent la même fatigue de l'ensemble constitué par la chaussée et son sol support, reste à la base de la méthode optimisée.

L'équivalence déterminée, selon ce principe, dès l'origine du processus de dimensionnement n'est toutefois plus possible lorsqu'il s'agit d'établir celle reliant des atterrisseurs de modèles différents compte tenu de ce que chacun de ceux-ci dispose d'un « outil de dimensionnement » personnalisé adapté à chaque type de chaussée.

La méthode optimisée ne pourra par suite qu'être itérative. Elle consiste, partant d'un dimensionnement forfaitaire légèrement majoré, à déterminer, pour chaque modèle d'avion participant au trafic envisagé, la charge maximale P_o conduisant à la ruine de cette chaussée après 36 500 applications* (10 applications par jour pendant 10 ans). Il est fait, à cette fin, usage en sens inverse de l'outil de dimensionnement correspondant à l'atterrisseur principal de ce modèle d'avion.

Dans un deuxième temps et pour ce même atterrisseur, est déterminé le nombre n_o d'applications par jour de la charge P_o équivalent au nombre réel d'applications de la charge réelle pondérée transmise par cet atterrisseur sur la partie considérée de l'aire de mouvement. Démarche inverse de la correction utilisant l'abaque de la figure 5-2, la

présente transformation fait usage de celui reproduit par la figure 5-3 ci-dessus.

Somme est enfin faite de tous les n_o qui est comparée à la valeur de dix applications par jour : si elle est sensiblement inférieure (resp. supérieure), le dimensionnement de départ est trop important (resp. faible) et le calcul sera repris à partir d'une valeur inférieure (resp. supérieure).

De même le calcul sera repris si l'on trouve, pour un avion, un rapport P'/P_o supérieur à 1,2 pour les aires de stationnement ou 1,5 pour les autres aires.

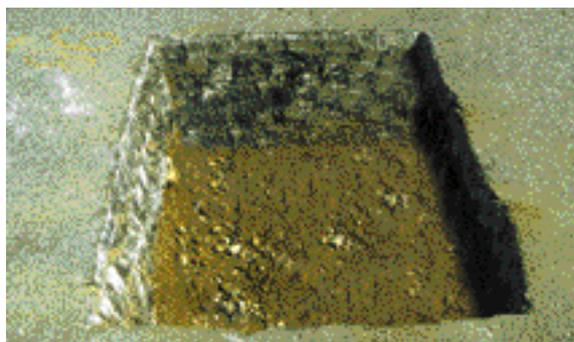
Les méthodes forfaitaire et optimisée ont pu être ici développées dans leur principe avant qu'aient été décrits les « outils de dimensionnement » auxquels elles font l'une et l'autre appel.

Ce choix a été fait volontairement compte tenu de ce que :

- les outils de dimensionnement correspondant aux chaussées souples et aux chaussées rigides s'appuient sur des schémas mécaniques tout à fait différents et ne peuvent par suite être présentés autrement que séparément,
- ces mêmes outils se placent dans les conditions normales de durée de vie de trafic qu'il convenait donc d'introduire préalablement.

* 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 annuelles de trafic, la valeur de 3,65 est choisie : ainsi les 36500 mouvements équivalents du trafic normal correspondent donc à 10000 applications de charges.

5-2 Dimensionnement des chaussées souples



Photographie STEBA / J.MOCCUIN

Sondage mettant en évidence les différentes couches de matériaux

Une **chaussée souple** est en général constituée de bas en haut par trois couches différentes de matériaux de qualité croissante - **couche de fondation**, **couche de base** et **couche de roulement** - les deux premières constituant l'**assise de la chaussée**.

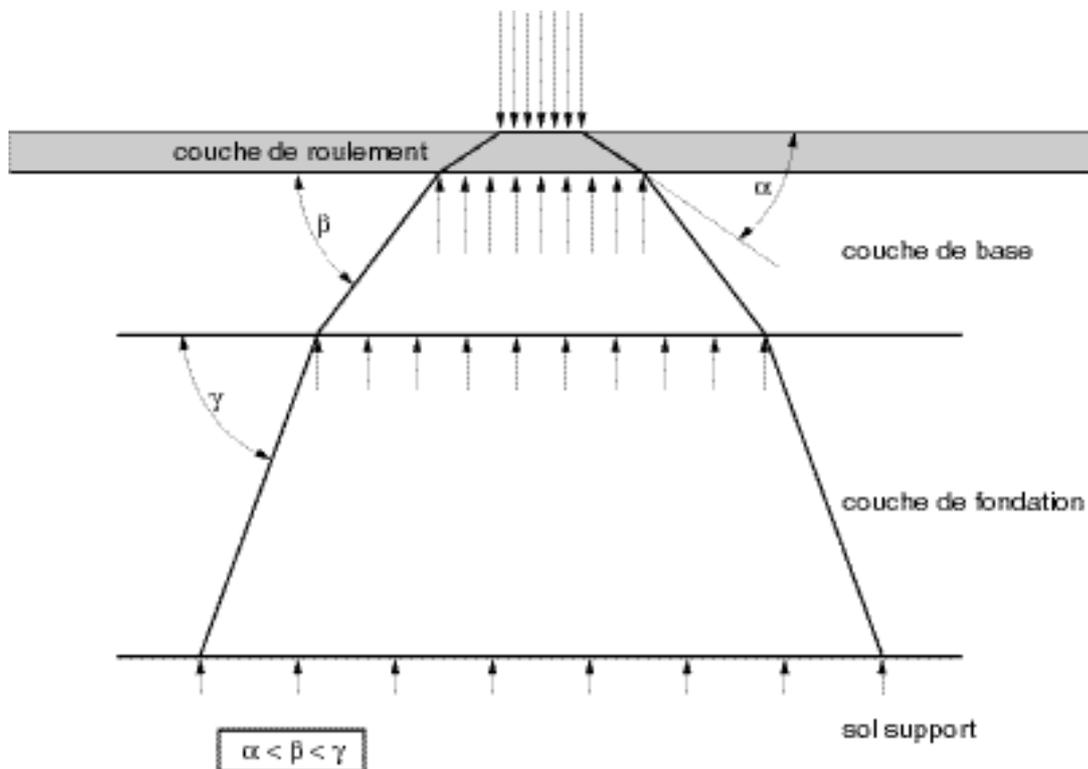


Photographie STEBA / A.F.AINGAUX

Brest-Guipavas - Piste principale et aires de stationnement en structure souple

Une **sous-couche** (drainante ou anticontaminante) peut être interposée, dans certains cas, entre le sol support et la couche de fondation. La mise en place de cette sous-couche permet en outre d'améliorer les caractéristiques de la plate-forme support de la chaussée ainsi que sa praticabilité pendant la phase de chantier.

5-2-1 Comportement d'une chaussée souple



5-4 Répartition de la charge d'une roue d'atterrisseur dans les différentes couches de matériau constituant une chaussée souple

Toutes les chaussées aéronautiques françaises de ce type ont, comme bien d'autres à l'étranger, été jusqu'ici conçues en admettant, avec une approximation jugée suffisante*, que, comme le schématise la figure 5-4 ci-dessus, la charge, appliquée par une roue d'atterrisseur à la surface d'une chaussée souple, descend dans le corps de celle-ci à l'intérieur d'une succession de surfaces réglées dont les génératrices forment avec la verticale un angle, caractéristique du matériau traversé, qui se resserre au passage de chaque couche à sa suivante.

La rupture de l'équilibre intervient lorsque, le sol support** ne pouvant plus exercer une réaction égale à la charge appliquée, les couches supérieures lâchent à leur tour.

Il y aura alors poinçonnement du terrain d'assise, la figure 5-4 montrant que, pour une charge donnée, il y a relation entre la réaction limite, ou portance du sol support, et l'épaisseur du corps de chaussée.

* Il est bien évident que l'uniformité de la charge descendue sur chaque couche, telle qu'elle est représentée sur la figure 5-4, est une simplification de la réalité. Elle est d'ailleurs très contestable compte tenu de la nature de la couche de roulement, voire même de la couche de base, lorsque celle-ci est en matériaux traités.

** Il n'en convient pas moins de composer le corps de chaussée - aujourd'hui par expérience, demain à l'aide d'une méthode plus élaborée - de telle sorte que la rupture n'y prenne pas naissance avant.

5-2-2 Portance du sol support

La portance du sol support peut être quantifiée par son **indice portant californien (C.B.R.*)** dont la détermination résulte de la mesure en laboratoire de la force exercée sur une éprouvette correctement compactée et permettant d'observer son poinçonnement dans des conditions normalisées (forme et dimensions de l'éprouvette, section pénétrante, profondeur et vitesse de pénétration).

Sauf impossibilité, tenant soit aux conditions climatiques locales soit au matériel disponible, le fond de forme de la chaussée sera humidifié puis compacté de manière à ce que sa densité sèche soit égale à 95% de l'**optimum proctor modifié****

Compactées à 95 % de l'optimum proctor modifié, les éprouvettes soumises à l'essai C.B.R. subissent préalablement une immersion de durée telle que leur teneur en eau soit celle à laquelle elle devrait s'équilibrer dans le sol sous chaussée.

La teneur en eau d'équilibre étant d'effet très sensible sur les résultats, son appréciation doit, pour des projets importants, donner lieu à une étude C.B.R. élargie à plusieurs teneurs en eau encastrant celle estimée et obtenues par des imbibitions de durées différentes. Pour un aérodrome ne justifiant pas une telle étude, on adoptera, soit une imbibition dite normale de quatre jours, soit une imbibition complète à l'issue de laquelle le poids de l'échantillon ne variera plus.

À cette difficulté d'appréciation, la méthode C.B.R. peut également être critiquée en ce que :

- pour les sables propres, qui sont sans cohésion et ont des propriétés mécaniques peu sensibles à l'humidité, la mesure du C.B.R. est peu significative,
- les conditions opératoires obligent, dans les échantillons, à substituer aux grains de plus de 20 mm un poids égal de la fraction du sol étudié passant à la passoire de 20 mm et retenue par le tamis de 5 mm ***.

La mesure de l'indice californien s'avérant donc inadaptée aux sols graveleux et aux sables propres, la méthode C.B.R. de dimensionnement des chaussées souples peut néanmoins être employée, dans l'un et l'autre de ces deux cas, en substituant à la valeur de l'indice difficilement mesurable celle du **facteur de portance F** calculé

à partir de la **limite de liquidité**** LL** et de l'**indice de plasticité***** IP** de la fraction du sol support non retenue par le tamis de 0,42 mm, par application de la formule***** ci-après :

$$F = \frac{4250}{IP \cdot LL}$$

En toute première approximation, les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous peuvent orienter l'étude d'un avant-projet sommaire.

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

Bien que d'autres fonctions (étanchéité, résistance aux efforts tangentiels,...) conduisent à choisir pour chaque couche de chaussée tel type de matériau plutôt qu'un autre, la figure 5-4 permet de concevoir que, du seul point de vue du transfert de charge,

- un seul et même matériau puisse, pour peu que lui soit donnée une épaisseur suffisante, assurer la transition entre la roue d'atterrisseur et le sol support,
- l'épaisseur minimale de cette chaussée monocouche étant déterminée à partir de l'indice C.B.R. du sol support, il soit possible, dans une seconde étape, de composer une chaussée souple équivalente comportant couche de roulement, couche de base et couche de fondation.

* Californian bearing ratio

** maximum de la courbe «densité sèche - teneur en eau» correspondant à une énergie de compactage d'échantillon représentative de celle pouvant être mise en œuvre sur le chantier

*** sous réserve encore que la fraction retenue à la passoire de 30 mm ne dépasse pas 20% du poids total de l'échantillon, à défaut de quoi l'essai ne peut être pratiqué

**** teneur en eau correspondant à la transition entre l'état plastique et l'état fluide

***** différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité caractérisant le passage de l'état plastique à l'état solide (le matériau ne se pétrit plus)

***** La valeur de F ainsi calculée doit être multipliée par $(\frac{25}{30})^m$, lorsque la fraction m passant au tamis de 0,42 mm est comprise entre 25% et 75%, et être transformée en $40 - (20 - F) \cdot \frac{2m}{30}$, lorsque m est inférieure à 25%.

