RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DES RELATIONS EXTÉRIEURES
COOPÉRATION ET DÉVELOPPEMENT

GUIDE PRATIQUE DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES POUR LES PAYS TROPICAUX

CEBTP

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DES RELATIONS EXTÉRIEURES
COOPÉRATION ET DÉVELOPPEMENT

GUIDE PRATIQUE DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES POUR LES PAYS TROPICAUX

(Réimpression avec mise à jour 1984)

par le
Centre Expérimental de Recherches
et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics
CEBTP

PRÉSENTATION

Le Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux est un travail d'équipe auquel ont collaboré plusieurs ingénieurs du CEBTP exerçant leur activité en pays tropicaux, soit au sein de laboratoires routiers nationaux, soit à l'occasion de missions d'études, de contrôles de travaux ou d'expertises.

Un groupe de travail animé par G. LIAUTAUD (auteur du manuel de 1972 et directeur des recherches au LBTP d'Abidjan) et coordonné par E. BAGARRE (chef de division au service Coopération et Affaires internationales à Paris), qui a rédigé le texte, a pris une part prépondérante à la réalisation du document. Ont participé à ce groupe : MM. E. BÉRARD (ancien chef du service des routes au LTP du Cameroun); B. BOURGAIN et R. BELLANGER (LBTP du Gabon); M. DUMAS (chef de la mission technique auprès du DNER au Brésil); M. LOMBI (directeur du LNTP de Kinshasa au Zaïre); P. LOMPO (chef du service des routes au LNBTP de Ouagadougou en Haute-Volta); MENIN MESSOU (chef de département au LBTP d'Abidjan en Côte-d'Ivoire); J. P. SERFASS (chef de mission technique auprès du Ministry of Works à Nairobi au Kenya); M. VANTROYS (chef de département au LBTP d'Abidjan).

Ont, d'autre part, apporté leur contribution à l'ouvrage :

MM. A. ANDRIEUX (République Centrafricaine); B. BAMBA (Côte-d'Ivoire); F. X. CASENEUVE (Zaïre); A. CAVE (Sénégal); M. COSYN (Côte-d'Ivoire); J.-P. COURTEILLE (Kenya); P. DENCAUSSE (Brésil); J.-P. FAVREAU (République Centrafricaine); P. GASC (Nouvelle-Calédonie); M. GAUTHIER (Guyane); L. GOINARD (Guadeloupe); M. LAMOTTE (Paris); R. LE BIHAN (Brésil); R. LE DIFFON (Haute-Volta); E. LY OUMAR (Mauritanie); O. MATTEI (Paris); J.-S. MOREAU (Congo); P. MOREAU (Mauritanie); P. MUSSY (Polynésie française); C. NERBONNE (Paris); J. RICHER (Côte-d'Ivoire); M. SOULE (République populaire du Bénin); S. SALL (Sénégal); J.-C. TIJOU (Gabon).

Nous avons enfin bénéficié de l'expérience d'ingénieurs routiers du BCEOM (MM. CAMUS, LELONG, TOUBAS) et du ministère de la Coopération (M. DURRIEU) et nous sommes reconnaissants à M. l'ingénieur général JONEAUX d'avoir bien voulu procéder à l'examen critique des ébauches successives de ce Guide.

CEBTP

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

Le CEBTP avait réalisé en 1969, pour le compte du Fonds d'Aide et de Coopération français, une étude générale sur le comportement et le renforcement de 7 000 km de chaussées bitumées d'Afrique tropicale et de Madagascar. Deux documents, synthèses de ces travaux, avaient été édités par le Secrétariat d'État aux Affaires étrangères :

— le *Manuel pour le renforcement des chaussées revêtues en Afrique et à Madagascar,* d'avril 1971;

— le *Manuel de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux,* d'octobre 1972.

Depuis 1972, la technologie routière a progressé, les approches théoriques du dimensionnement des chaussées se sont affinées, les auscultations sur le comportement des structures construites se sont multipliées et la connaissance des matériaux utilisés s'est approfondie.

Ces éléments, associés à l'épuisement du manuel édité en 1972, rendaient nécessaire la publication d'une édition révisée de ce document.

Bien qu'étant présenté sous une forme différente, le présent Guide pratique reprend l'essentiel des principes du manuel de 1972. Son élaboration a bénéficié de la publication des catalogues de structures-types de chaussées neuves par le LCPC-SETRA de France et par les organismes suivants dans lesquels sont détachés des ingénieurs du CEBTP : LBTP de Côte-d'Ivoire, Ministry of Works du Kenya, LTP du Cameroun.

Le Guide a, d'autre part, été établi après une large consultation des ingénieurs ayant l'expérience des chaussées des pays tropicaux; une importante contribution a été apportée par les ingénieurs des laboratoires nationaux des travaux publics associés par des liens étroits de collaboration technique avec le CEBTP.

Ce document peut être considéré comme étant d'une application quasi générale dans les pays tropicaux; son objectif à terme est de faire réaliser par chaque pays un catalogue de structures de chaussées adapté à son propre environnement économique, climatique et géotechnique.

INTRODUCTION

Le *Guide pratique de dimensionnement des chaussées* s'applique aux routes des pays tropicaux pour lesquelles la décision de bitumage a été prise.

Les critères objectifs de bitumage d'une route dépendent des conditions économiques locales. Étant donné qu'il est difficile d'apprécier financièrement le confort apporté par une couche de roulement bitumée et que diverses considérations peuvent inciter les autorités à passer de la route en terre à la route revêtue, le Guide a considéré comme trafic le plus faible celui correspondant à une circulation journalière de moins de 300 véhicules, sans définir de limite inférieure. Certains itinéraires imposent d'ailleurs, quel que soit le trafic, que les routes soient revêtues.

En zones montagneuses, les phénomènes d'érosion tendant à dégrader rapidement une route en terre, il est préférable d'y revêtir les chaussées dès que la pente du profil en long excède 6 à 7 %.

Dans les régions pauvres en matériaux convenables et si les coûts d'entretien sont trop élevés, il peut être plus économique de prévoir un revêtement bicouche pour les routes à faible trafic, plutôt que de réaliser une route en terre.

A l'opposé, l'augmentation du trafic, notamment à proximité des capitales, a conduit à introduire une classe de trafic correspondant à une circulation de 6 000 à 12 000 véhicules par jour.

Les constatations faites sur le comportement des réseaux routiers confirment les relations trouvées lors des essais AASHO entre l'importance du trafic et la fatigue des chaussées. Malheureusement, le trafic reste le paramètre du dimensionnement des chaussées le plus mal connu, aussi est-il *fondamental* que les autorités responsables fassent effectuer des *enquêtes* portant sur le *nombre et la répartition des véhicules et de leur charge*. Des campagnes de comptage et de pesage sont indispensables pour lever les incertitudes dans ce domaine. Les taux de croissance du trafic doivent pouvoir être appréciés avec suffisamment de précision pour que les calculs de trafic cumulé sur la durée de vie supposée de la chaussée à construire puissent être crédibles.

Le Guide présente des tableaux des différentes structures possibles et les épaisseurs des couches à mettre en œuvre, compte tenu des trafics et de la nature des sols du projet.

Dans l'établissement d'un catalogue des structures propres à un pays déterminé et dont il est jeté les bases dans ce Guide, il conviendra de faire une distinction entre les structures bien connues dont l'utilisation est à peu près générale (grave concassée, graveleux naturels, grave bitume, enrobés...) et celles plus particulières à certaines régions (matériaux coquilliers, coraux, scories volcaniques, bétons de sols...) dont la conception, l'étude ou la mise en œuvre relèvent encore du domaine expérimental; une attention toute spéciale doit leur être accordée même si leur mise en œuvre n'implique pas nécessairement la notion de risque.

A l'heure où l'énergie devient de plus en plus onéreuse, les laboratoires des travaux publics doivent faire preuve d'imagination et concevoir l'utilisation dans les meilleures conditions des matériaux locaux afin de minimiser le coût de construction des chaussées tout en restant dans les limites de sécurité acceptables. Les solutions luxueuses, fortement consommatrices d'énergie, doivent être, dans la mesure du possible, évitées mais l'utilisation des *matériaux locaux* suppose que les ressources disponibles soient connues, aussi faut-il insister à la fois sur *l'importance des inventaires* à réaliser au moins de part et d'autre des axes de développement du pays et sur la nécessité des études régionales sur le terrain.

Enfin, pour répondre à une demande très généralement exprimée et compte tenu du grand développement de ces voies en pays tropicaux, il a été adjoint, en annexe à ce Guide, des recommandations sur le dimensionnement et le rechargement des routes en terre.

PRINCIPES DE BASE

« Vous êtes arrivé à cette conclusion
par voie scientifique ou par expérience ? »
TCHEKOV

Les principes de base du dimensionnement proposé par le Guide, qui n'est pas un traité théorique du dimensionnement des chaussées, ne s'appuient pas sur une théorie spécifique ou sur l'exploitation statistique d'expérimentations du type essais AASHO qui auraient été réalisés en Afrique.

Le transfert technologique en matière de géotechnique consiste, pour les pays en voie de développement, à tirer parti des recherches fondamentales et des expérimentations réalisées par les pays industrialisés et à les adapter à leur situation particulière. Dans la plupart des pays d'ailleurs et jusqu'à une date récente, les chaussées ont été dimensionnées d'après les relations mises en évidence par le « Corps of Engineers » américain (méthode CBR) et d'après les corrélations trouvées lors des essais AASHO (méthode Asphalt Institute - méthode Liddle...). En France, la formule de Peltier avait été une adaptation de celle du « Corps of Engineers » et la première méthode du LCPC était dérivée de celle de l'Asphalt Institute.

Les premières chaussées revêtues des pays tropicaux ont été dimensionnées selon les mêmes principes; les conditions climatiques et géotechniques de ces pays étant très différentes de celles régnant dans les régions dont étaient issues les méthodes utilisées, il convenait de vérifier comment les chaussées ainsi dimensionnées s'y comportaient.

Ce fut le but de l'étude générale des 7 000 km de chaussées effectuée en 1969. Le manuel de 1972 procédait à un ajustement des épaisseurs, compte tenu du dimensionnement initial et du comportement sous trafic, dans le temps, des structures.

Une nouvelle étape peut être maintenant franchie et un réajustement peut être proposé.

***

Depuis 1972, les laboratoires nationaux des travaux publics associés au CEBTP ont, comme par le passé, participé aux études et aux contrôles de la construction de nombreuses routes, pour la plupart dans les pays tropicaux ou désertiques. Ils ont continué d'amasser des informations sur les caractéristiques et le comportement des matériaux des sols et des chaussées; certains ont mis au point des programmes informatiques de vérification des contraintes d'autant plus nécessaires que des structures à couches rigidifiées sont maintenant assez systématiquement mises en œuvre dès que le trafic prévu est un peu important. Ce Guide tente de rendre pratique l'utilisation de tout cet acquis.

Quelques principes fondamentaux doivent être, dès maintenant, rappelés :

- *le dimensionnement d'une chaussée n'est qu'un des éléments d'un ensemble*; il serait vain de croire qu'il puisse se concevoir indépendamment des nombreux autres facteurs intervenant dans la qualité du produit fini livré à l'usager de la route;

- *la qualité de la plate-forme* a une importance capitale pour le comportement de la chaussée :
  - à court terme, elle doit être suffisamment *indéformable* pour permettre le compactage des couches de chaussées surincombantes;
  - à long terme, elle doit être *bien drainée* pour que sa portance ne chute pas par réimbibition.

Les auscultations des chaussées en service ont montré que celles bénéficiant d'une plate-forme de bonne portance et bien drainée ont un comportement qui reste satisfaisant. Si leur construction a été, d'autre part, bien réalisée, leur vieillissement ne progresse que lentement.

- Les systèmes de *drainage* doivent avoir été bien dimensionnés et *rester fonctionnels*; cette dernière condition suppose que leur entretien ne soit pas négligé.

- *Les accotements* doivent être de largeur suffisante et *adaptés au type de la chaussée.*

- La mise en place d'une couche de chaussée ne sera effectuée que si la couche sur laquelle elle repose a des caractéristiques suffisantes, notamment une *déflexion limite admissible* qui sera à définir en fonction de la structure construite et du trafic et qui dépend de la nature des matériaux et de leur teneur en eau.

PARAMÈTRES D'ENTRÉE

Le Guide retient, comme le manuel 1972, les deux paramètres *indice portant de la plate-forme* et *trafic* pour déterminer l'épaisseur à donner à la chaussée.

Dans le cas des chaussées comportant une ou plusieurs couches susceptibles, par leur raideur, d'une rupture fragile en traction, le dimensionnement visant à *éviter le poinçonnement de la plate-forme* est complété par la *vérification des déformations sous charges et des contraintes effectives de traction* développées à la base des couches rigidifiées, de façon à s'assurer qu'elles restent compatibles avec les performances des matériaux.

Les structures proposées ici ont été vérifiées au moyen du programme « Milfeuil » mis au point sur les bases de la méthode de Jones par le LBTP d'Abidjan.

INDICE PORTANT DE LA PLATE-FORME

Malgré le grand nombre d'essais réalisés depuis que les laboratoires existent, il n'est pas possible, compte tenu de la diversité des conditions climatiques et géologiques des territoires concernés par le Guide, de se référer aux seuls critères d'identification pour caractériser la portance des sols, aussi le CBR a-t-il été conservé; *il reste somme toute le meilleur moyen de différencier les sols sur la base de leur résistance au poinçonnement.*

La valeur à retenir est la portance CBR des sols mis en œuvre dans les 30 cm supérieurs de la plate-forme. Il peut s'agir :

— des terrassements en déblais;

— de la couche supérieure des remblais;

— du terrain naturel;

— d'une couche de forme.

L'épaisseur de sol, prise en compte pour définir la portance de la plate-forme, est justifiée par les conditions climatiques qui sont celles des pays chauds dans lesquels les problèmes de gel ne se posent pas. L'atténuation des contraintes de surface est suffisante compte tenu de l'épaisseur de la chaussée pour que le poinçonnement des sols en profondeur soit ainsi évité.

La portance CBR sera déterminée en fonction des conditions de densité et de teneur en eau les plus défavorables subies à long terme par la plate-forme.

Il y a lieu de distinguer, de ce point de vue, pour ce qui concerne les pays dits « tropicaux », trois grandes unités climatiques majeures et trois grands types de sols :

1° *Zone désertique et sahélienne à pluviométrie très faible* (< 300 mm par an).

Les sols y sont rarement saturés; la teneur en eau naturelle y est le plus souvent inférieure à celle de l'OPM [1];

2° *Zone tropicale à saison sèche bien marquée.*

C'est la zone des savanes dans laquelle la teneur en eau naturelle excède, de quelques points, en saison humide, l'OPM;

3° *Zone équatoriale à très forte pluviométrie.*

C'est la zone forestière dans laquelle les précipitations annuelles excèdent 1,2 m. Les sols restent imbibés une grande partie de l'année à une teneur en eau très nettement supérieure à l'OPM.

Selon que les sols de ces trois zones climatiques seront :

— *pulvérulents et perméables ;*

— *moyens ;*

— *fins et très peu perméables,*

et compte tenu de la topographie, de l'efficacité et de la fiabilité du drainage prévu, les conditions d'exécution de l'essai CBR pourront être différentes; la portance sera alors donnée en référence à des durées d'imbibition qui pourront varier de 0 heure à 7 jours. Il sera, d'autre part, essentiel d'établir les courbes iso-CBR des sols en fonction de différentes énergies de compactage et pour un large éventail de teneurs en eau encadrant les valeurs réelles permanentes d'humidité de la plate-forme ou des matériaux du corps de chaussée.

En règle générale, la durée d'immersion des éprouvettes soumises au poinçonnement CBR sera de 4 jours; on ne pourra diminuer le temps d'imbibition que si l'on a effectivement la preuve, après une campagne de mesures de teneur en eau sur le terrain, qu'il est légitime de le faire.

(1) OPM = Optimum Proctor Modifié.

CLASSES DE PORTANCE DES SOLS

Cinq classes de sols ont été retenues, qui correspondent à une répartition assez constante des divers types de sols rencontrés en pays tropicaux.

S_1	CBR $<$ 5
S_2	5 $<$ CBR $<$ 10
S_3	10 $<$ CBR $<$ 15
S_4	15 $<$ CBR $<$ 30
S_5	CBR $>$ 30

C'est, bien entendu, la réalisation des chaussées sur des sols de faible portance qui pose les problèmes majeurs. Il faut, dans la classe des sols S_1 de CBR $<$ 5, dissocier les sols gonflants des autres sols peu porteurs.

Les terrains gonflants ont un comportement très particulier; il convient de les traiter selon les méthodes résultant d'études spécifiques. Des recommandations sont données en annexes pour la construction des chaussées sur ces types de terrain.

Les épaisseurs de chaussées sur sols S_1 non gonflants ont été définies pour un CBR de 2 et admises pour toute la classe S_1 afin d'éviter un trop grand nombre de cas différents pour une même structure. Toutefois, l'ingénieur géotechnicien pourra moduler l'épaisseur de la couche de forme ou de la couche de fondation si les sols du projet ont des portances bien définies étalées entre 2 et 5.

Il faut, de toute façon, chercher à disposer du meilleur sol de plate-forme possible. On aura toujours intérêt à sélectionner le matériau, de façon à avoir en tête de remblai des sols de bonne portance sur au moins 30 cm d'épaisseur.

Dans toute la mesure du possible, on substituera, sur environ 50 cm, aux sols en déblais de CBR $<$ 5, des matériaux de meilleure portance ou on traitera le sol-support (1).

La faible portance des sols est généralement due à une teneur en eau excessive. Il est possible de limiter les effets de ce paramètre, quand on ne dispose pas de matériaux de substitution, en surélevant au maximum la plate-forme, ce qui permet un meilleur essorage et une consolidation des sols dont la portance s'améliore dans les couches supérieures. Le drainage de ces sections doit être très efficace et profond.

(1) Voir tableau page 59.

La classe des sols de CBR > 80, qui figurait dans le manuel de 1972, a été supprimée ici; les sols ayant ces caractéristiques sont peu fréquents. Ce sont généralement des terrains rocheux ou graveleux sur lesquels, à défaut de couche de fondation, doit être mise en place une couche de réglage à granulométrie sélectionnée.

***

Le choix du CBR se fera d'après les résultats des campagnes de reconnaissance et des essais de laboratoire. On ne prendra pas systématiquement en compte pour le dimensionnement la plus faible valeur obtenue sur une section considérée comme homogène, mais celle se rapprochant le plus de la valeur la plus fréquente.

Remarque. — L'expérience montre que le dimensionnement des chaussées doit être réalisé en deux temps.

Au moment de l'étude d'avant-projet (ou de faisabilité), le dimensionnement ne peut être qu'indicatif; il est alors basé sur l'étude préliminaire des sols rencontrés au voisinage du tracé.

Le dimensionnement définitif ne peut être effectué qu'après l'exécution des terrassements lorsqu'ont été définis les matériaux et que sont connues les conditions de leur mise en œuvre en plate-forme.

TRAFIC

Durée de vie.

Bien que fondamentale, l'importance du trafic qu'aura à supporter la route durant la période pour laquelle on la dimensionne est toujours difficile à appréhender. Il arrive que les conditions économiques locales se modifient rapidement entraînant des trafics dont l'accroissement avait été sous-estimé; un renforcement est alors à envisager.

Dans le cas général, on admettra que la chaussée devra être conçue pour une période de quinze ans avant que ses caractéristiques progressivement altérées ne rendent nécessaire son renforcement mais, par le biais du calcul du trafic équivalent en nombre de passages d'un essieu standard, il est possible de dimensionner une chaussée pour une durée quelconque.

Répartition du trafic sur l'itinéraire.