5-2-3 Épaisseur de la chaussée équivalente

Le matériau choisi pour cette **chaussée équivalente** mono- couche étant une grave non traitée, concassée, bien graduée et ayant un module de déformation* de 500 MPa, son épaisseur minimale e (cm) devant être interposée entre une charge de calcul P (kg) - elle-même transmise par une roue d'atterrisseur gonflée à q (MPa) - appliquée 10 000 fois et un sol support d'indice portant noté CBR, est donnée par la formule :

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

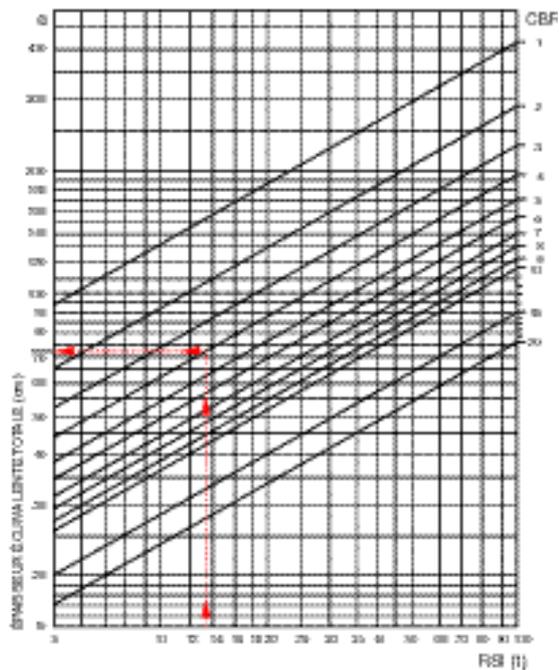
pouvant être mise sous la forme:

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

dans laquelle A n'est fonction que de l'indice C.B.R. et de la pression des pneumatiques, l'adoption de coordonnées logarithmiques pour e et P permet de construire, pour chaque valeur de q , un abaque dans lequel l'indice C.B.R. figure par un faisceau de droites parallèles.

L'**abaque de dimensionnement** reproduit par la figure 5-5 correspond à la pression de 0,6 MPa constituant valeur standard pour les atterrisseurs à roue simple. Lorsque la pression effective est différente de cette valeur standard, il n'est utile d'en tenir compte que lorsque la différence est en plus ou en moins supérieure à 0,3 MPa. Dans le cas contraire, il y aura lieu de se reporter à la formule à partir de laquelle l'abaque a été construit.

L'intérêt de l'abaque ci-dessus n'est pas à l'évidence de se substituer à l'utilisation d'une formu -

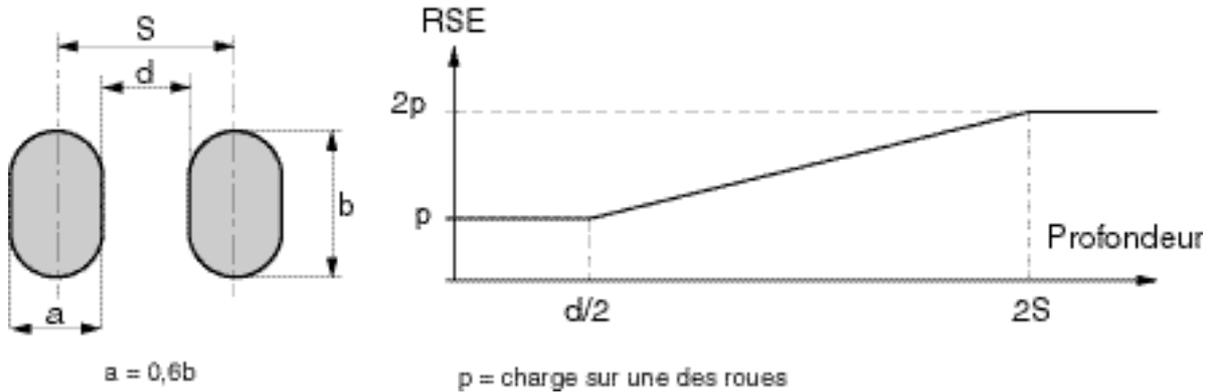


5-5 Abaque de calcul pour une roue simple isolée correspondant à une pression du pneumatique de $0,6 \pm 0,3$ MPa

le, dont l'emploi est relativement aisé pour une roue simple isolée, mais plutôt en ce que, complété par ceux correspondant à des valeurs de pression de pneumatique différentes, il permet de construire d'autres abaques utilisables pour des atterrisseurs différents, de type «roues jumelées» ou «boggie», dont les caractéristiques diffèrent généralement d'un type d'avion à un autre.

* rapport entre la pression appliquée et la déformation relative

5-2-4 Cas des atterrisseurs à roues multiples



5-6 Dimensions de la trace d'une roue d'atterrisseur et contrainte verticale résultant d'un atterrisseur à deux roues jumelées

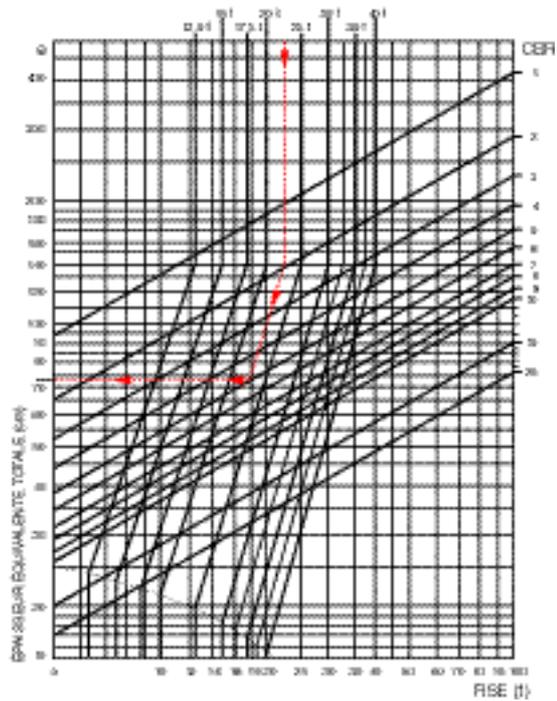
Il est établi par la théorie et confirmé par les résultats expérimentaux que, ainsi qu'il est schématisé sur la figure 5-6,

- en deçà d'une profondeur égale à la moitié de la distance d séparant les bords intérieurs des deux roues d'un jumelage chacune d'elles agit indépendamment,
- au delà d'une profondeur égale au double de l'entraxe S de ces deux roues, elles se comportent comme une **roue simple équivalente** (R.S.E.) de poids égal à celui du jumelage,
- entre l'une et l'autre de ces deux profondeurs, la charge simple équivalente varie linéairement sur un graphique en coordonnées logarithmiques.

Comme également indiqué par la figure 5-6, la trace de chaque roue est supposée constituée par un rectangle complété par deux demi-cercles, configuration de laquelle résulte que la distance d (cm), qui correspond à l'entraxe S (cm) et à la charge p (kg) transmise par chacune des deux roues gonflées à la pression q (MPa), peut être obtenue par la relation :

$$d = S - 0,26 \cdot \sqrt{\frac{P}{q}}$$

Reporté pour chaque valeur de $p = P / 2$ sur l'abaque de la figure 5-5, le graphique de la figure 5-6 permet de transformer ce premier abaque applicable à un **atterrisseur** à roue simple en celui utilisable pour un **jumelage de roues*** et reproduit par la figure 5-7, la valeur standard de la pression q de gonflage des pneumatiques étant par contre ici de $0,9 \text{ MPa} \pm 0,3 \text{ MPa}$.



5-7 Abaque de calcul pour un jumelage de roues correspondant à une pression de pneumatiques de $0,9 \pm 0,3 \text{ MPa}$

* Il convient de souligner une nouvelle fois ici que la méthode C.B.R. ne se place qu'au niveau du sol support. Il y a également lieu de remarquer que le recouvrement des descentes de charges, qui permet d'introduire la notion de roue équivalente à un atterrisseur, néglige malheureusement celui pouvant résulter du passage successif d'autres atterrisseurs.



Train d'atterrissage d'un B 747



Train d'atterrissage d'un Antonov 124

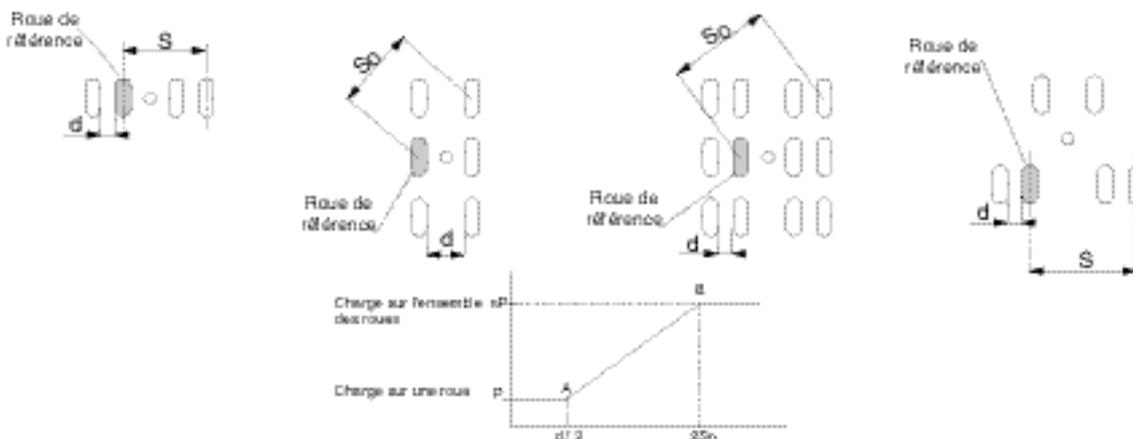
La démarche aboutissant à la construction d'un abaque utilisable pour deux roues jumelées est transposable au cas de tout autre atterrisseur, étant précisé que :

- la roue de référence est la plus proche du centre de gravité géométrique de l'ensemble des empreintes des pneumatiques de l'atterrisseur;
- la profondeur $d/2$, en deçà de laquelle chaque roue de l'atterrisseur agit indépendamment, correspond au plus faible des entraxes séparant la roue de référence d'une autre roue de l'atterrisseur;
- la profondeur $2S$, au delà de laquelle l'atterrisseur équivaut à une roue unique appliquant la charge P , correspond à la distance de centre à centre séparant la roue de référence de celle qui lui est la plus éloignée.
- pour les atterrisseurs de 6 roues et plus, cette transposition est critiquable et sera révisée dans le cadre de la nouvelle méthode de dimensionnement.

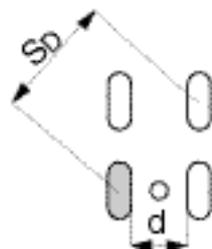
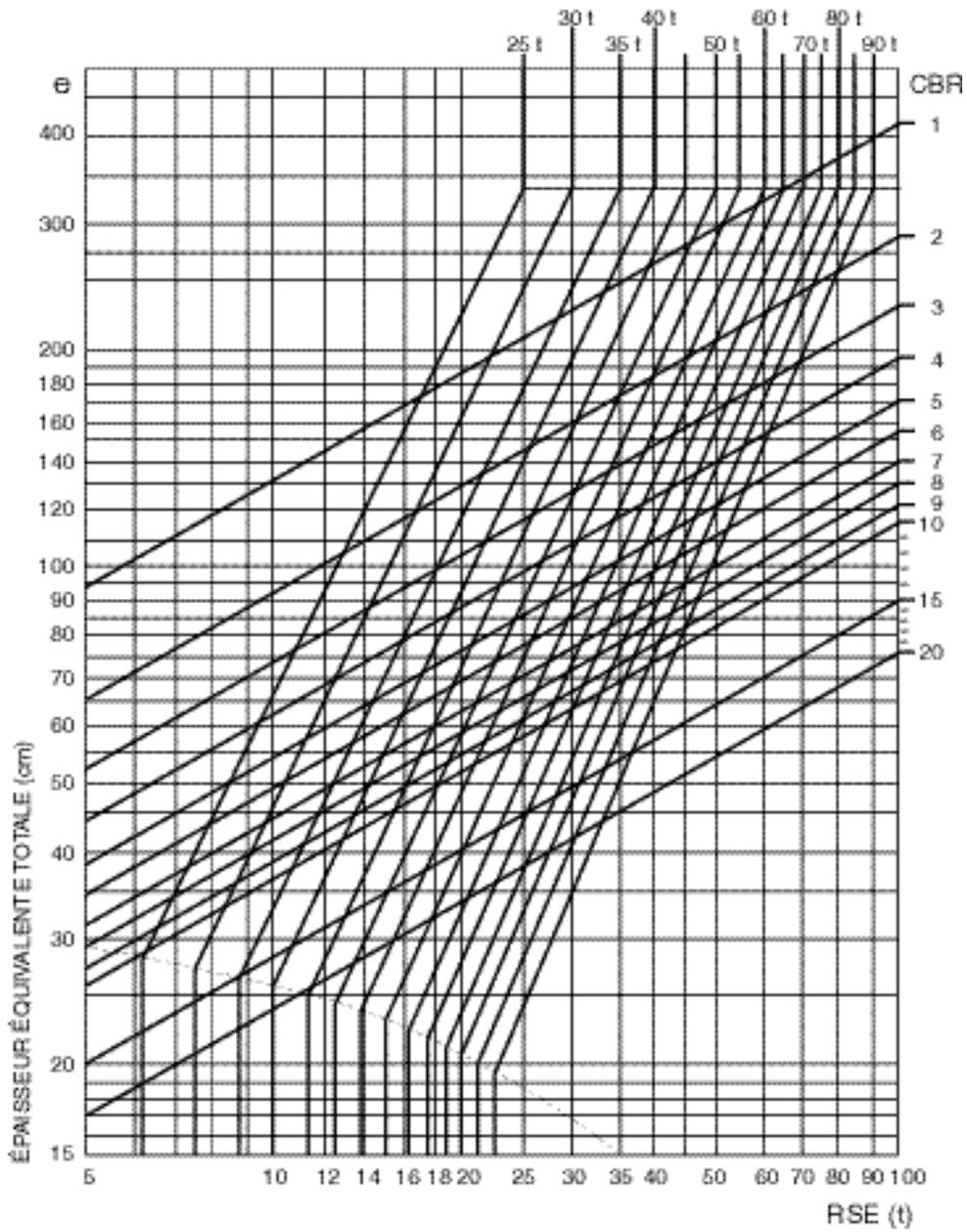
La figure 5-8 schématise, avec la réserve qui vient d'être exprimée, les éléments de cette transposition pour quatre configurations d'atterrisseurs, tandis que la figure 5-9 reproduit l'abaque utilisable pour celle de type boggie à quatre roues. Construit comme celui de la figure 5-7 applicable à deux roues jumelées, cet abaque correspond à une pression de gonflage des pneumatiques de 1,2 MPa considérée comme standard pour les atterrisseurs de type boggie.