Si la route a *moins de 7 m* de largeur, on prendra en compte l'ensemble du trafic dans les *deux sens de circulation*. Si la route a *plus de 7 m* ou si les voies sont à circulation *unidirectionnelle*, le trafic dans *le sens le plus chargé* sera considéré.

POIDS MAXIMAL DE L'ESSIEU.

Les structures proposées sont prévues pour supporter des essieux simples dont la *charge maximale* est de *13 t* et *un pourcentage de surcharges* n'excédant pas 10 %. Ceci ne préjuge pas de la limite légale en vigueur dans le pays.

Il conviendra, dans tous les cas, de tenir compte dans le dimensionnement des charges les plus lourdes devant circuler régulièrement sur la route et de consulter le laboratoire national du bâtiment et des travaux publics lorsque des conditions particulières sont rencontrées (spectre de trafic très différent de celui pris en compte ici, par exemple).

CLASSES DE TRAFIC

Les classes de trafic retenues sont définies de plusieurs façons en fonction du degré de précision des données disponibles :

— trafic journalier toutes catégories de véhicules confondues;

— trafic cumulé de poids lourds (véhicules définis comme ayant un poids total, en charge, supérieur à 3 t);

— trafic cumulé calculé selon les équivalences d'essieux tirées des essais AASHO par Liddle.

1. Trafic en nombre de véhicules par jour.

Il est défini par son intensité journalière moyenne sur une durée de vie de l'ordre de quinze ans, toutes classes de véhicules incluses. Le pourcentage moyen de poids lourds est supposé de l'ordre de 30 % du trafic total. Cinq classes de trafic sont distinguées :

T_1				< 300
T_2	de	300	à	1 000
T_3	de	1 000	à	3 000
T_4	de	3 000	à	6 000
T_5	de	6 000	à	12 000

T_1 *inclut des routes à très faible trafic pour lesquelles le bitumage a cependant été décidé pour des raisons qui peuvent être indépendantes de critères purement économiques.*

T_5 *correspond à des chaussées de type autoroutier à 2 fois 2 voies ou 2 fois 3 voies.*

2. Trafic en nombre cumulé de poids lourds.

Si l'estimation du trafic cumulé en nombre de poids lourds — *véhicules de charge totale supérieure à 3 t* — est possible, l'appréciation de ce paramètre sera meilleure que dans le premier cas.

Les classes retenues correspondent approximativement à celles définies par la méthode précédente, si la durée de vie de la chaussée est prise égale à quinze ans et si le pourcentage de poids lourds est voisin de 30 %. Ces classes sont les suivantes:

		T_1	$<$	$5 \cdot 10^5$
$5 \cdot 10^5$	$<$	T_2	$<$	$1{,}5 \cdot 10^6$
$1{,}5 \cdot 10^6$	$<$	T_3	$<$	$4 \cdot 10^6$
$4 \cdot 10^6$	$<$	T_4	$<$	10^7
10^7	$<$	T_5	$<$	$2 \cdot 10^7$

Les formules à appliquer pour les calculs de trafic sont les suivantes :

Cas de croissance exponentielle :

$$t_n = t_1 (1 + i)^{n-1}$$

$$365 \sum_1^n t_n = 365\ t_1 \frac{(1+i)^n - 1}{i}$$

Cas de croissance linéaire :

$$t_n = t_1[1 + (n-1)\ i]$$

$$365 \sum_1^n t_n = 365\ n\ t_1 \left[\frac{2 + (n-1)\ i}{2}\right]$$

t_1 = *trafic moyen journalier de la première année ;*

t_n = *trafic moyen journalier de l'année* n *;*

n = *nombre d'années (durée de vie) ;*

i = *taux d'accroissement annuel du trafic ;*

$365 \sum_1^n t_n$ = *trafic cumulé pendant la durée de vie* n.

3. Trafic en nombre de passages d'un essieu standard.

A défaut de disposer d'une formule d'équivalence qui aurait été définie à partir d'essais réalisés en pays tropicaux, il est proposé d'adopter l'équivalence donnée par Liddle et définie par rapport à un essieu standard de 8,2 t :

$$c = \left[\frac{P}{8{,}2}\right]^{\alpha}$$

P : *est le poids de l'essieu simple exprimé en t.*

On prendra, pour les chaussées souples, $\alpha = 4$.

Dans le cas des chaussées rigides, on devra adopter : $4 < \alpha < 8$.

(8 correspond aux chaussées en béton).

Compte tenu des divergences d'appréciation sur les coefficients réducteurs à appliquer aux essieux tandems ou tridems, chaque élément de ces groupements sera considéré comme un essieu simple.

Les classes de trafic exprimées en nombre cumulé de passages d'un essieu équivalent sont les suivantes :

Essieu équivalent de 13 t	Essieu équivalent de 8,2 t
$T_1 < 5 \cdot 10^5$	$T_1 < 3 \cdot 10^6$
$5 \cdot 10^5 < T_2 < 1{,}5 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6 < T_2 < 10^7$
$1{,}5 \cdot 10^6 < T_3 < 4 \cdot 10^6$	$10^7 < T_3 < 2{,}5 \cdot 10^7$
$4 \cdot 10^6 < T_4 < 10^7$	$2{,}5 \cdot 10^7 < T_4 < 6 \cdot 10^7$
$10^7 < T_5 < 2 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^7 < T_5 < 10^8$

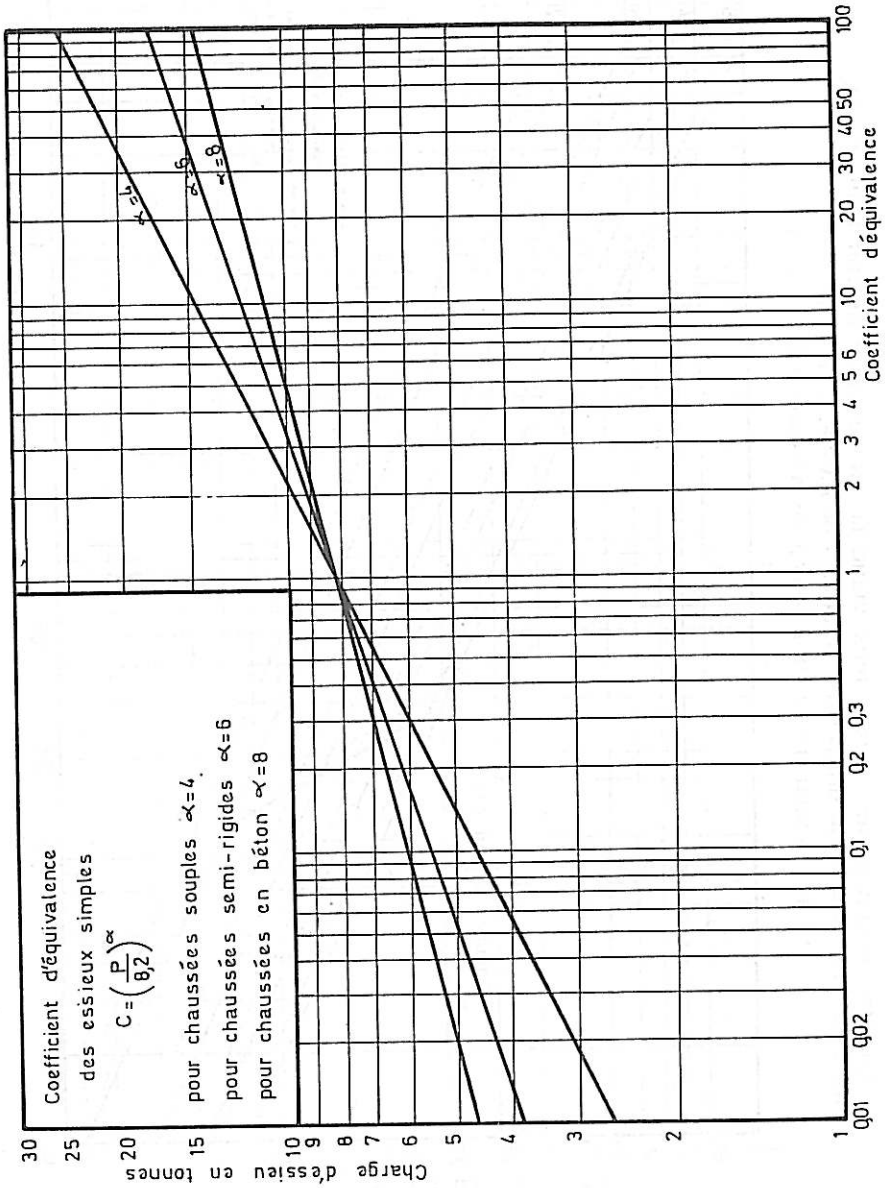
Le calcul du trafic cumulé en essieux équivalents pendant la durée de vie choisie se fera à partir du trafic initial en utilisant les mêmes formules de sommation que précédemment.

Dans le calcul du trafic équivalent, on pourra souvent négliger la prise en compte des véhicules légers dont l'influence est faible. Connaissant les types de véhicules composant le parc automobile d'un pays et leur charge par essieu, on pourra affecter chacun des types d'un facteur d'équivalence global par véhicule et effectuer la sommation à partir des données des campagnes de comptage de la circulation et des estimations de projections de trafic.

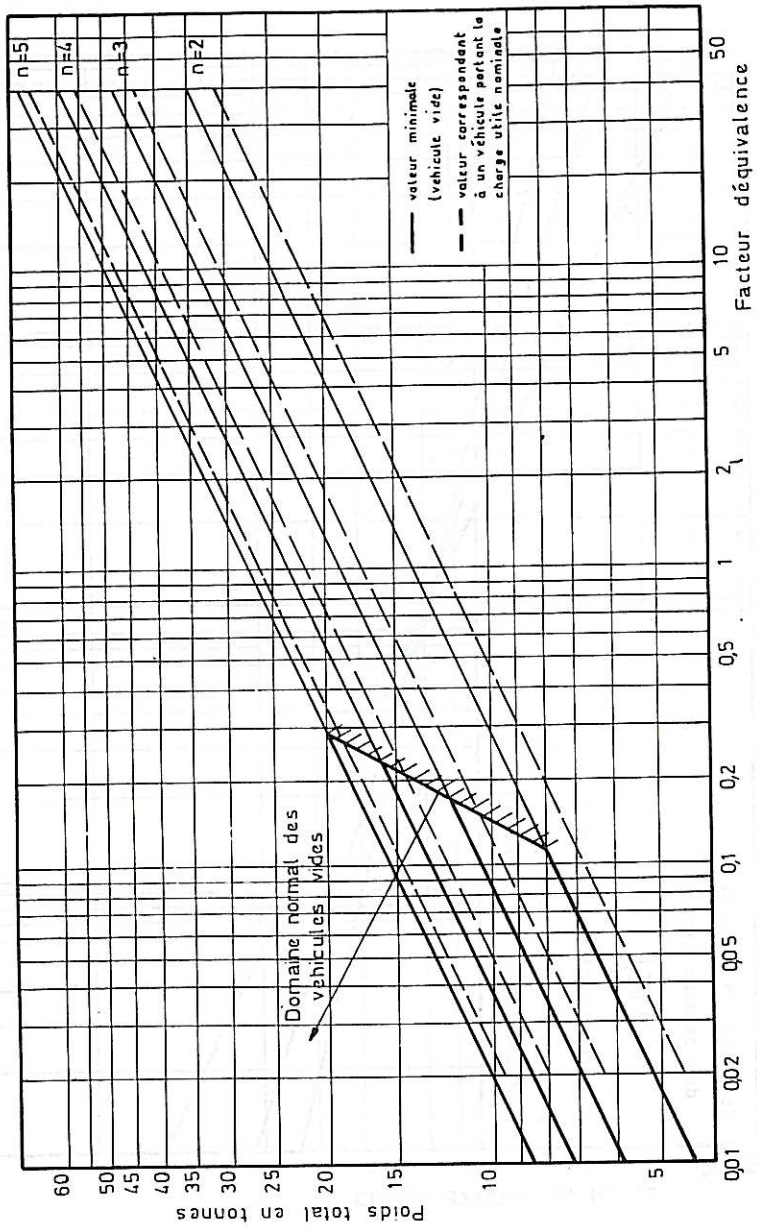
L'abaque de la page 27 est utilisé pour déterminer le coefficient d'équivalence d'un essieu simple.

L'abaque de la page 28 [1] permet de calculer le facteur global d'équivalence d'un véhicule en fonction de son poids total et du nombre d'essieux; le graphique de la page 29 donne le moyen d'obtenir l'interpolation entre les valeurs minimale et maximale du facteur d'équivalence globale d'un véhicule en fonction de son coefficient de chargement.

(1) Abaque dû à M. l'ingénieur général JONEAUX.


Coefficient d'équivalence
des essieux simples
$C = \left(\frac{P}{8,2}\right)^{\alpha}$
pour chaussées souples $\alpha = 4$
pour chaussées semi-rigides $\alpha = 6$
pour chaussées en béton $\alpha = 8$
$\alpha = 4$
$\alpha = 6$
$\alpha = 8$
Charge d'essieu en tonnes
30
25
20
15
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0,01
0,02
0,1
0,2
0,3
1
2
3
4
5
6
10
20
30
40
50
100
Coefficient d'équivalence

FACTEUR D'ÉQUIVALENCE GLOBAL D'UN VÉHICULE EN FONCTION DE SON POIDS TOTAL
(POIDS MORT PLUS CHARGE MARCHANDE EFFECTIVE)
ET DU NOMBRE D'ESSIEUX n (essieu de référence : 8,2 t $\alpha = 4$)



Coefficient d'équivalence global d'un véhicule

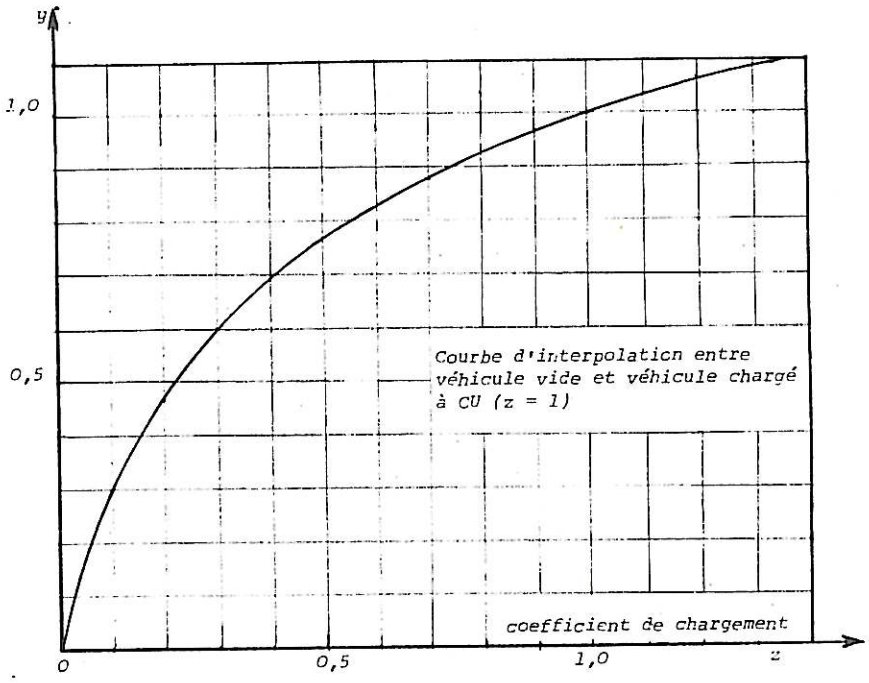
1er exemple :

Poids mort.....	10 t	CU = 18 t
Charge effective...	15 t	
Poids total.....	25 t sur 3 essieux.	

L'abaque donne : $f = 3{,}2$ à $4{,}6$

Coefficient de chargement : $z = \frac{15}{18} = 0{,}83$ $\quad y = 0{,}92$

$f = 3{,}2 + 0{,}92\ (4{,}6 - 3{,}2) = 4{,}5$



2e exemple :

Poids mort.....	7 t	CU = 9 t
Charge effective...	3 t	
Poids total.....	10 t sur 2 essieux.	

L'abaque donne : $f = 0{,}28$ à $0{,}46$

Coefficient de chargement : $z = \frac{3}{9} = 0{,}33$ $\quad y = 0{,}63$

$f = 0{,}28 + 0{,}63\ (0{,}46 - 0{,}28) = 0{,}39$

DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES

Les tableaux qui suivent proposent les structures qui peuvent être adoptées en fonction des ressources locales en matériaux, des trafics et de la portance des sols de plate-forme.

Ces structures sont prévues de telle façon que :

— les contraintes de *compression* au *niveau de la plate-forme* n'entraînent pas le *poinçonnement* de celle-ci;

— les contraintes de *traction* à la *base des couches* améliorées ou traitées n'entraînent pas leur *rupture* par *flexion;*

— les déformations sous trafic restent admissibles eu égard au comportement en fatigue des matériaux;

— les épaisseurs des couches sont compatibles avec les technologies de mise en œuvre par les engins modernes; en particulier, l'épaisseur minimale (E) des couches réalisées en matériaux comportant de gros éléments ne s'écrasant pas sous le compactage doit être telle que :

$$E \geqslant 2{,}5\ D$$

D : *Diamètre de l'élément le plus gros du matériau*

Des spécifications relatives aux matériaux à utiliser et des recommandations pour leur mise en œuvre sont proposées pour chacune des structures réalisables.

Il est recommandé de dimensionner une chaussée pour la durée prévue avant son éventuel renforcement, c'est-à-dire pour quinze ans dans le cas général. L'aménagement définitif permet de minimiser les dépenses d'entretien. Il peut être toutefois envisagé un aménagement par étapes de la chaussée, la mise en place de la couche de roulement en béton bitumineux étant alors différée. On a aussi recours à cette solution lorsque l'on doit attendre la stabilisation d'un corps de chaussée sous le trafic; la rigidité ainsi acquise évite la fissuration du revêtement.

Les tableaux du Guide donnent l'*épaisseur des revêtements* à mettre en place pour *l'aménagement définitif* des chaussées.

Dans le cas d'un *aménagement par étapes* de la couche de roulement, un revêtement en enduit superficiel sera d'abord mis en œuvre; le rechargement par un tapis de béton bitumineux sera réalisé par la suite sur l'épaisseur prévue pour l'aménagement définitif (voir les tableaux) et dans les délais suivants :

Trafic T_5 = 2 ans
Trafic T_4 = 5 ans
Trafic T_3 = 6 ans
Trafic T_2 = 7 ans
Trafic T_1 = 8 ans

Légende des tableaux

T_1 - T_2 - T_3 - T_4 - T_5 : Trafic des classes définies pages 22 à 25.

S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5 : Classes de portance CBR des sols page 21.

R = Revêtement.

B = Couche de base.

F = Couche de fondation.

Bc = Bicouche.

Tc = Tricouche.

E = Enrobé dense - Sand asphalt (3 E = 3 cm d'enrobé dense ou de sand-asphalt.)

Les épaisseurs sont données en centimètres.

* signifie : structures demandant des précautions particulières d'étude et de mise en œuvre.

La dimension des matériaux est toujours exprimée en millimètres et en référence à la maille carrée des tamis.

Toute case barrée dans un tableau implique que la solution envisagée est à proscrire pour des motifs techniques ou économiques.