La marge de validité de $\pm 0,3$ MPa s'applique à cette généralisation ; la correction qui doit au delà être apportée à l'épaisseur lue sur un abaque correspondant à la pression q_0 consiste à multiplier cette valeur par le rapport.

$$\frac{\sqrt{\frac{1}{0,57 \cdot CBR} - \frac{1}{32 \cdot q}}}{\sqrt{\frac{1}{0,57 \cdot CBR} - \frac{1}{32 \cdot q_0}}}$$

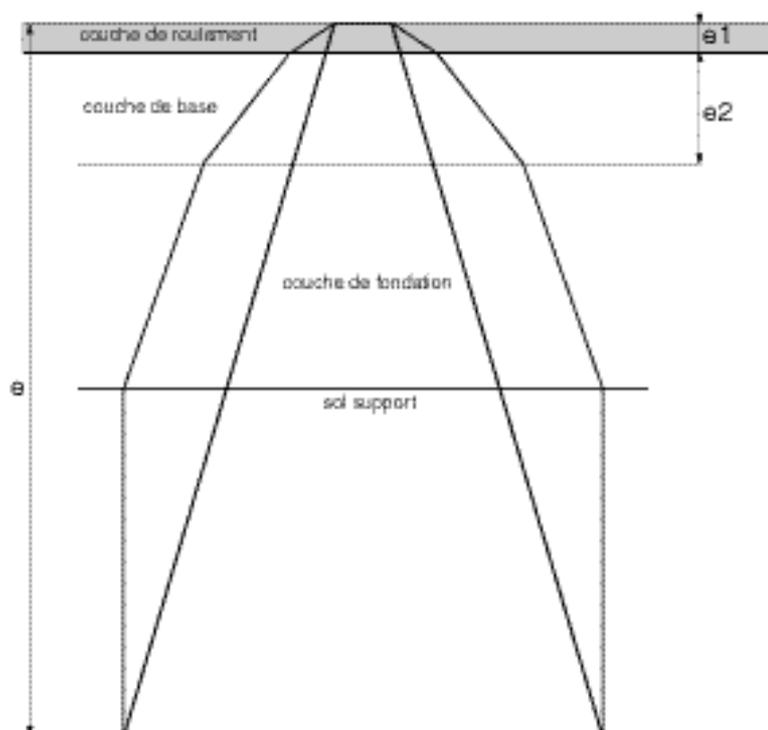


5-8 Généralisation de la méthode de détermination de la roue simple équivalente



5-9 Abaque de calcul pour un bogie de 4 roues correspondant à une pression de pneumatiques de $1,2 \pm 0,3$ MPa

5-2-5 Choix d'une constitution de chaussée



5-10 Construction graphique de l'épaisseur équivalente d'une chaussée souple

L'**épaisseur équivalente** d'une **couche de chaussée souple** est celle de la tranche de la chaussée équivalente à laquelle elle se substitue. Ainsi, l'épaisseur équivalente de la chaussée est-elle égale à la somme des épaisseurs équivalentes de ses différentes couches.

Le retour à la figure 5-4 permet de concevoir que l'épaisseur équivalente d'une couche de chaussée soit égale au produit de l'épaisseur réelle, qui lui est attribuée, par un **coefficient d'équivalence** rapportant la qualité de portance de son matériau à celle de la «grave concassée bien graduée» prise pour référence par la méthode C.B.R. La figure 5-10 superpose la chaussée équivalente correspondant au corps de chaussée schématisé par la figure 5-4, le parallélisme des génératrices supposant que les matériaux composant la couche de fondation aient un coefficient d'équivalence égal à 1.

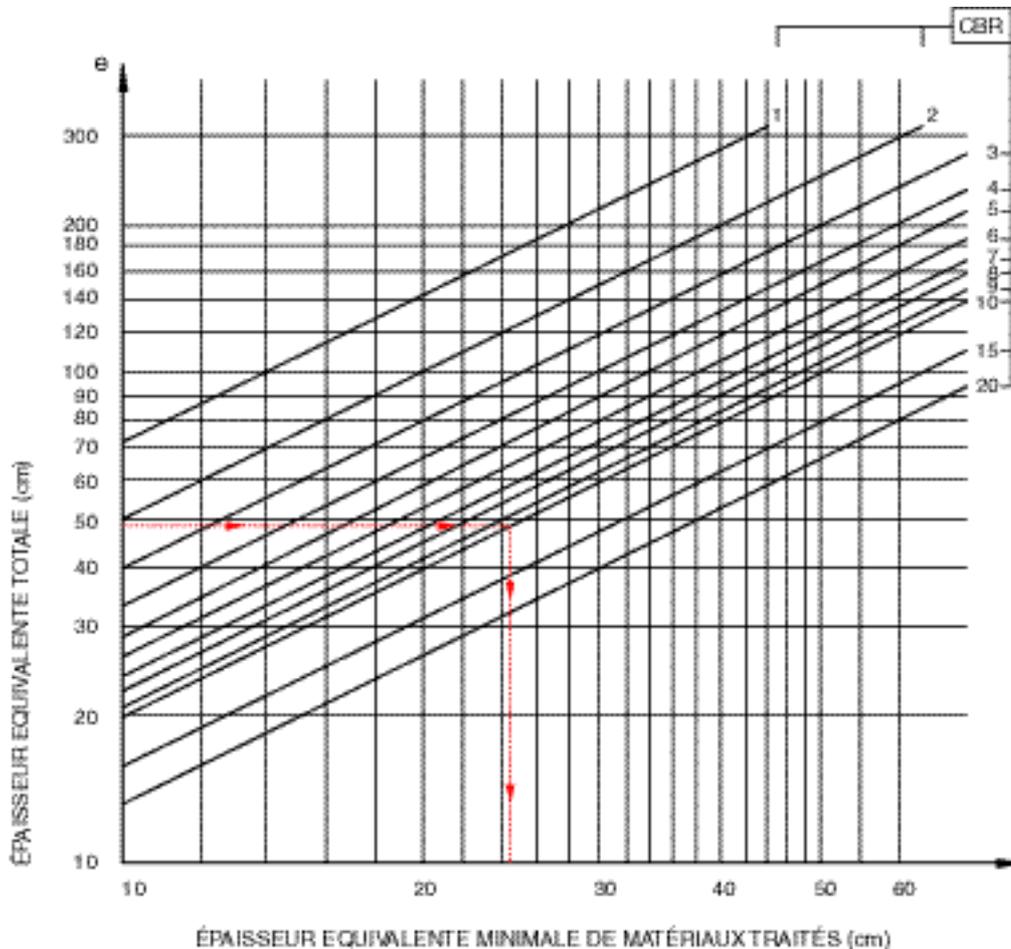
Les valeurs des coefficients d'équivalence des principaux types de matériaux pouvant entrer

dans la constitution d'un corps de chaussée souple à usage aéronautique sont les suivantes :

béton bitumineux à module élevé*	2,5
béton bitumineux aéronautique standard (NF P 98 131)	2
enrobé à module élevé*	1,9
grave bitume standard	1,5
grave émulsion	1,2
grave concassée bien graduée	1
grave roulée	0,75
sable	0,5

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

* Les coefficients d'équivalence des bétons bitumineux et enrobés à modules élevés concernent des matériaux conformes aux normes NF P 98 141 et NF P 98 140 et résultent d'expérimentations récentes. En raison du manque de recul sur le comportement de ces matériaux à l'échelle de la durée de vie des chaussées aéronautiques, ces coefficients pourront être ultérieurement révisés.



5-11 Abaque donnant l'épaisseur équivalente minimale de matériaux traités

Ainsi l'abaque de la figure 5-11 donne-t-il l'épaisseur équivalente minimale recommandée de matériaux traités en fonction de l'épaisseur équivalente totale e de la chaussée et de l'indice C.B.R. du sol support.

La **couche de roulement** d'une chaussée souple à usage aéronautique est habituellement réalisée en béton bitumineux répondant à la norme NF P 98 131 sur une épaisseur d'au moins 5 cm. Faute d'être encore suffisamment expérimentés, les bétons bitumineux très minces (B.B.T.M.) sont pour l'instant déconseillés sauf pour les chaussées légères des petits aérodromes, également aptes à admettre les enduits multicouches sous réserve de précautions de mise en œuvre toutes particulières.

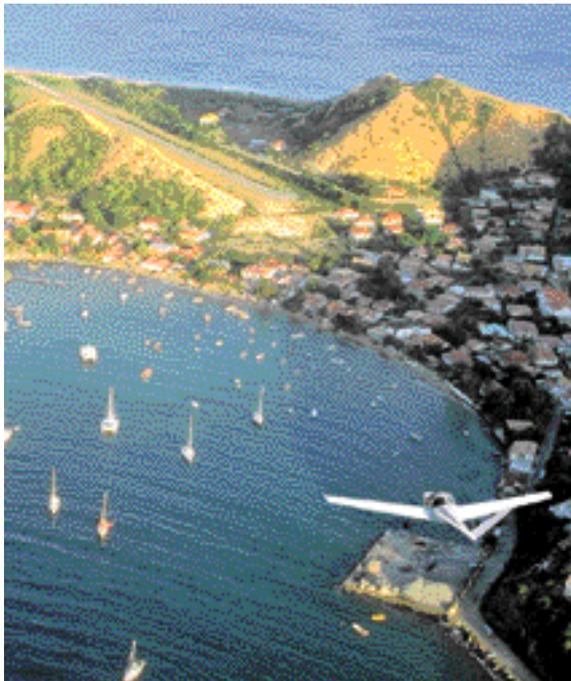
Recommandée pour la **couche de base**, la grave bitume est d'un coût trop élevé pour être égale-

ment utilisée en **couche de fondation** pour laquelle on lui préfère généralement des matériaux non traités.

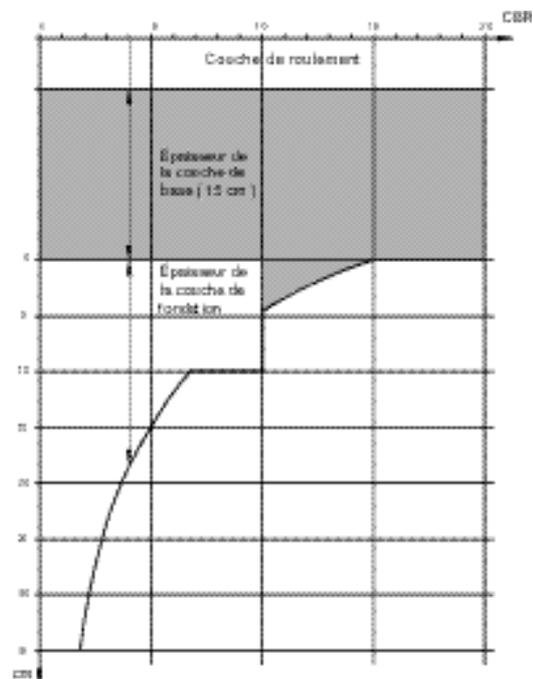
Sans être pour autant exclue, l'utilisation de matériaux traités aux liants hydrauliques n'est pas recommandée pour les chaussées aéronautiques eu égard aux phénomènes de retrait dont ils sont le siège ainsi qu'aux charges d'entretien qui en résulteraient en l'absence de dispositions particulières*.