TRAFICS T_1 - T_2		S_1		S_2		S_3		S_4		S_5	
		T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2
REVÊTEMENT		Bc ou 3E	4E ou Tc	Bc ou 3E	4E ou Tc	Bc ou 3E	4E ou Tc	Bc ou 3E	4E ou Tc	Bc ou 3E	4E ou Tc
B	Graveleux latéritique naturel	15	15	15	15	15	15	15	15	25	25
F	Graveleux latéritique naturel	45	45	35	35	25	30	15	20	0	0
B	Graveleux latéritique ou grave naturelle améliorés au ciment	15	15	15	15	15	15	15	15	20	20
F	Graveleux latéritique naturel ou grave naturelle O/D	40	45	30	35	25	25	15	20	0	0

B	Concassé o/d	15	15	15	15	15	15	15	15	20	20
F	Graveleux latéritique naturel ou grave naturelle O/D ou concassé o/d	40	45	30	35	25	25	15	20	0	0
B F	Concassé o/d	50	55	30	35	25	30	25	30	20	20
B	Graveleux latéritique ou grave naturelle ou concassé o/d**	20	20	20	20	20	20	20	20	25	25
F	Sable argileux	40	40	30	30	25	25	15	20	0	0
B	Sable argileux amélioré au ciment*	15	20	15	20	15	20	15	20	15	20
F	Sable argileux	40	45	30	35	20	25	15	20	10	15

** 15 cm au lieu de 20 cm; 20 cm au lieu de 25 cm, si on utilise du concassé o/d.

TRAFICS T_1 - T_2		S_1		S_2		S_3		S_4		S_5	
		T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2
REVÊTEMENT		Bc ou 3E	4E ou Tc	Bc ou 3E	4E ou Tc	Bc ou 3E	4E ou Tc	Bc ou 3E	4E ou Tc	Bc ou 3E	4E ou Tc
B	Sable bitume *	12	15	12	15	12	15	12	15	12	15
F	Sable argileux	40	45	30	30	20	25	15	20	0	0
B	Sol chaux *	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
F	Sable argileux	40	45	30	30	20	25	15	20	0	0
B	Sable bitume *	12	15	12	15	12	15	12	15	12	15

F	Sol chaux	20	20	15	20	15	20	15	15	0	0
B	Concassé o/d	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
F	Sol chaux	20	20	15	20	15	20	15	15	0	0
B	Scories volcaniques (pouzzolanes) sélectionnées* ou concassé o/d	15	15	15	15	15	15	15	15	20	20
F	Scories volcaniques (pouzzolanes)	45	50	30	40	25	25	15	20	0	0
B	Béton de sol (graveleux latéritique + O/D ou + d/D concassé)	15	15	15	15	15	15	15	15	20	20
F	Graveleux latéritique	45	45	35	35	25	25	15	20	0	0
B	Banco-coquillage amélioré au bitume *	10	X	10	X	10	X	10	X	12	X
F	Banco-coquillage	45		30		20		15		0	

TRAFICS T_1 - T_2		S_1		S_2		S_3		S_4		S_5	
		T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2
REVÊTEMENT		Bc ou 3E	4E ou Tc	Bc ou 3E	4E ou Tc	Bc ou 3E	4E ou Tc	Bc ou 3E	4E ou Tc	Bc ou 3E	4E ou Tc
B	Grave-bitume	X	12	X	12	X	12	X	12	X	12
F	Banco-coquillage amélioré au bitume	X	15	X	15	X	10	X	10	X	0
B	Banco-coquillage amélioré au ciment *	15	15	15	15	15	15	15	15	20	20
F	Banco-coquillage	45	50	30	35	20	25	15	20	0	0

B	Sable coquillier 0/30 *	20		20		20		20		20	
F	Sable coquillier 0/50	45		30		25		20		0	
B	Soupe de corail ou corail mort *	15	20	15	20	15	20	15	20	20	25
F	Soupe de corail	45	50	30	35	20	25	15	20	0	0
B	Soupe de corail traitée au ciment *		15		15		15		15		20
F	Soupe de corail		50		35		25		20		0

TRAFICS T_3 - T_4		S_1		S_2		S_3		S_4		S_5	
		T_3	T_4	T_3	T_4	T_3	T_4	T_3	T_4	T_3	T_4
R	Béton bitumineux	5	X	5	X	5	X	5	X	5	X
B	Graveleux latéritique naturel	20	X	20	X	20	X	20	X	25	X
F	Graveleux latéritique naturel	40	X	30	X	20	X	15	X	0	X
R	Béton bitumineux	5	7	5	7	5	7	5	7	5	X
B	Graveleux latéritique ou grave naturelle améliorés au ciment	20	20	20	20	20	20	20	20	20	X
F	Graveleux latéritique naturel ou grave naturelle O/D	45	50	25	30	20	25	15	20	0	X
R	Béton bitumineux	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
B	Concassé o/d	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25

F	Graveleux latéritique naturel ou grave naturelle O/D ou tout-venant de concassage	40	45	30	30	25	25	20	20	0	0
R	Béton bitumineux	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
B F	Concassé o/d	60	65	45	50	40	45	30	35	20	25
R	Béton bitumineux	5	X	5	X	5	X	5	X	5	X
B	Grave naturelle, grave latéritique naturelle ** ou concassé o/d	25	X	25	X	25	X	25	X	20	X
F	Sable argileux	45	X	30	X	25	X	20	X	0	X
R	Béton bitumineux	5	X	5	X	5	X	5	X	5	X
B	Sable argileux amélioré au ciment *	20	X	20	X	20	X	20	X	20	X
F	Sable argileux	55	X	35	X	25	X	20	X	0	X

** 20 cm dans le cas de o/d concassé.

TRAFICS T_3 - T_4		S_1		S_2		S_3		S_4		S_5	
		T_3	T_4	T_3	T_4	T_3	T_4	T_3	T_4	T_3	T_4
R	Béton bitumineux	5		5		5		5		5	
B	Sable argileux amélioré au ciment *	20		20		20		20		20	
F	Sable argileux amélioré au ciment ou grave améliorée au ciment	40		25		20		15		0	
R	Béton bitumineux			5	7	5	7	5	7	5	7
B	Grave ciment			20	20	20	20	20	20	20	20
F	Grave latéritique ou grave naturelle ou concassé o/d			30	35	25	30	20	20	0	0

R	Béton bitumineux	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
B	Grave ciment	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
F	Sable argileux amélioré au ciment ou grave améliorée au ciment	40	45	25	30	20	25	15	15	0	0
R	Béton bitumineux	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5
B	Grave bitume	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
F	Graveleux naturel ou concassé o/d	45	50	30	35	25	25	15	20	0	0
R	Béton bitumineux	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5
B	Grave bitume	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
F	Sable argileux ciment ou graveleux amélioré au ciment ou sable amélioré au bitume	40	45	25	30	20	25	15	15	0	0

TRAFICS T_3 - T_4		S_1		S_2		S_3		S_4		S_5	
		T_3	T_4	T_3	T_4	T_3	T_4	T_3	T_4	T_3	T_4
R	Béton bitumineux	5		5		5		5		5	
B	Sable bitume *	15		15		15		15		20	
F	Sable argileux	50		30		25		20		0	
R	Béton bitumineux	5		5		5		5		5	
B	Sable bitume * ou grave bitume	15		15		15		15		20	
F	Sol chaux	25		20		20		15		0	
R	Béton bitumineux	5		5		5		5		5	
B	Concassé o/d	20		20		20		20		20	
F	Sol chaux	25		20		15		15		0	

R	Béton bitumineux	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
B	Grave ciment	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
F	Sol chaux	20	25	20	20	15	20	15	15	0	0
R	Béton bitumineux	5		5		5		5		5	
B	Concassé o/d	20		20		20		20		20	
F	Scories volcaniques (pouzzolanes)	45		30		25		15		0	
R	Béton bitumineux			5	7	5	7	5	7	5	7
B	Grave ciment			20	20	20	20	20	20	20	20
F	Scories volcaniques (pouzzolanes)			35	40	25	30	20	20	0	0
R	Béton bitumineux	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5
B	Grave bitume	15	15	15	15	15	15	15	15	20	20
F	Scories volcaniques (pouzzolanes)	50	50	35	40	25	30	20	20	0	0

TRAFICS T_3 - T_4		S_1		S_2		S_3		S_4		S_5	
		T_3	T_4	T_3	T_4	T_3	T_4	T_3	T_4	T_3	T_4
R	Béton bitumineux	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5
B	Grave bitume	12	12	12	12	12	12	12	12	15	15
F	Banco-coquillage amélioré au ciment	20	25	15	20	15	15	15	10	0	0
R	Béton bitumineux	5	X	5	X	5	X	5	X	5	X
B	Soupe de corail traitée au ciment *	20	X	20	X	20	X	20	X	25	X

F	Soupe de corail	50		35		25		20		0	
R	Béton bitumineux	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
B	Corail concassé traité au ciment *	15	15	15	15	15	15	15	15	20	20
F	Soupe corallienne traitée au ciment	40	45	20	25	15	20	15	15	0	0
R	Béton bitumineux	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5
B	Corail concassé traité au bitume *	12	12	12	12	12	12	12	12	15	15
F	Soupe corallienne traitée au ciment	40	45	20	25	15	20	15	15	0	0

TRAFIC T_5		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
		T_5	T_5	T_5	T_5	T_5
R	Béton bitumineux		10	10	10	10
B	Grave ciment		22	22	22	25
F	Graveleux latéritique ou grave naturelle ou tout-venant de concassage		35	20	25	0
R	Béton bitumineux	10	10	10	10	10
B	Grave ciment	22	22	22	22	25
F	Sable argileux ou grave améliorés au ciment	45	25	20	15	0
R	Béton bitumineux	7	7	7	7	7
B	Grave bitume	18	18	18	18	18

F	Graveleux latéritique ou grave naturelle ou tout-venant de concassage	50	35	30	25	0
R	Béton bitumineux	7	7	7	7	7
B	Grave bitume	17	17	17	17	20
F	Grave améliorée au ciment	45	25	20	15	0
R	Béton bitumineux	7	7	7	7	7
B	Grave bitume	17	17	17	17	20
F	Sable bitume	45	25	20	20	0
R	Béton bitumineux		10	10	10	10
B	Grave ciment		22	22	22	25
F	Scories volcaniques (pouzzolanes)		35	30	25	0

TRAFIC T_5		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
		T_5	T_5	T_5	T_5	T_5
R	Béton bitumineux	7	7	7	7	7
B	Grave bitume	18	18	18	18	20
F	Scories volcaniques	55	35	30	25	0
R	Béton bitumineux	10	10	10	10	10
B	Grave ciment	22	22	22	22	25
F	Sol chaux	30	25	20	15	0
R	Béton bitumineux	7	7	7	7	7
B	Grave bitume	17	17	17	17	20

F	Sol chaux	30	25	20	15	0
R	Béton bitumineux	7	7	7	7	7
B	Grave bitume	17	17	17	17	20
F	Banco coquillage amélioré au bitume	30	25	20	15	0
R	Béton bitumineux	10	10	10	10	10
B	Corail concassé traité au ciment *	20	20	20	20	25
F	Soupe de corail traitée au ciment	45	25	20	15	0
R	Béton bitumineux	7	7	7	7	7
B	Corail concassé traité au bitume *	17	17	17	17	20
F	Soupe de corail traitée au ciment	45	25	20	15	0

CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE

CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE

Pour que les structures proposées aient un comportement satisfaisant, il faut :

— que les *matériaux* constituant les diverses couches aient des caractéristiques répondant à certaines exigences minimales de qualité;

— que les *conditions d'exécution* des chaussées aient été conformes aux règles de l'art.

Le Guide propose un certain nombre de recommandations de référence qui devront être adaptées aux conditions particulières de chaque pays.

PLATE-FORME

En règle générale, on entend par « plate-forme » la couche des 30 cm supérieurs des terrassements. Il est indispensable de disposer d'une bonne assise pour que le corps de chaussée soit mis en place dans des conditions satisfaisantes et pour qu'il conserve, dans le temps, une indéformabilité suffisante.

La recommandation : « *Il faut investir au niveau de la plate-forme* » est fondamentale.

Dans les zones humides, un système de drainage, dont la réalisation précèdera ou sera conduite simultanément à l'exécution des terrassements, assainira la plate-forme et une large emprise sera dégagée pour permettre l'aération et l'ensoleillement du chantier.

Bien que les tableaux de dimensionnement proposent des épaisseurs de chaussées pour les sols de CBR inférieur à 5, il sera préférable de substituer à ces sols des matériaux de meilleure qualité ou de traiter la plate-forme en place. Le CBR à prendre en compte pour le dimensionnement dépendra de l'épaisseur et de la qualité du matériau de substitution.

La solution à adopter dépendra des ressources locales en matériaux et de la comparaison des coûts effectuée entre une structure de chaussée épaisse, la substitution du sol en place par une couche de forme ou le traitement *in situ* de la plate-forme.

Les sols à éliminer ou à traiter ont, outre un CBR très faible, les caractéristiques géotechniques suivantes :

IP > 40
LL > 70
Gonflement linéaire dans le moule CBR > 2 %
Teneur en matières organiques > 3 %.

Le traitement à la chaux vive (ou à défaut à la chaux éteinte) permettra d'obtenir un abaissement de la teneur en eau naturelle et de l'IP.

Des améliorations par traitement mécanique seront envisagées :

— ajout de sable pour amaigrir une plate-forme argileuse ou de cailloux pour lui donner du squelette;

— les géotextiles dits additifs de structure permettent la mise en place de couches de forme sur des sols fins plastiques à forte teneur en eau.

On prévoira, au niveau de la plate-forme, un degré de compactage correspondant à au moins 95 % *du Proctor modifié* ce qui pourra entraîner, en déblai, une double manipulation des sols.

On aura cependant intérêt, dans certains sols sensibles des zones de déblai, à remanier le moins possible le terrain naturel sur lequel sera mise en œuvre une couche de forme avant la mise en place de la couche de fondation.

Les sols fins, dont la teneur en eau est proche de la saturation, conduisent sous compactage au phénomène de matelassage. Il n'est alors pas possible d'obtenir le degré de compacité souhaité et l'intensification de l'énergie du compactage est inefficace; on doit alors, dans ces conditions, s'attacher à abaisser la teneur en eau du sol et admettre d'exécuter un compactage plus faible.

La déformabilité de la plate-forme peut être appréciée par la mesure des déflexions sous le passage d'un essieu chargé. Les valeurs de déflexion admissibles dépendent du type de chaussée proposée, du trafic supposé et du sol de plate-forme. En l'absence de données expérimentales disponibles pour le pays, on peut admettre, en première approximation, des déflexions maximales de 200/100 mm mesurées sous essieu de 13 tonnes après compactage.

Dans le cas de fonds de déblais rocheux ou de couche de forme en matériaux extraits à l'explosif, la surface de la plate-forme devra être égalisée, conformément aux spécifications du nivellement. On devra, de plus, contrôler la rigidité de cette assise par des essais de plaque. Le module EV2, mesuré selon le mode opératoire LCPC 1973 (1), ne devra pas être inférieur à 500 bars.

On s'attachera à faire réaliser, pour l'édification de la chaussée, des tronçons homogènes dont la longueur optimale est fonction de l'importance du projet, des conditions économiques locales et des moyens dont disposent les entreprises.

(1) Voir en annexe.

COUCHE DE FORME

Le matériau de substitution ou d'apport à mettre en couche de forme pour pallier l'insuffisance du sol naturel et, éventuellement, permettre la circulation de chantier devra être sélectionné et, en tout état de cause, avoir un CBR supérieur à 5. Un CBR $\geqslant$ 10 pourra être exigé pour les chantiers importants sur lesquels circulent de très gros engins.

La couche de forme est indispensable sur les sols pour lesquels il est impossible d'atteindre les 95 % de la densité OPM.

La nouvelle classe de plate-forme améliorée à prendre en compte pour le dimensionnement de la chaussée sera déterminée d'après la qualité et l'épaisseur du matériau de substitution placé en couche de forme.

Matériau d'apport		Nouvelle classe de plate-forme à prendre en compte
CBR	Épaisseur minimale cm	
5-10 (S_2)	45	S_2
10-15 (S_3)	35	S_2
10-15 (S_3)	45	S_3
15-30 (S_4)	30	S_2
15-30 (S_4)	35	S_3
15-30 (S_4)	50	S_4

De nombreux sols peuvent être utilisés. On évitera cependant :

— ceux dont la granulométrie maximale est supérieure à 150 mm;

— ceux dont le pourcentage de fines est supérieur à 35 ou 45 % et l'IP supérieur à 20 ou 30.

Pourront être traités des sols fins dont l'IP est inférieur à 25 et des sols grenus, pourvu que ceux-ci ne contiennent pas d'éléments supérieurs à 80 ou 100 mm.

Les seuils de déformabilité admissibles sont les mêmes que ceux définis pour la plate-forme.

COUCHE DE FONDATION

Quelle que soit la structure dans laquelle ils sont inclus, les matériaux pour couche de fondation doivent avoir un *CBR au moins égal à 30* obtenu pour une densité sèche correspondant à 95 % de l'OPM. On sera cependant un peu moins exigeant sur la portance pour les faibles trafics (25 pourra être admis pour T_1) et plus sévère pour les trafics T_4 et T_5 (on exigera 35).

La dimension maximale des éléments n'excèdera pas *60 mm*. Il est recommandé d'utiliser des matériaux de moindre granulométrie maximale pour éviter la ségrégation.

Les autres recommandations données ci-après dépendent des matériaux mis en œuvre.

Graveleux latéritiques naturels.

QUALITÉ DES MATÉRIAUX.

L'altération ferralitique des roches sous climat tropical conduit à l'accumulation de concrétions ferrugineuses dans les profils pédologiques; les niveaux à concrétionnements de l'horizon B d'accumulation conviennent pour être utilisés en couche de chaussée, sous réserve qu'ils aient les caractéristiques suivantes :

Granulométrie	Fuseau proposé % passant *
40 mm.....	95-100
31,5 mm.....	90-100
20 mm.....	75-100
10 mm.....	58-100
5 mm.....	40- 78
2 mm.....	28- 65
1 mm.....	22- 56
0,5 mm.....	18- 50
80 µm.....	5- 35**

* Après compactage *in situ*.
** Voir page suivante.

Les tolérances de pourcentage de fines et d'indice de plasticité varient selon l'importance du trafic :

	T_1-T_2	T_3-T_4	T_5
Maximum de passant à 80 μm.....	35	30	30
Indice de plasticité maximal.....	30	20	20

La densité sèche minimale requise sera 1,8 à 2 tonnes/m³, selon l'importance du trafic.

MISE EN ŒUVRE.

Le répandage se fera au bouteur ou à la niveleuse en couches d'épaisseur minimale de 10 cm et maximale de 25 cm.

La teneur en eau de compactage sera de $W_{OPM} \pm 2$ et le taux de compacité minimal de 95 % γ OPM.

Le compactage sera réalisé au compacteur à pneus lourd (charge par roue > 3 tonnes) ; le nombre de passes sera fixé sur planche d'essai.

Des valeurs indicatives de déflexions admissibles sur la couche de fondation sous essieu de 13 tonnes (exprimées en Dm + 1,3 σ) peuvent être modulées entre 100/100 et 300/100 mm selon les trafics (T_3 à T_1).

Graveleux latéritiques améliorés au ciment ou à la chaux.

QUALITÉ DES MATÉRIAUX ET DES MÉLANGES.

Dans les cas de trafics importants ($\geqslant T_3$) pour lesquels une couche de base en grave ciment ou en grave bitume est prévue, on peut avoir intérêt à rigidifier la couche de fondation afin d'éviter un trop grand écart de modules entre les deux couches. Ce résultat peut être atteint en incorporant quelques pourcents de ciment ou de chaux à un graveleux latéritique ne présentant pas, par lui-même, des caractéristiques suffisantes.

Les tolérances de pourcentage de fines et d'indice de plasticité varient selon l'importance du trafic :

	T_1-T_2	T_3-T_4	T_5
Maximum de passant à 80 µm.....	35	30	30
Indice de plasticité maximal.....	30	20	20

La densité sèche minimale requise sera 1,8 à 2 tonnes/m³, selon l'importance du trafic.

MISE EN ŒUVRE.