* Ces matériaux pourront, en effet, être mis en œuvre en couche de fondation moyennant des dispositions constructives spécifiques (procédés anti-remontée de fissures, joints actifs) ou lorsque la couverture enrobée sera telle que les remontées de fissures de retrait ne seront pas à craindre. On attribuera alors aux matériaux de cette couche un coefficient d'équivalence de 1,5.

5-2-6 Cas des chaussées légères revêtues et non revêtues



Aérodrome des Saintes - Guadeloupe



5-12 Abaque de dimensionnement des chaussées légères

Destinées exclusivement aux avions dont la masse totale n'excède pas 5,7 t, les **chaussées légères** font l'objet d'une méthode de dimensionnement simplifiée.

La couche de roulement, qui leur est le mieux adaptée, est soit un tapis bitumineux de 5 cm d'épaisseur soit, malgré ses inconvénients signalés en 6-5-3 et si les contraintes économiques l'imposent, un enduit bicouche sur imprégnation de la couche de base. Les techniques ne diffèrent pas de celles en usage dans le domaine routier, attention devant toutefois être portée à ce que les formulations d'agrégats soient celles correspondant à un très faible trafic.

Se satisfaisant d'une grave non traitée partiellement concassée, la couche de base aura, en règle générale, une épaisseur de 15 cm.

Seule la couche de fondation sera dimensionnée par la méthode C.B.R. à l'aide de l'abaque reproduit par la figure 5-12 sur lequel les épaisseurs lues s'entendent en valeurs réelles et non en valeurs équivalentes.

À noter que la surépaisseur de 0 à 5 cm, qui est

indiquée sur l'abaque pour la couche de base lorsque l'indice C.B.R. du sol porteur est compris entre 10 et 15, de même que le décrochement, qui est imprimé à la courbe, lorsque ce même indice est compris entre 5 et 10, résultent de ce que la couche de fondation - elle-même constituée par un matériau peu coûteux de type graveleux ou sableux disponible sur place - ne peut avoir une épaisseur inférieure à 10 cm (correspondant à une dimension maximale D de ses grains égale à 40 mm).

Plutôt que de constituer une couche de fondation par matériaux d'apport, option pourra être également choisie d'améliorer le sol en place sur la même épaisseur, soit par un apport de sable (afin de le rendre moins sensible à l'eau et en faciliter le compactage), soit par addition de chaux (donnant des retraits moins importants que le ciment) dans une proportion ne dépassant pas 4 %.

Le même **abaque de dimensionnement** peut être utilisé pour les **chaussées non revêtues** - pour lesquelles on retient également une épaisseur de 15 cm pour la première couche de chaussée sous engazonnement.

5-3 Dimensionnement des chaussées rigides



Sondage mettant en évidence les différentes couches de matériaux

Une **chaussée rigide** est constituée par un ensemble de dalles en béton de ciment reposant sur une fondation, de préférence en béton maigre, ayant une faible incidence dans le calcul mais dont la fonction est :

- d'assurer la continuité de l'appui des dalles au



Aéropport de Toulouse-Blagnac - Aire de stationnement en béton

droit des **oints**,

- de contribuer à la **protection contre le gel** du sol support,
- de s'opposer à la montée des fines par pompage au droit des joints

et, accessoirement, d'offrir une surface stable pour le déroulement des travaux de bétonnage.

Dans le cas d'une fondation en grave ciment, une couche de béton poreux sera interposée entre la dalle de béton et sa fondation afin d'assurer une fonction de drainage.

Une sous-couche (drainante ou anticontaminante) peut être souhaitable, dans certains cas, entre le sol support et la fondation.

5-3-1 Comportement d'une chaussée rigide

Soumise à la charge d'une roue d'atterrisseur, la dalle en béton répartit sur sa fondation - et celle-ci sur le sol support - la fraction de cette charge à laquelle elle n'a pas elle-même opposé réaction par déformation élastique.

Cette répartition s'effectuant sur une large surface, on conçoit que les premiers désordres de structure se déclareront, non pas dans le sol support, mais dans la dalle de béton, lorsque sa flexion ne pourra plus suivre la déformation de son assise en restant dans le domaine élastique.

Rattachée à deux axes constituant un plan parallèle à la dalle au repos, la déformation verticale $w(x, y)$ de celle-ci, dont on cherche à déterminer la limite admissible, est fonction des caractéristiques mécaniques de la dalle (module élastique et coefficient de Poisson), de son épaisseur, de la charge qui lui est appliquée et de la réaction $p(x, y)$ qui lui est opposée par le sol support.

Égale à celle du sol support, la déformation $w(x, y)$ est fonction des caractéristiques mécaniques de ce dernier et de la répartition $|p(x, y)|$ de la charge appliquée.

Concernant le sol support, la méthode de Westergaard prend pour première hypothèse que le sol support exerce en chaque point une réaction proportionnelle à l'enfoncement vertical de celui-ci

$$|p(x, y)| = K_o \cdot w(x, y)$$

Revenant à la dalle avec cette première hypothèse, Westergaard fait ensuite celles que :

- la théorie des plaques lui est applicable,

- les charges sont appliquées au centre d'une plaque infinie.

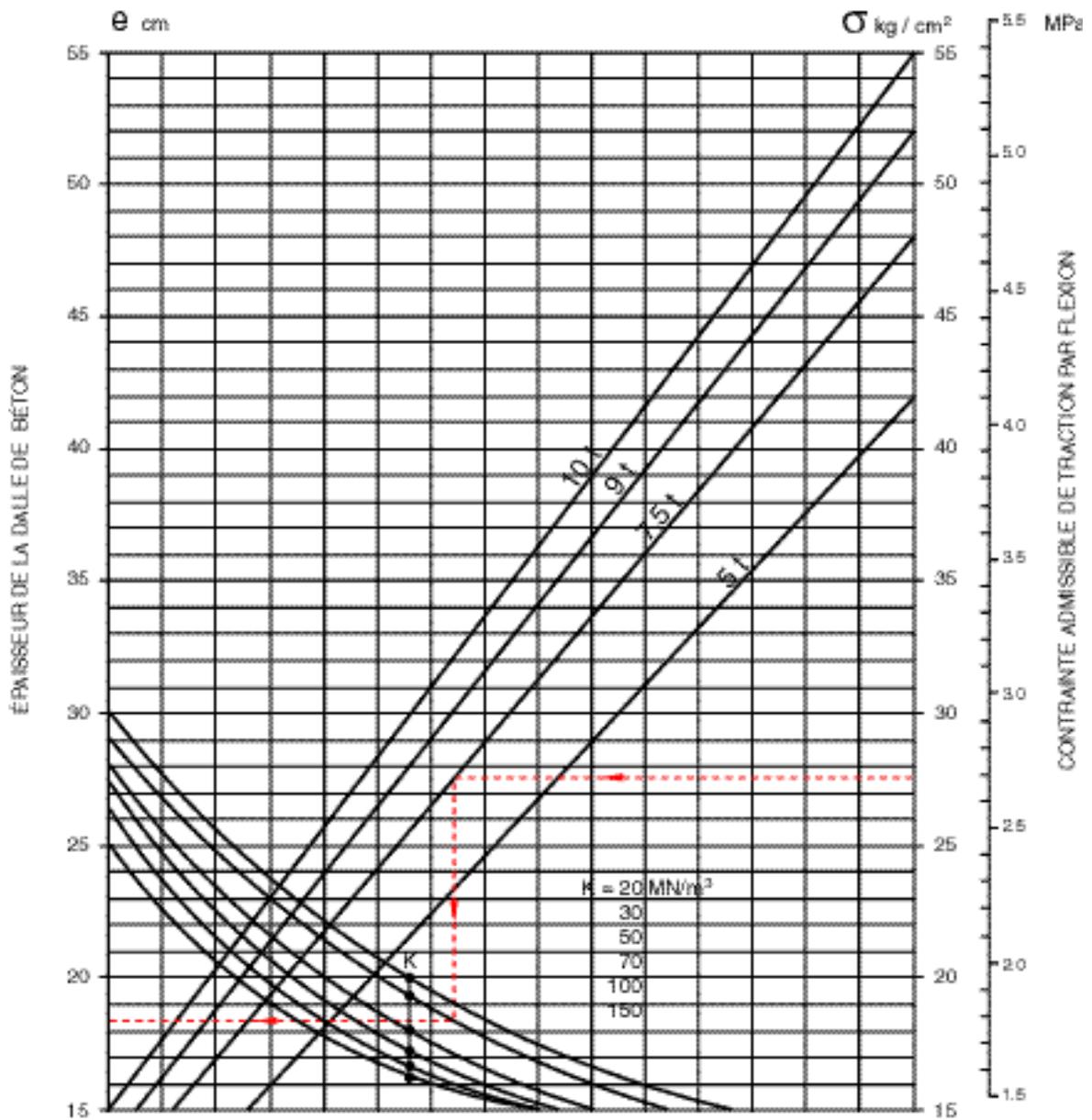
*Rendue possible grâce aux hypothèses simplificatrices de Westergaard, l'écriture d'une relation entre, la charge appliquée, le **module de réaction** K_o du sol support, l'épaisseur de la dalle et la déformation de celle-ci - et par suite la contrainte maximale de traction sur l'une de ses fibres inférieures - n'est malheureusement exploitable, pour le dimensionnement des chaussées, que par l'usage des abaques qu'elle permet de construire.*

Le schéma simple applicable aux chaussées souples ne l'étant pas ici, la superposition des effets correspondant aux différentes roues d'un jumelage ou d'un boggy ne permet pas en outre de déduire «manuellement» la construction de l'abaque utilisable pour telle configuration de l'atterrisseur de celui composé pour une roue simple isolée.

*Les **abaques de dimensionnement** correspondant aux deux «atterrisseurs types» à roues jumelées et à boggy de quatre roues ne sont par suite reproduits ci-après, après ceux utilisables pour une roue simple isolée, qu'en raison de ce que les rapports d'auscultation produits par le S.T.B.A. y font référence.*

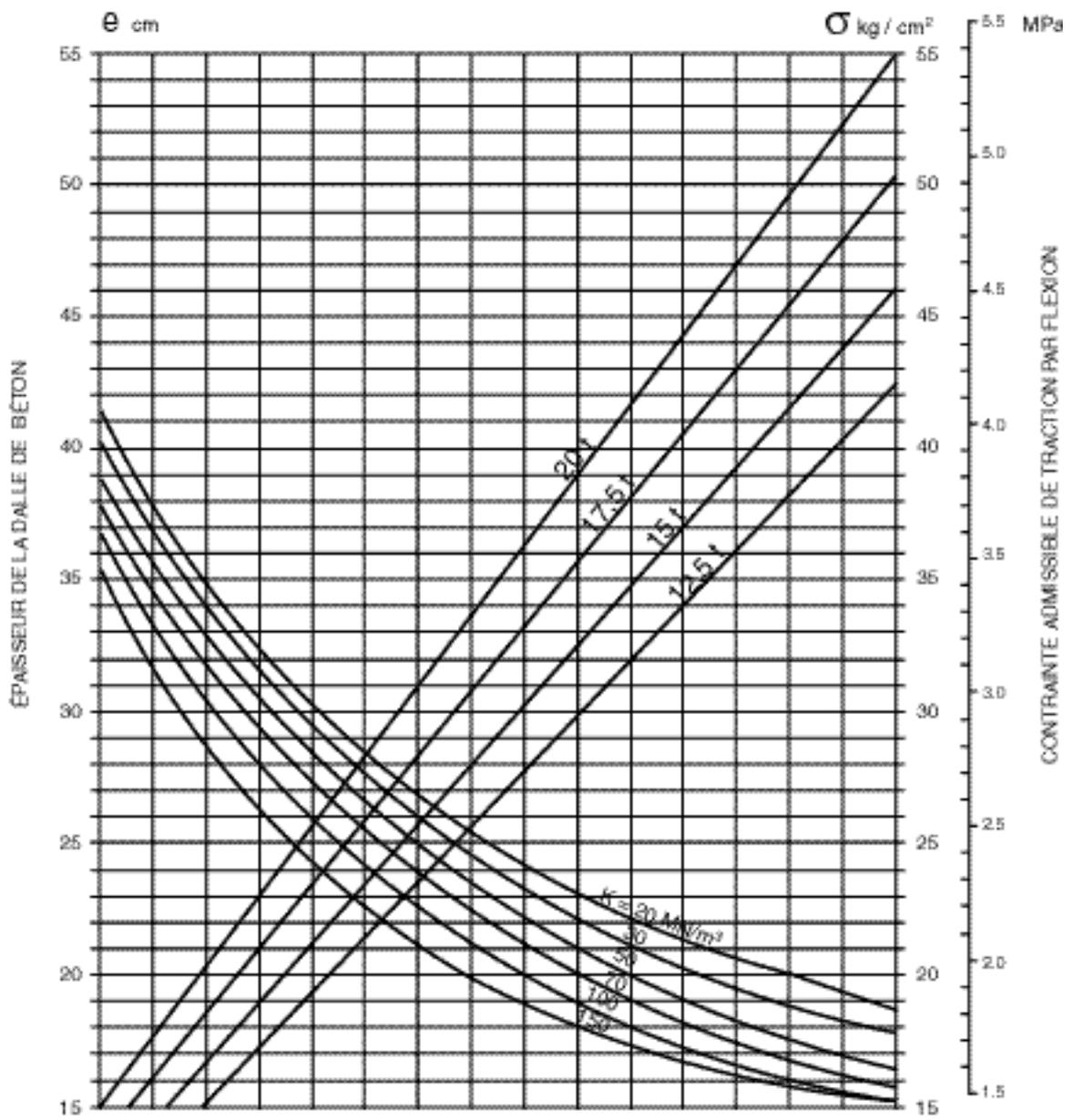
Indiquons encore que les abaques construits par le S.T.B.A. - et disponibles auprès de lui - pour les différents types d'atterrisseurs en service prennent pour hypothèse que les pneumatiques ont des empreintes elliptiques dont les longueurs d'axes sont dans le rapport de 0,67.

Atterrisseur type à roue simple isolée
(pression du pneumatique de 0,60 MPa)



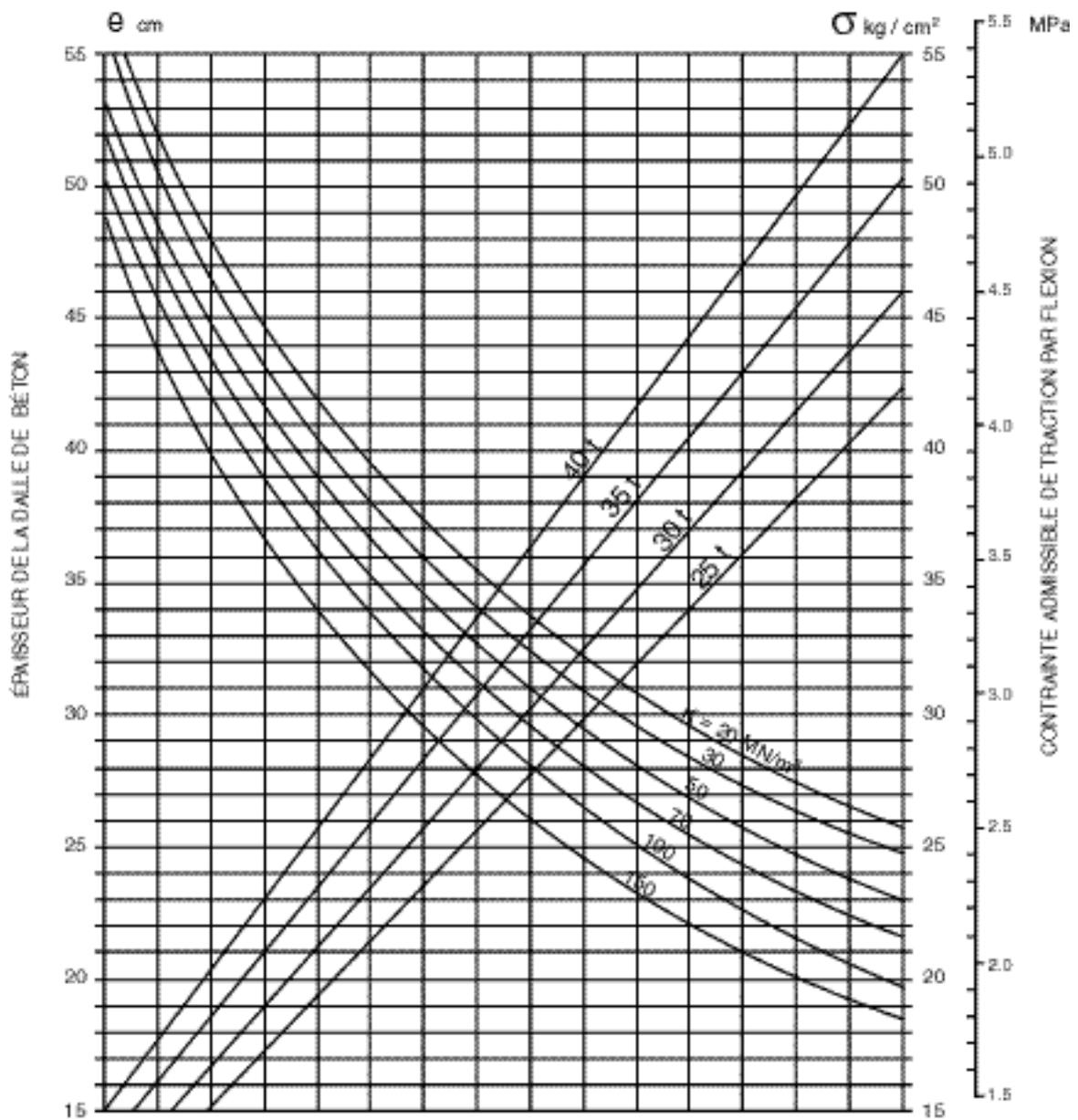
1 - charges inférieures à 10 t
(le cheminement marqué en rouge indique le mode d'utilisation de cet abaque comme de ceux lui faisant suite)

Atterrisseur type à roue simple isolée
(pression du pneumatique de 0,60 MPa)



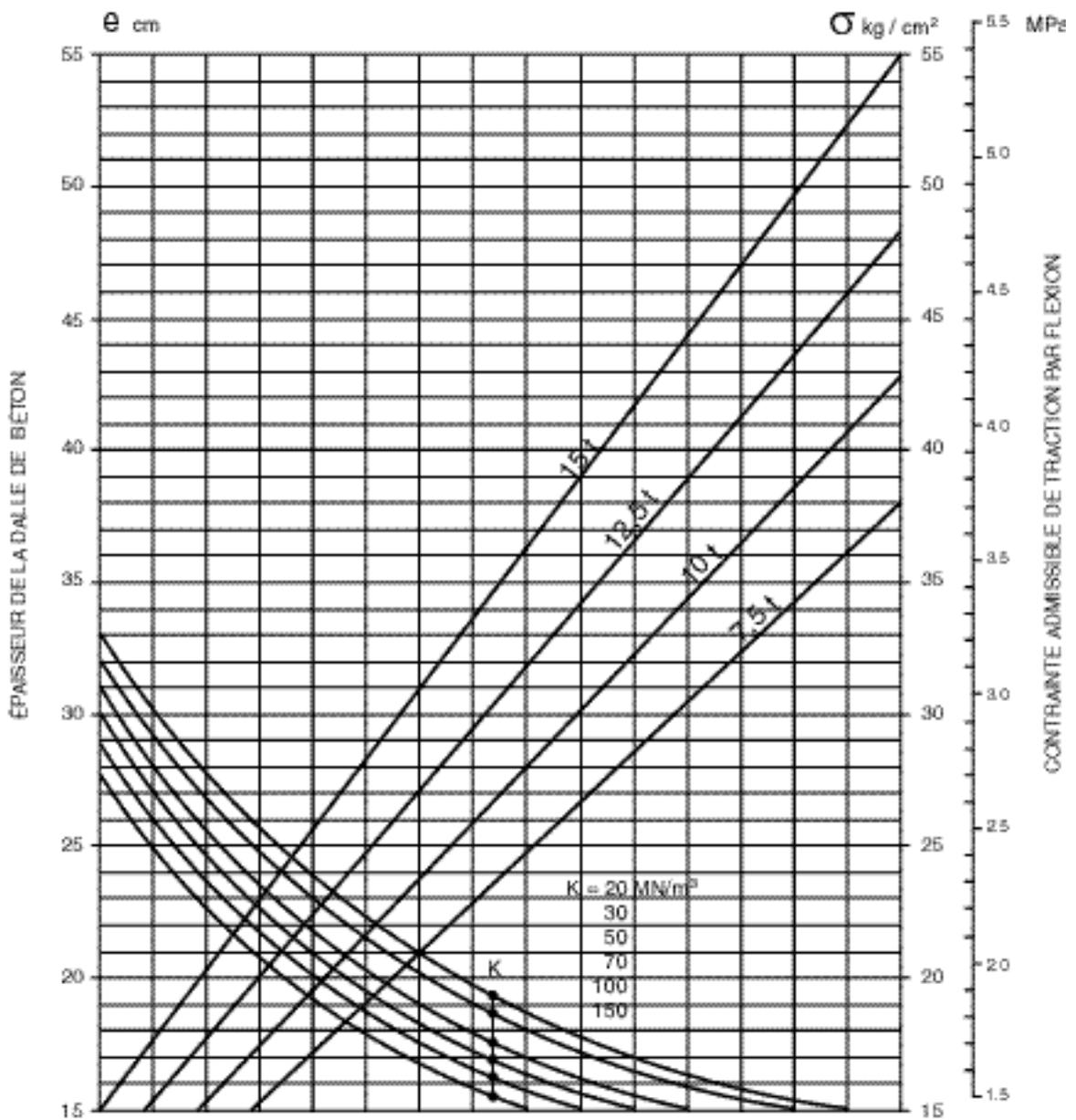
2 - charges comprises entre 10 t et 25 t

*Atterrisseur type à roue simple isolée
(pression du pneumatique de 0,60 MPa)*

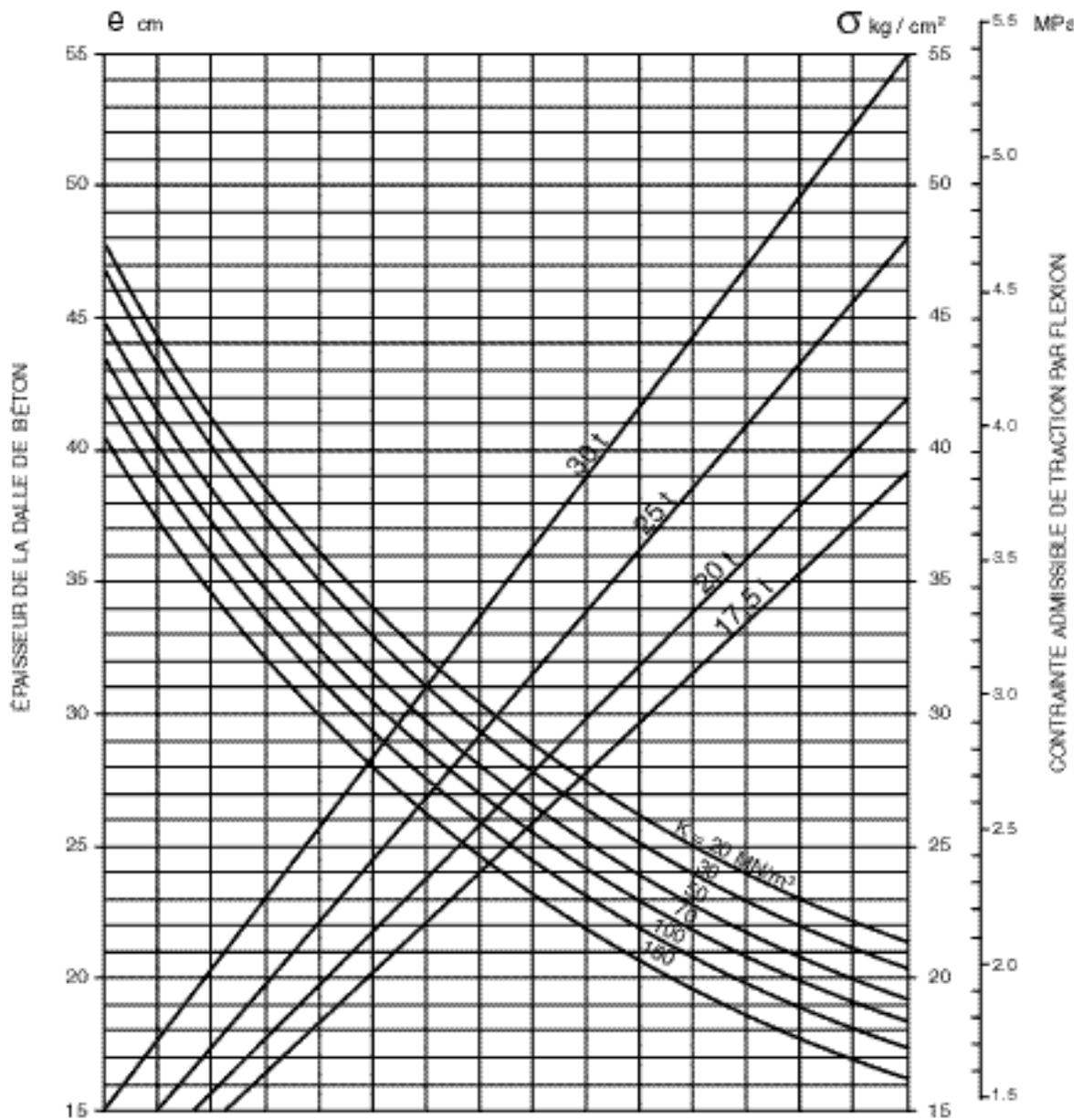


3 - charges supérieures à 25 t

Atterrisseur type à jumelage
 (pression des pneumatiques = 0,90 MPa - voie = 0,70 m)