Le répandage se fera au bouteur ou à la niveleuse en couches d'épaisseur minimale de 10 cm et maximale de 25 cm.

La teneur en eau de compactage sera de $W_{OPM} \pm 2$ et le taux de compacité minimal de 95 % γ OPM.

Le compactage sera réalisé au compacteur à pneus lourd (charge par roue > 3 tonnes) ; le nombre de passes sera fixé sur planche d'essai.

Des valeurs indicatives de déflexions admissibles sur la couche de fondation sous essieu de 13 tonnes (exprimées en Dm + 1,3 σ) peuvent être modulées entre 100/100 et 300/100 mm selon les trafics (T_3 à T_1).

Graveleux latéritiques améliorés au ciment ou à la chaux.

QUALITÉ DES MATÉRIAUX ET DES MÉLANGES.

Dans les cas de trafics importants ($\geqslant T_3$) pour lesquels une couche de base en grave ciment ou en grave bitume est prévue, on peut avoir intérêt à rigidifier la couche de fondation afin d'éviter un trop grand écart de modules entre les deux couches. Ce résultat peut être atteint en incorporant quelques pourcents de ciment ou de chaux à un graveleux latéritique ne présentant pas, par lui-même, des caractéristiques suffisantes.

Les graveleux latéritiques qui conviennent ont généralement les caractéristiques suivantes :

Taille maximale des éléments	de 10 à 50 mm
Teneur en matières organiques	< 1,5 %
Teneur en passant à 80 µm	< 35 %
Indice de plasticité	< 30
Module de plasticité m × IP (1)	< 2 500

Des moyens de malaxage suffisamment puissants devront être disponibles pour pouvoir traiter des matériaux dont la teneur en passant à 80 µm excède 25 % et l'indice de plasticité est supérieur à 25.

Le dosage en liant, qui sera de l'ordre de 2 %, sera défini par des essais de laboratoire et augmenté de 0,5 % à la réalisation du chantier.

Dans le cas d'une amélioration à la chaux, on devra avoir en plus :

— IP ⩾ 10

— passant à 0,425 mm ⩾ 15.

Les caractéristiques optimales du compactage (teneur en eau, densité sèche maximale) du mélange seront étudiées dans des moules Proctor (ou dans des moules CBR si la taille maximale des éléments excède 5 mm).

Le matériau amélioré sera considéré comme acceptable si le *CBR* correspondant à 95 % de la densité OPM, après trois jours de cure à l'air, à la température ambiante et à 4 jours d'immersion, est *supérieur à 100* (supérieur à 60 dans le cas d'une amélioration à la chaux).

Les conditions de préparation, de cure et de poinçonnement des échantillons seront conformes aux modes opératoires du CEBTP.

Mise en œuvre.

Le mélange sera réalisé *in situ* (pour la chaux et le ciment) ou en centrale (pour le ciment) et le répandage au bouteur ou à la niveleuse sur une épaisseur maximale de 25 cm par couche compactée.

(1) m = mortier = passant à 0,425 mm.

La teneur en eau de compactage sera comprise entre WOPM et WOPM-2; on devra obtenir 95 % de la densité OPM. Le compactage sera effectué au rouleau vibrant (M/L > 20 kg/cm) [1] et au compacteur à pneus (charge > 5 tonnes par roue avec pression > 5 bars) moins de 4 heures après le malaxage; les conditions locales pourront même exiger de réduire ce délai à 2 heures. Le nombre de passes, à préciser sur planches d'essai, sera de l'ordre de 5 à 8 pour le vibrant et de 15 à 20 pour le rouleau à pneus.

La couche de base ne sera pas mise en place avant un délai de 48 heures après le compactage.

Les valeurs indicatives de la déformabilité admissible de la couche avant la pose de la couche de base sont de l'ordre de 70/100 à 150/100 mm ($Dm + 1{,}3\ \sigma$) selon le trafic (T_5 à T_3); elles sont mesurées par la déflexion sous le passage d'un essieu de 13 tonnes.

Concassé o/d.

En couche unique pour base et fondation (voir à la rubrique « Couche de base »).

Graves naturelles O/D.

QUALITÉ DES MATÉRIAUX.

Les cours moyens des grands fleuves (lit mineur, plages et terrasses), les épandages de piémont des zones montagneuses, les nappes recouvrant les pédiments des zones subdésertiques et d'autres unités morphologiques contiennent des niveaux graveleux utilisables dans le corps de chaussée. Il en est de même de la partie supérieure de massifs rocheux en voie d'altération ou des filons de quartz démantelés qui peuvent être exploités au ripper et à la pelle mécanique.

On obtient souvent ainsi des tout-venants qui, moyennant un simple criblage, peuvent donner de bonnes couches de fondation.

On rangera aussi sous cette rubrique les tout-venants de concassage 0/60.

La granulométrie maximale ne devra pas excéder 60 mm et, dans le cas de matériaux possédant des éléments de cette taille, il sera souhaitable d'envisager leur mise en œuvre en couche d'au moins 20 cm d'épaisseur.

(1) M/L = charge statique par unité de largeur.

Le fuseau granulométrique à adopter sera fonction (dans sa partie basse) de la plasticité du mortier [1], le pourcentage minimal de fines devra être supérieur à 4 % si la plasticité est nulle; dans les autres cas, l'indice de plasticité devra rester inférieur à 12.

On peut proposer le *fuseau* suivant, étant bien entendu que les courbes granulométriques devront être parallèles aux enveloppes de ce fuseau.

Mailles	% passant
60 mm.....	100
40 mm.....	80*-100
20 mm.....	65 - 90
10 mm.....	40 - 75
5 mm.....	30*- 60
2 mm.....	20 - 45
1 mm.....	15 - 37
0,4 mm.....	10 - 20
80 µm.....	2 (4) ** 15

* Respectivement 85 et 28 pour les graves roulées.

** 2 pour matériaux légèrement plastiques;
4 pour matériaux non plastiques.

Il sera, en tout état de cause, préférable à cause des risques de ségrégation de ne pas dépasser pour les plus gros éléments la taille de 40 mm.

Le Los Angelès devra être inférieur à 50 et le micro Deval à 30. Le coefficient d'uniformité $Cu = \frac{D\,60}{D\,10}$ devra être supérieur à 10.

La détermination du CBR sur ces matériaux qui comportent une fraction supérieure à 20 mm importante est problématique mais nécessaire, ne serait-ce que pour déceler un éventuel gonflement dû à la présence des fines argi-

(1) Passant à 0,425 mm.

leuses. La mesure du CBR n'a toutefois de sens que si les éléments du squelette « flottent » au sein de la matrice fine, c'est-à-dire, grosso modo, si le pourcentage du refus à 20 mm n'excède pas 25 %. Le CBR se fera sur le 0/20 et une correction sur la teneur en eau et sur la densité sèche sera prise en compte en fonction du pourcentage de refus à 20 mm (voir en annexe les recommandations du CEBTP sur cette question).

MISE EN ŒUVRE.

Le répandage se fera au bouteur, à la niveleuse ou au finisseur. Les épaisseurs minimale et maximale de mise en œuvre seront respectivement de 15 cm et 30 cm après compactage.

La compacité minimale à obtenir est les 95 % de la densité optimale Proctor. Celle-ci est parfois difficile à déterminer au laboratoire lorsque les matériaux ont une grande taille maximale. On peut alors, par planche expérimentale, fixer la densité sèche à obtenir par rapport au poids spécifique du matériau; on fixe ainsi le pourcentage maximal de vides n que peut contenir la couche après compactage $\left(n = 1 - \frac{\gamma d}{\gamma s}\right)$

γd = *densité sèche*
γs = *poids spécifique des grains du matériau*
n devra rester inférieur à 18 %.

Le compactage se fera au vibrant (M/L de 13 à 50 kg/cm selon l'épaisseur de la couche compactée), puis au compacteur à pneus (charge par roue > 2 tonnes).

La compacité sera contrôlée au gammadensimètre ou à l'essai de plaque, auquel cas on devra obtenir un module EV2 (1) au moins égal à 950 bars.

La surface assez souvent irrégulière des couches, dressée avec ces matériaux, rend la mesure des déflexions difficile.

Sables argileux.

QUALITÉ DES MATÉRIAUX.

Ces matériaux sont, soit des dépôts sédimentaires du type des sables du Continental Terminal d'Afrique, soit des arènes résultant de l'altération *in situ* de granitoïdes ayant localement subi un remaniement de type colluvial.

(1) Voir mode opératoire en annexe.

Les caractéristiques géotechniques des matériaux généralement utilisables sont les suivantes :

— granulométrie	: 0/2 à 0/10;
— passant à 80 μm :	: 10 à 30 %;
— IP	: 5 à 20;
— $f \times$ IP (1)	: 100 à 500;
— γd OPM	: 1,90 à 2,10;
— WOPM	: 7 à 13 %;
— Gonflement maximal	: 2,5 %.

MISE EN ŒUVRE.

Ces matériaux seront répandus au bouteur ou à la niveleuse et compactés à une teneur en eau égale à WOPM ± 1. On obtiendra une densité sèche égale à au moins 95 % de la densité sèche de l'OPM. Le compactage sera réalisé au rouleau à pneus (charge par roue > 2 tonnes). L'épaisseur de mise en œuvre de chaque couche sera comprise entre 10 et 25 cm. Il est nécessaire qu'une butée latérale suffisante assure le frettage de ces matériaux. La déformabilité admissible avant réception sera de 125 à 350/100 mm selon le trafic attendu.

Sables argileux améliorés au ciment ou à la chaux.

QUALITÉ DES MATÉRIAUX.

De même que dans le cas de certaines graves argileuses, la rigidification de sables argileux peut être nécessaire pour des structures comportant une couche de base en grave bitume ou en grave ciment.

On pourra être amené à utiliser de la chaux (vive ou éteinte) ou du ciment ou une combinaison des deux liants.

On peut encourager les pays ayant des calcaires dans leur sous-sol à produire de la chaux; ils pourraient, dans bien des cas, en fabriquer à un prix de revient peu élevé.