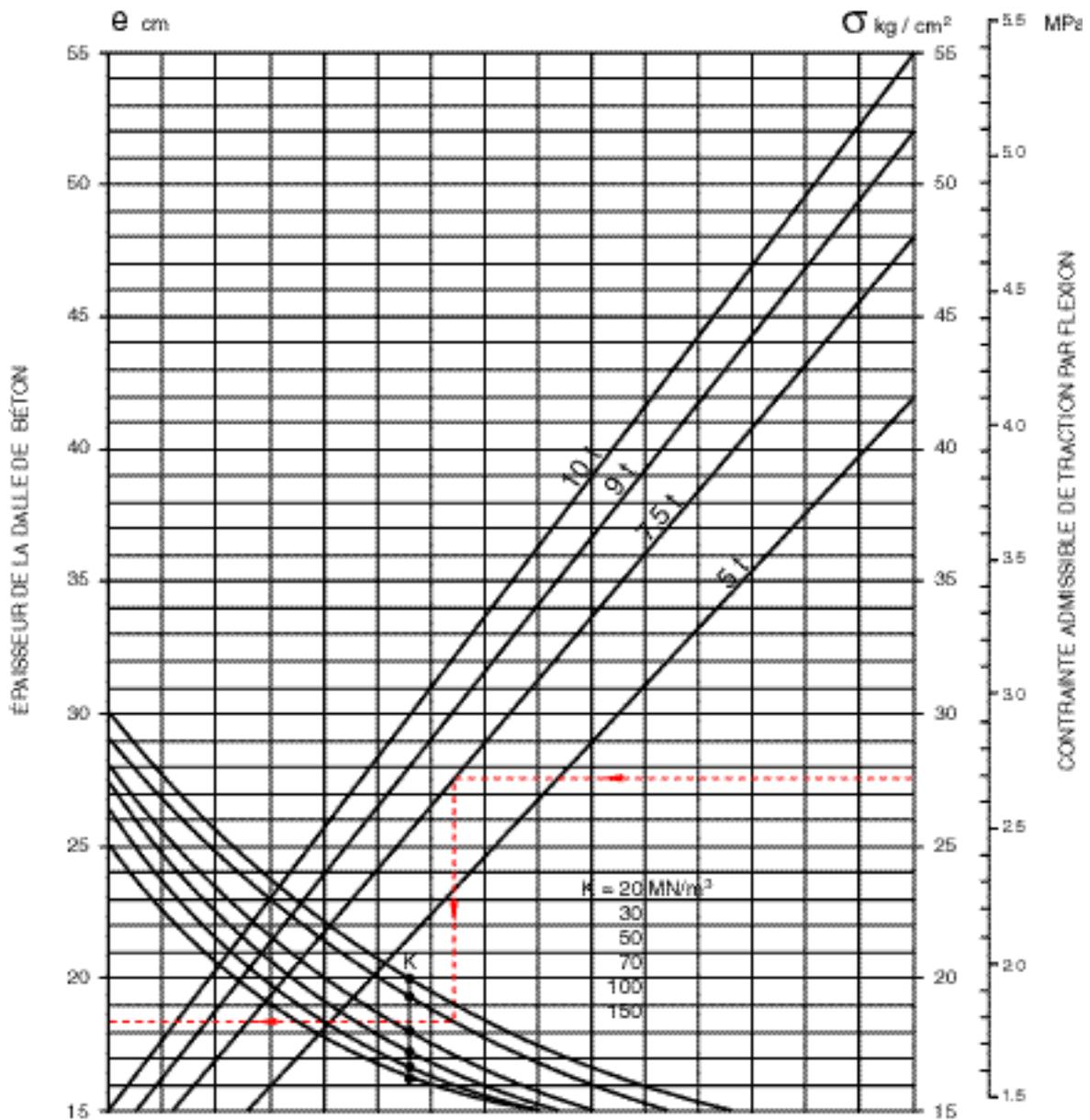


*Atterrisseur type à jumelage
(pression des pneumatiques = 0,90 MPa - voie = 0,70 m)*

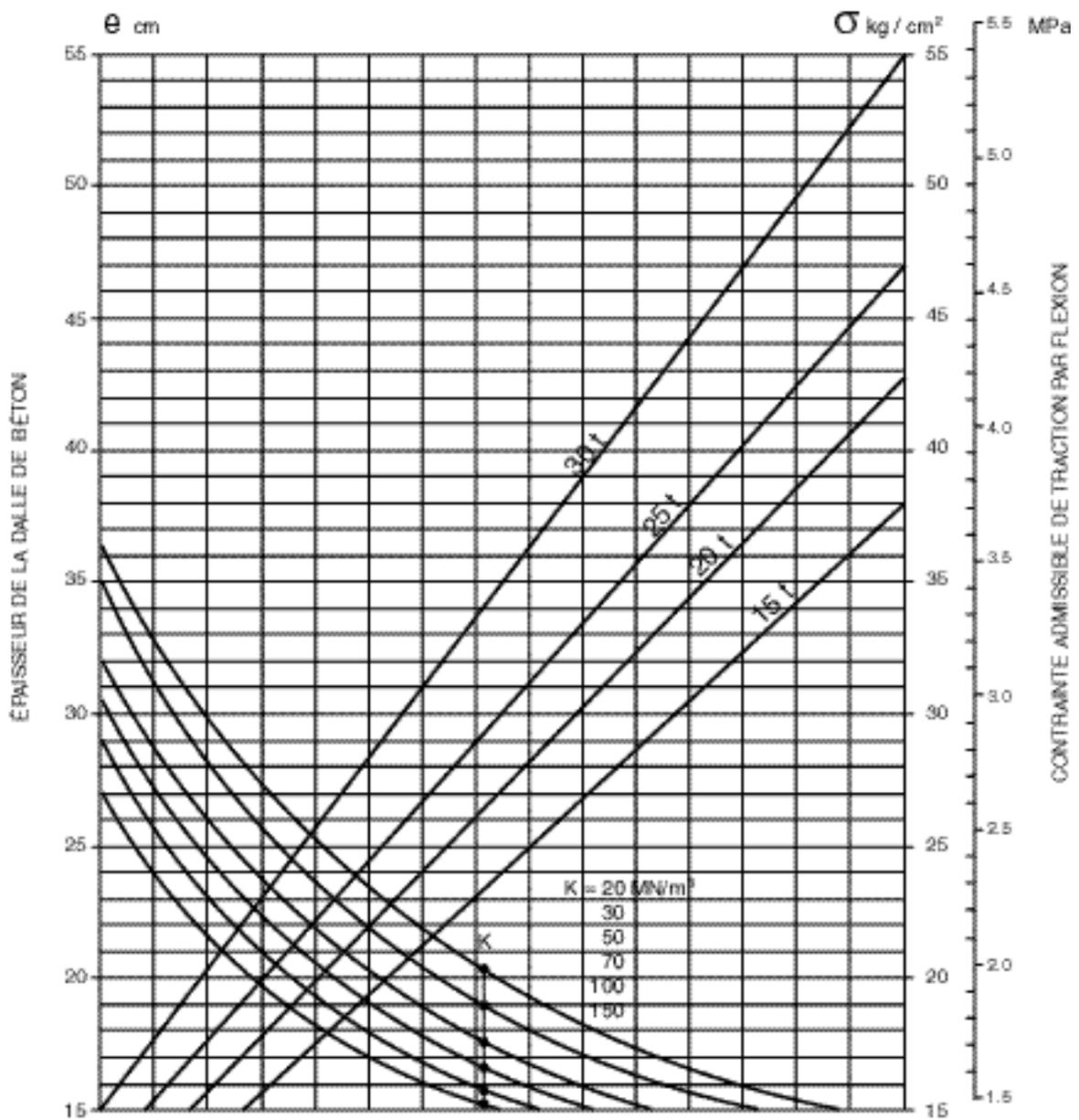


5 - charges comprises entre 15 t et 32,5 t

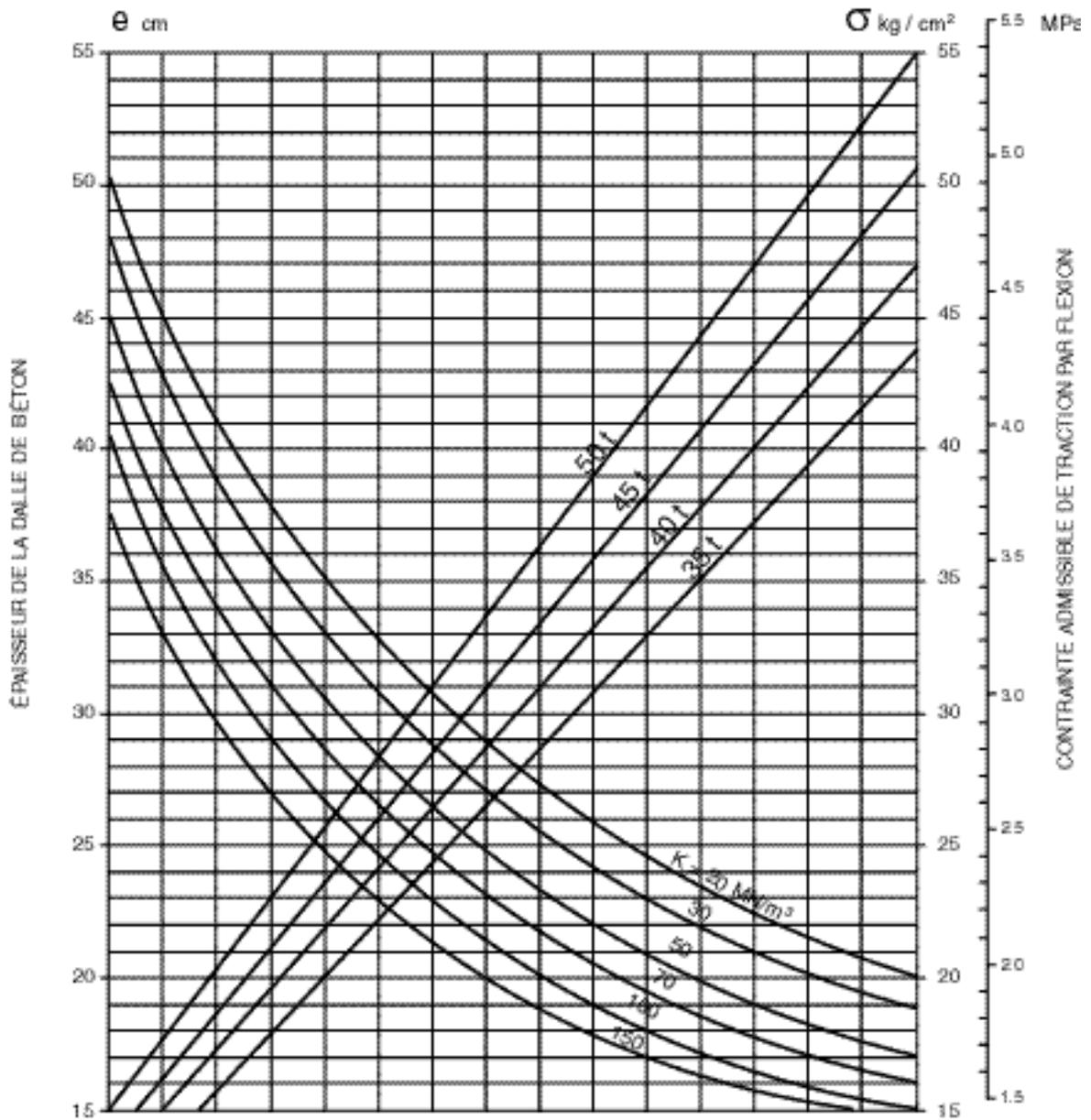
*Atterrisseur type à jumelage
(pression des pneumatiques = 0,90 MPa - voie = 0,70 m)*



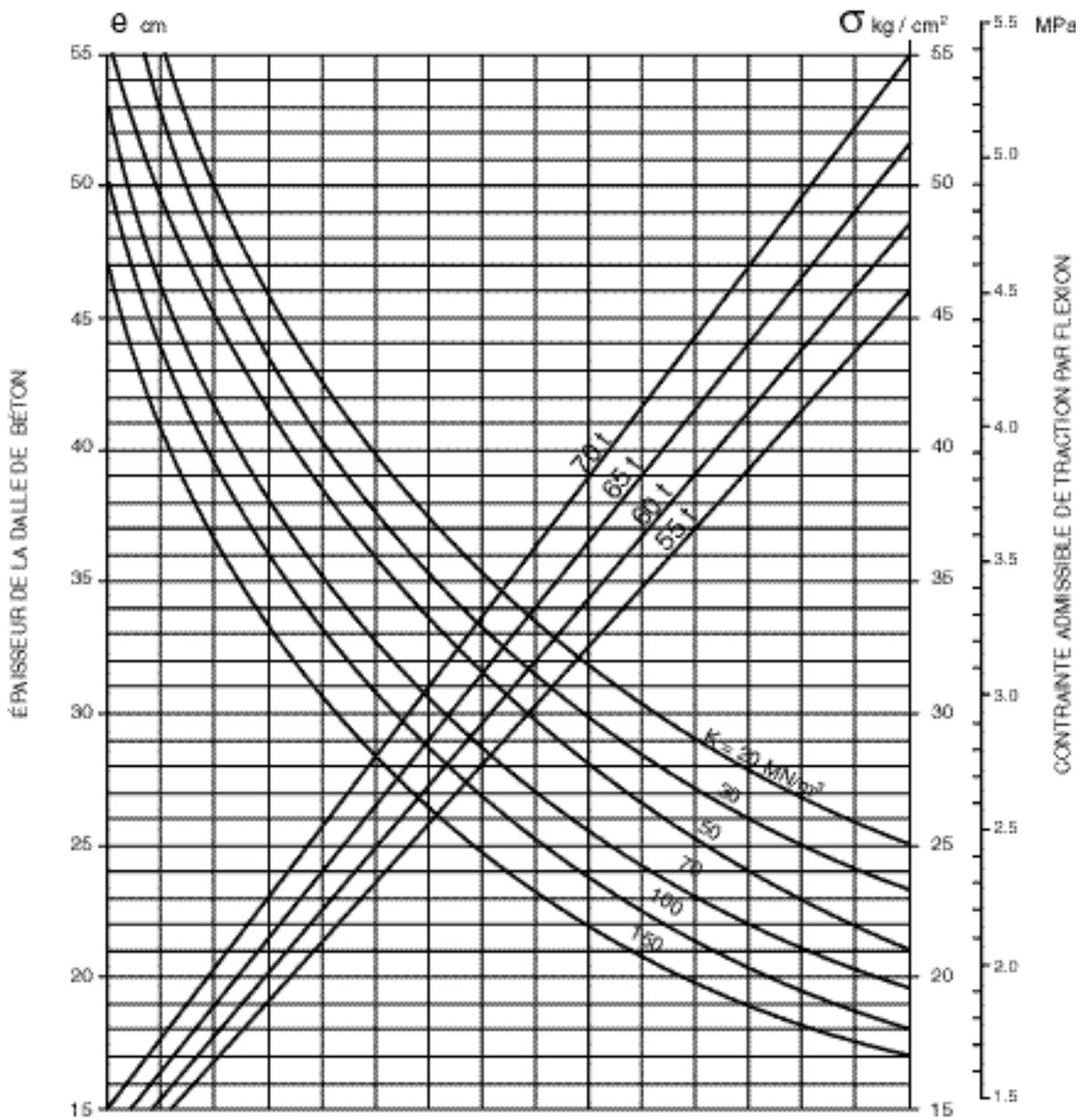
Atterrisseur type à boggie à quatres roues
 (pression des pneumatiques = 1,20 MPa - voie = 0,75 m - empattement = 1,40 m)



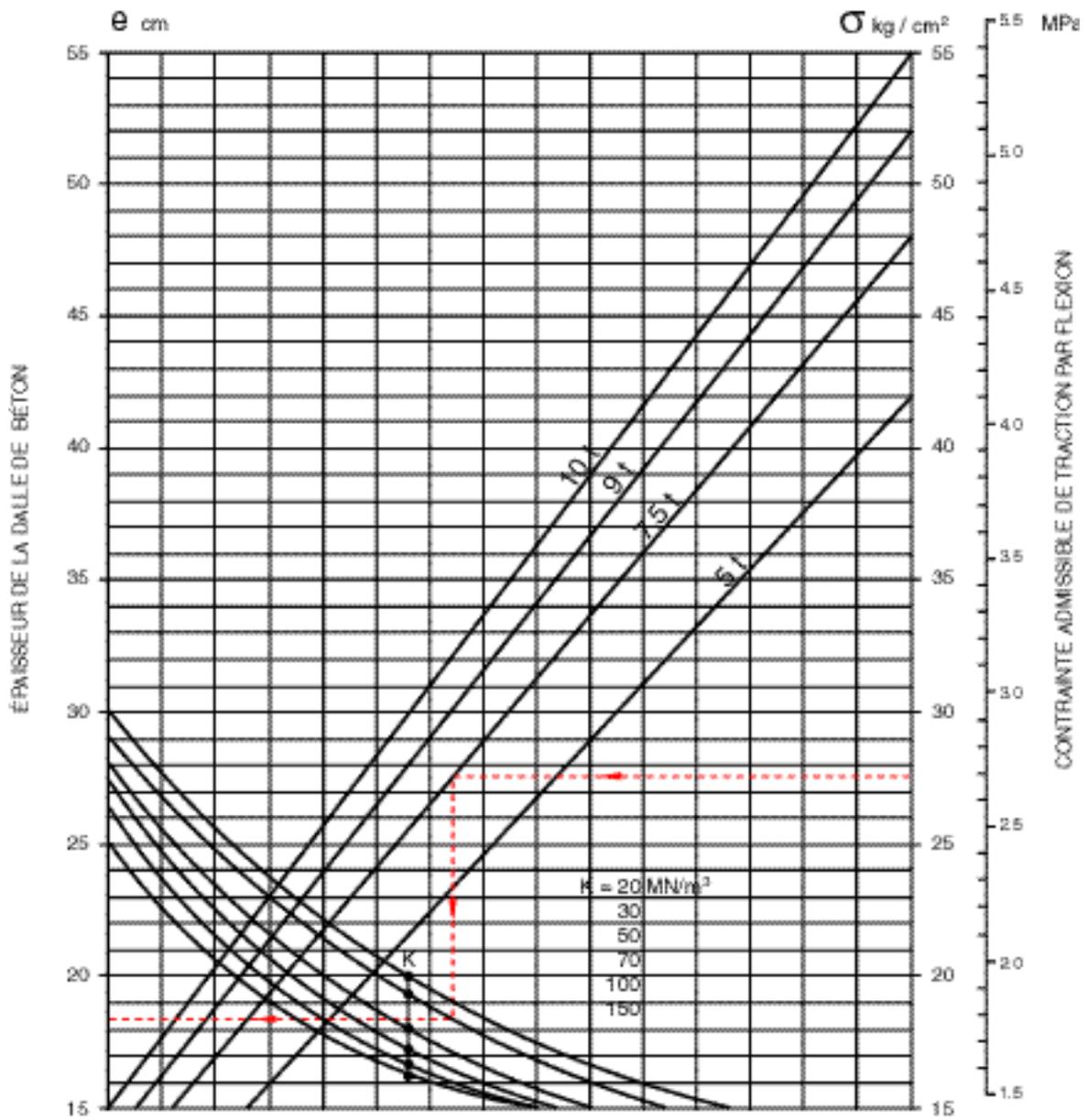
Atterrisseur type à boggie à quatre roues
 (pression des pneumatiques = 1,20 MPa - voie = 0,75 m - empattement = 1,40 m)



Atterrisseur type à bogie à quatre roues
 (pression des pneumatiques = 1,20 MPa - voie = 0,75 m - empattement = 1,40 m)



Atterrisseur type à boggie à quatre roues
 (pression des pneumatiques = 1,20 MPa - voie = 0,75 m - empattement = 1,40 m)



5-3-2 Détermination du module de réaction

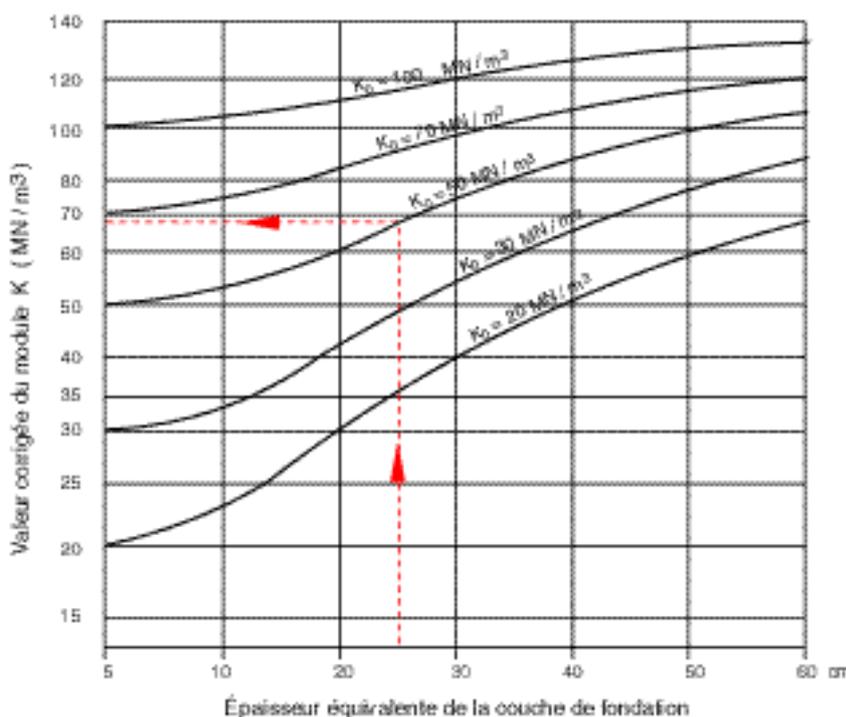
Le **module de réaction** est obtenu par essai de plaque *in situ*, le sol ayant été préalablement compacté à 95 % de l'**optimum proctor modifié** sur une épaisseur correspondant à celle prévue à la réalisation des travaux (de l'ordre d'une trentaine de centimètres). Choisie très rigide, une plaque circulaire de 75 cm de diamètre transmet au sol une pression maintenue constante de 0,7 kg / cm² jusqu'à ce que l'enfoncement ait atteint une valeur *w* ne progressant pratiquement plus. Le module de réaction K_o est alors donné par la formule

$$K_o = \frac{0,7}{w}$$

Il est à noter que la plaque étant rigide, elle provoque des ruptures du sol sur son pourtour desquelles résulte que la valeur mesurée *w* est liée à son diamètre. L'essai de plaque doit par suite être considéré comme empirique et ne pas être modifié.

Bien que, comme déjà souligné ci-dessus, la couche de fondation n'ait qu'une faible incidence dans le calcul, son existence, de même que celle de toute autre couche interposée entre le sol support et la dalle de béton, ne peut manquer d'être prise en compte dans le dimensionnement de cette dernière.

Cette prise en compte s'effectue par correction du module de réaction K_o du sol support à l'aide de l'abaque ci-après (figure 5-13) faisant intervenir l'**épaisseur équivalente** de l'ensemble constitué par la couche de fondation et les éventuelles autres couches mises en œuvre sous la dalle de béton. Signalons que le coefficient d'équivalence habituellement adopté pour les bétons maigres de fondation est de 1,5.



5-13 Abaque permettant de corriger le module de réaction du sol support en fonction de l'épaisseur équivalente de la couche de fondation éventuellement complétée par celle des autres couches de matériaux interposées entre le sol support et la dalle de béton

5-3-3 Prise en compte des joints de chaussée

Ainsi qu'il a déjà été indiqué, le dimensionnement des chaussées rigides prend pour hypothèse simplificatrice celle de l'application des charges sur une dalle de dimensions horizontales infinies.

Les discontinuités introduites par les joints conduisent par suite à augmenter l'épaisseur de la dalle. Plutôt que de majorer celle-ci au sortir de l'abaque, il a été choisi d'introduire la **prise en compte des joints** à l'entrée de celui-ci en minorant la contrainte admissible du béton. Ayant pour valeur celle extraite du tableau ci-après, cette correction n'intervient que pour le dimensionnement des dalles adjacentes à ce même joint.

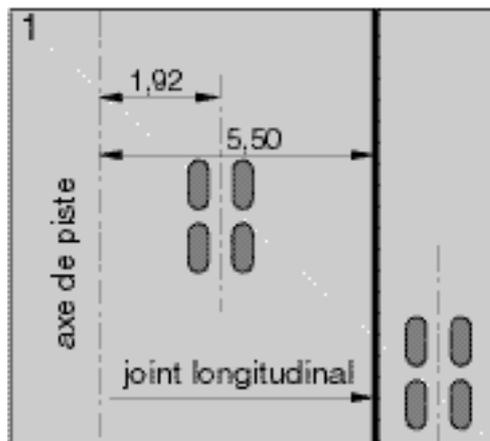
Nature du dispositif de transfert de charge des joints transversaux *	Coefficient de sécurité
Sans dispositif	2,6
Goujons	1,8

(*) les joints longitudinaux ayant toujours un profil sinusoïdal

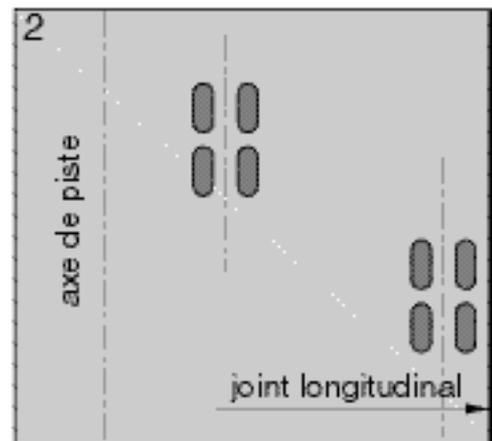
Le calepinage des joints de retrait sera prévu dès l'origine du projet en tenant compte des éléments suivants :

- la dimension maximale des dalles par référence à leur épaisseur e (en général on admet $L < 25 e$),
- l'axe de roulement des avions,
- la géométrie des trains d'atterrissage (aires de stationnement sur lesquelles il faut éviter un appui en coin de dalle),
- les points d'appui des passerelles et autres appareils (pour les mêmes raisons).

Ainsi que la figure 5-14 en montre l'intérêt, la disposition des joints longitudinaux par rapport à l'axe de la chaussée (piste ou voie de circulation) devra également être étudiée de façon 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.



Exemple du B 747
Cas défavorable : risque de chevauchement alterné du joint longitudinal par les boggies du B 747



Cas favorable : chargement d'un même côté par rapport au joint longitudinal. Des dispositions constructives doivent cependant être prises pour empêcher la fissuration possible en raison de la grande largeur de la dalle (exemples : treillis, armatures).

5-3-4 Le béton armé continu



Béton armé continu - Recouvrement des aciers longitudinaux

Si, dans les structures à dalles courtes, goujon - nées ou non, les joints permettent d'éviter une fis - suration aléatoire de retrait, ils restent des points faibles de la structure et une sujétion pour l'entre - tien.

*Pour éliminer la présence des joints transversaux, une solution est d'utiliser la technique du **béton armé continu** (B.A.C.), c'est-à-dire d'employer des armatures métalliques longitudinales conti - nues **disposées en fibre neutre** de la dalle. Celles - ci répartissent alors par adhérence, avec des fis - sures nombreuses (pas moyen de 1,5 m) mais fines ($< 0,7$ mm), les déformations dues au retrait du béton.*

Les aciers ne participant pas au calcul de la dalle, le dimensionnement de cette dernière est effectué par la même méthode que celle décrite précédem - ment, en prenant en compte le coefficient de sécu - rité correspondant aux joints goujonnés. La sec - tion et le nombre d'aciers ronds H.A. à poser sont déterminés de façon à représenter 0,67 % de la section du béton.

Une seule réalisation relative à une piste existe actuellement en France, pour laquelle l'option «entretien zéro» avait été prise en compte dans le jugement des offres. Cette option était toujours vérifiée au moment de la rédaction de ce texte, soit neuf ans après la mise en service de l'ouvrage.

5-4 Accotements



Aéroport Nice Côte-d'Azur - Vue générale de chaussées aéronautiques et de leurs accotements

Les accotements sont spécialement traités de manière à ce que soient évitées les projections ou ingestions de corps étrangers par les groupes motopropulseurs. Ainsi, ils présenteront une surface exempte de matériaux non fixés.

En outre, des véhicules terrestres peuvent être amenés à circuler sur les accotements, notamment en cas de force majeure (intervention d'un véhicule de sécurité à la suite d'un incident).

Sur les aérodromes de **lettre de code D, E ou F**, il convient de traiter les accotements sur toute leur largeur par la mise en œuvre d'une couche de 20 cm au moins de grave naturelle et d'un revêtement constitué par une couche de béton bitumineux de 4 cm d'épaisseur au moins pour les **accotements de voies de relation** et de 6 cm d'épaisseur au moins pour les **accotements de pistes**, mise en place après imprégnation de la grave et couche d'accrochage.

Sur les aérodromes de **lettre de code D** recevant occasionnellement des quadricoptères et les aérodromes de **lettre de code E** situés dans une région dont le climat garantit la tenue de l'engazonnement, une solution mixte pour les accotements de

piste suffit, consistant en une protection renforcée telle que décrite dans le paragraphe précédent sur 3 à 4,5 m de largeur et en une protection légère en gazon dense sur le reste. Toutefois, pour les **raquettes de retournement**, une protection renforcée est recommandée. En effet, la fréquence et la puissance du souffle des groupes motopropulseurs lors du retournement des avions sur les raquettes et de leur alignement avant décollage nécessitent de prévoir une largeur d'accotement revêtu suffisante et une résistance au souffle adaptée.

Au delà des accotements, les **abords de pistes** sont traités de manière à réduire le danger que pourrait constituer pour un avion sortant accidentellement de la piste, la différence de portance entre la piste et ses accotements d'une part et les abords immédiats d'autre part.

5-5 Protection contre le gel

La caractérisation de la contrainte à laquelle une chaussée peut être soumise en ce domaine est fournie par l'**indice de gel** atmosphérique, dont les valeurs correspondant à l'**hiver exceptionnel** et à l'**hiver rigoureux non exceptionnel** sont disponibles auprès de la station météorologique la plus proche.

Exprimée en °C. jour, la valeur de l'indice de gel est celle de l'intégrale de la partie négative de la courbe annuelle de température.

Trois niveaux de **protection contre le gel** sont possibles, qui dépendent de l'importance de l'aérodrome et de la fonction de la chaussée.

La **protection totale** est déterminée être telle que la profondeur de gel correspondant à l'**hiver exceptionnel** ne puisse atteindre les couches gélives du sol support ou celles de la chaussée s'il se trouvait en exister.

La **protection forte** est définie sur le même principe, que l'est la protection totale, l'**hiver rigoureux non exceptionnel** se substituant à l'hiver exceptionnel.

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

- le gel puisse légèrement pénétrer dans les couches gélives,
- le trafic puisse être réduit pendant le dégel.

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

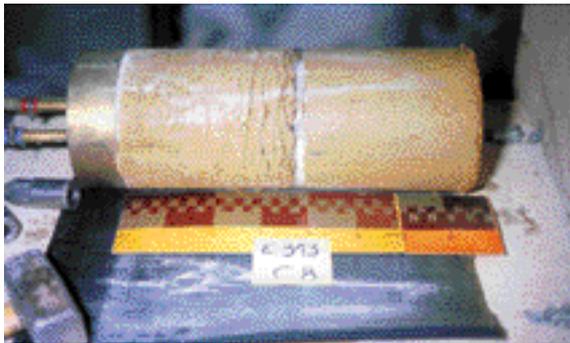
Trafic annuel de passagers de l'aérodrome	Niveau de protection
supérieur à 200 000	TOTALE
compris entre 50 000 et 200 000	FORTE
inférieur à 50 000	RÉDUITE

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

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

Dans un cas comme dans l'autre, il conviendra de vérifier à nouveau la protection contre le gel.

5-5-1 Caractérisation de la gélivité d'un sol



Éprouvette après essai de gonflement au gel

Lorsque l'isotherme 0°C atteint une couche de chaussée constituée par un sol gélif, l'eau de la nappe phréatique est pompée par capillarité vers le front de gel et constitue des lentilles de glace. Celles-ci provoquent des gonflements pendant la période de gel et s'opposent à l'évacuation de l'eau au moment du dégel.

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

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

On relèvera ici que les dimensions de cette quantité de gel sont celles d'un indice de gel élevées à la puissance $1/2$.

Cette relation sensiblement linéaire est intéressante en ce que la pente p de sa courbe représentative, exprimée en $\text{mm} / (^{\circ}\text{C} \cdot \text{heure})^{1/2}$, permet de classer un sol ou un matériau granulaire testé parmi :

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

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

4	si	$0,05 < p \leq 0,25$
$1/p$	si	$0,25 < p \leq 1$
0	si	$p > 1$

L'ensemble des essais effectués par les Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées de Nancy**, de Clermont-Ferrand et de Saint-Quentin a également permis, au premier cité de ces trois Laboratoires, de constituer une base de données. Donnant le pourcentage constaté de caractère gélif pour chacune des classes de matériaux selon leur nature, cette base ne saurait, lorsqu'une confirmation de non gélivité s'impose, se substituer à l'essai de gonflement pour tout matériau au sujet duquel tout soupçon n'aurait pas été levé par l'expérience.

Le corps de chaussée étant réputé constitué de

* lesquelles correspondent à un gonflement limité à 5 mm

** duquel on se rapprochera utilement pour toute démarche dépassant le cadre simplifié décrit ci-après

5-5-2 Sensibilité au gel de la plate-forme

matériaux non gélifs, le sol support est découpé, à partir de ses couches gélives, en tranches telles que leur sensibilité au gel ne puisse aller qu'en croissant avec la profondeur. Ceci revient à dire que toute couche de sol se voit, s'il en existe une, affecter la sensibilité au gel de la couche la plus gélive située au dessus d'elle.

La quantité de gel Q_g admissible en surface d'une couche gélive est nulle, dans le cas d'une protection totale ou forte, ou égale à la valeur limite indiquée précédemment, dans le cas d'une protection réduite.

À noter que, dans le cas où la première couche de matériau gélif a une épaisseur inférieure à 20 cm, la quantité de gel admissible en protection réduite est reconnue comme pouvant être égale à

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

relation dans laquelle

- Q_{g1} est la quantité de gel admissible de la couche supérieure,
- Q_{g2} est la quantité de gel admissible de la couche inférieure,
- h_1 est l'épaisseur en centimètres de la couche supérieure.

La protection thermique Q_{ng} , apportée par les matériaux non gélifs du sol support et de la couche de forme situés au dessus de la première

couche gélive de ce dernier est donnée par la formule

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

dans laquelle

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

Matériaux	A_n
Sols de classe A*	0,15
Sols de classes B et C*	0,13
Sols de classe D*	0,12
Limons traités à la chaux ou au ciment	0,14
Sables traités au ciment	0,17
Sables traités au laitier	
Cendres volantes	

(a) classes de sols non traités définies par la norme NF P 11-300- exécution des terrassements

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

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

* A, B, C et D sont les classes de sol non traité définies par la norme NF P 11-300 Exécution des terrassements

5-5-3 Protection thermique apportée par la structure de la chaussée

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

La démarche consiste, dans un premier temps, à traduire cet indice de gel en quantité de gel Q_s transmise à la surface de la chaussée, puis à vérifier que la protection thermique apportée par le corps de chaussée ne laisse transmettre en surface de son sol support qu'une quantité de gel inférieure à sa valeur admissible Q_{PF} précédemment calculée.

En altitude moyenne, avec un ensoleillement faible à moyen et un indice de gel atmosphérique I ne dépassant pas $210^\circ\text{C}\cdot\text{jour}$, les phénomènes de convection et de rayonnement en surface de chaussée étant pris en compte, on peut admettre que la quantité de gel Q_s transmise à la surface de la chaussée est fournie par la formule :

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

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

La protection thermique Q_{ns} apportée par le corps de chaussée d'épaisseur h peut être déterminée, de manière simplifiée par la formule :

$$Q_s = (1 + a.h) \cdot Q_{ns} + b.h$$

dans laquelle les coefficients a et b , caractéristiques de matériaux constituant les différentes couches du corps de chaussée, s'obtiennent à partir des expressions :

$$a = \sum a_i \cdot h_i / \sum h_i$$

$$b = \sum b_i \cdot h_i / \sum h_i$$

Matériaux	a_i	b_i
Béton bitumineux	0,008	0,06
Grave bitume		
Béton de ciment		
Grave ciment	0,008	0,10
Grave laitier		
Grave non traitée		
Grave émulsion		
Grave cendres volantes	0,012	0,13
Limon traité à la chaux ou au ciment	0,012	0,14
Sable traité au ciment	0,012	0,15
Sable traité au laitier		

et des valeurs extraites dans le tableau ci dessus pour chaque couche indiquée i .

La protection thermique apportée par le corps de chaussée étant ainsi calculée, il reste à comparer la quantité de gel ($Q_s - Q_{ns}$), traversant le corps de chaussée, à celle Q_{PF} admissible immédiatement sous celui-ci, afin de vérifier que la chaussée, dimensionnée en fonction du trafic, assure bien sa propre protection contre le gel.

Il y a toutefois lieu de souligner que les formules entrant dans cette vérification ne sont qu'approchées dans un sens tel que seule une conclusion favorable de protection assurée peut être considérée comme étant fiable.

Attendre par contre, en cas contraire, de ce même outil qu'il fournisse la surépaisseur à donner au corps de chaussée (ou plus économiquement à la couche de forme) conduirait à une valeur excessive. Aussi conviendra-t-il alors de faire appel au réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées pour mise en œuvre d'une méthode plus détaillée.