(1) f = passant à 80 μ m.

Les sables argileux aptes à être traités pourront avoir les caractéristiques suivantes :

Dimension maximale.....	0,5 à 10 mm
Passant à 80 μm.....	inférieur à 50 %
Coefficient d'uniformité.....	$Cu = \frac{D\,60}{D\,10}$ supérieur à 5
Indice de plasticité.....	inférieur à 30
Module de plasticité (m × IP) (1)	inférieur à 2.500
Teneur en matières organiques..	inférieure à 2 %.

• Cas des sols-ciment.

Le dosage en ciment sera de l'ordre de 2 % (augmenté sur le chantier de 0,5 %). Il sera défini par des essais de laboratoire sur des mélanges réalisés dans des moules Proctor.

On devra obtenir, sur des éprouvettes compactées à 95 % de la densité OPM et réalisées conformément au mode opératoire du CEBTP, les valeurs minimales suivantes :

	T_1-T_3	T_4-T_5
Résistance à la compression simple après 7 jours de cure à l'air (Rc bars).....	5	10
Résistance à la compression simple après 3 jours de cure à l'air + 4 jours d'immersion (R'c bars)	2,5	5
Rapport $\frac{R'c}{Rc}$.....	0,5	
CBR (après 7 jours de cure à l'air)	80	120
CBR (après 3 jours à l'air + 4 jours d'immersion)	60	80

(1) m = mortier = passant à 0,425 mm.

Les éprouvettes pour essais de compression à sec seront démoulées 24 heures après leur compactage; elles seront paraffinées ou conservées en sacs plastiques étanches durant la cure à l'air. Les conditions de cure (hygrométrie, température) devront être enregistrées.

MISE EN ŒUVRE DES SOLS-CIMENT.

La fabrication peut se faire en centrale; le répandage est alors effectué au bouteur, à la niveleuse ou au finisseur en couches d'épaisseur maximale de 25 cm. Les mélanges *in situ* sont exécutés au moyen de charrues à disques, de pulvimixeurs ou de malaxeurs rotatifs sur des profondeurs de 25 à 50 cm. La teneur en eau de compactage devra être comprise entre WOPM et WOPM-2.

La compacité à obtenir doit être au moins les 95 % de la densité OPM; le compactage se fera dans un délai de 2 à 3 heures après le maxalage au moyen d'un rouleau à pneus (charge par roue > 2 tonnes) ou au vibrant lourd.

Les déflexions maximales admissibles sous essieu de 13 tonnes ($Dm + 1{,}3\ \sigma$) au sommet de la couche de fondation dépendent du trafic et de la nature des couches de base. Des valeurs indicatives comprises entre 70/100 et 250/100 mm peuvent être proposées.

La circulation ne sera pas admise pendant les 7 premiers jours après la mise en œuvre.

• Cas des sols chaux.

Les recommandations complémentaires relatives aux sols traités à la chaux et mis en œuvre en couche de fondation se rapportent à l'indice de plasticité qui devra être supérieur à 10 et au passant à 0,425 mm qui devra être supérieur à 15. De plus, l'acceptabilité du mélange sera définie grâce au CBR qui devra être supérieur à 60 (après 4 jours d'immersion) pour une densité sèche correspondant à 95 % OPM. On arrive à ce résultat avec environ 6 % de chaux.

MISE EN ŒUVRE.

Le sol est scarifié et pulvérisé sur 15 cm; la chaux est répandue après, éventuellement, arrosage. Le mélange est réalisé par malaxage au pulvimixeur ou à la charrue à disques. Le compactage, permettant d'obtenir au moins 95 % OPM, est exécuté avec un compacteur à pieds de moutons et/ou au compacteur à pneus; le cylindre achève le lissage.

Scories volcaniques ou pouzzolanes.

QUALITÉ DES MATÉRIAUX.

Les ejecta du volcanisme récent, dont les manifestations affectent divers pays sous toutes les latitudes, sont souvent utilisés en corps de chaussée après criblage et parfois concassage en couche de fondation (et en couche de base pour les faibles trafics) ou après traitement (en couche de base). Certaines variétés de ces matériaux possèdent, d'autre part, des propriétés pouzzolaniques dont on peut tirer parti dans la réalisation des assises traitées (grave-pouzzolanes).

Les recommandations d'utilisation en couche de fondation sont les suivantes :

Granulométrie.

- *Dimension maximale 60 mm (qu'il vaut mieux réduire pour diminuer les risques de ségrégation).*
- *Fuseau granulométrique (après compactage) :*

	% passant
40 mm	85 - 100
31,5 mm	75 - 100
20 mm	50 - 90
10 mm	40 - 70
5 mm	30 - 60
2 mm	20 - 50
0,5 mm	12 - 32
0,08 mm	5 - 15

Plasticité.

Ces matériaux sont généralement peu ou pas plastiques. La plupart du temps, la condition IP < 15 *sera respectée.*

MISE EN ŒUVRE.

Le répandage se réalise au bouteur léger ou à la niveleuse. Un premier compactage au rouleau à grille fragmente les gros éléments du matériau sur lequel agit ensuite un vibrant.

La texture vacuolaire de ces matériaux a plusieurs conséquences. D'une part, leur densité sèche est souvent relativement faible; il ne s'ensuit pas qu'il faille les rejeter. D'autre part, la teneur en eau optimale n'est pas significative. Enfin, le nombre de passages des engins de terrassement et de compactage doit être déterminé sur planche expérimentale afin que des fines soient produites en quantité suffisante pour fermer les vides.

On demande 95 % au moins de la densité OPM; les couches sont mises en œuvre sur des épaisseurs unitaires maximales de 25 cm.

Matériaux coquilliers naturels ou améliorés.

Les dépôts zoogènes (sables coquilliers, banco coquillages) existant sur des plages récentes ou anciennes peuvent être exploités et mis en œuvre en couches de fondation et même en couches de base.

On utilise des tout-venants 0/50 qui, compactés au compacteur à pieds de mouton, ont des caractéristiques convenant à une couche de fondation.

Les spécifications à respecter se réduisent à l'exigence d'un CBR au moins égal à 30.

Une imprégnation ou une semi-pénétration au cut-back 400-600, à raison de 1,2 à 1,4 kg/m^2, permet une bonne fermeture de la couche et lui donne un surcroît de cohésion qui parfois lui fait défaut.

Il peut être nécessaire d'avoir à traiter le matériau dans la masse en lui incorporant du bitume ou du ciment. Les conditions de réalisation et de mise en œuvre des mélanges doivent être déterminées par des essais au laboratoire et sur planches expérimentales.

Les sels déposés sur les coquillages ou les coraux sont susceptibles de produire une modification de la mouillabilité, ce qui pourra conduire à adopter une catégorie de liant plus mou.

Matériaux coralliens naturels ou améliorés.

Les matériaux coralliens dragués en mer (soupe de corail) ou fossiles peuvent être sélectionnés sur la base de critères simples pour être utilisables en corps de chaussée.

Les éléments supérieurs à 50 mm sont écrêtés par des cribles placés sur la benne des camions.

La granulométrie du matériau doit être continue; le passant à 80 µm inférieur à 30 %; l'IP doit être inférieur à 25.

Le matériau est mélangé à la niveleuse, puis mis en œuvre et compacté à une teneur en eau comprise entre WOPM et la saturation.

On atteint 95 % de la densité OPM après 5 à 6 passes d'un rouleau à pneus de 25 tonnes.

On peut améliorer la couche de fondation servant d'assise à des couches de base en corail traité au bitume en ajoutant du ciment au matériau corallien; à partir de 3 % de ciment, il acquiert une résistance à la compression excédant 20 bars à 7 jours.

Des essais de laboratoire et des planches expérimentales sont nécessaires pour préciser les conditions de fabrication et d'utilisation de ces mélanges.

COUCHE DE BASE

La couche de base étant soumise à des sollicitations importantes, les matériaux qui la constituent doivent avoir des qualités suffisantes. Plusieurs critères conditionnent leur choix :

— leur indice portant;

— leur stabilité;

— la dureté de leur squelette;

— la résistance à la traction des couches liées ou rigidifiées.

L'indice portant *CBR* sera *au moins égal à 80* pour une densité sèche correspondant à *95 % de l'OPM*. Si le matériau naturel n'atteint pas cette portance, il devra être amélioré ou traité. Un indice CBR de 60 peut être admis pour le trafic T_1.

La déformabilité de la couche de base sera vérifiée à partir de mesures de déflexions ou d'essais de plaque.

Les matériaux de la couche de base peuvent subir une forte attrition sous le trafic, spécialement lorsque celle-ci n'a pas été rigidifiée, car la résistance au cisaillement est alors entièrement reprise par le frottement des grains entre eux.

La résistance à la fragmentation et à l'attrition sera définie par l'essai Los Angelès (LA), l'essai micro Deval (MDE) ou l'essai anglais Aggregate Crushing Value (ACV) [1]. On retiendra les valeurs admissibles suivantes :

TRAFICS T_1-T_3
ADMETTANT L'ESSIEU SIMPLE DE 8 À 10 TONNES

	Concassés	Matériaux liés
LA	$\leqslant$ 45	< 50
MDE	$\leqslant$ 15	< 20
ACV	< 32	< 35

TRAFICS T_4-T_5 ET TOUS LES TRAFICS
ADMETTANT L'ESSIEU DE 13 TONNES

	Concassés	Matériaux liés
LA	$\leqslant$ 30	< 40
MDE	$\leqslant$ 12	< 18
ACV	< 25	< 30

Les autres recommandations d'utilisation et de mise en œuvre des matériaux de couche de base sont proposées ci-après.

(1) Voir les modes opératoires en annexe.

Graveleux latéritiques naturels.

QUALITÉ DES MATÉRIAUX.

Une exigence plus sévère que pour la couche de fondation ne fait retenir, pour la couche de base, que les meilleurs matériaux des gisements de latérite; leurs caractéristiques géotechniques sont généralement insuffisantes pour qu'ils puissent être utilisés dans le cas de trafics T_4 et T_5.

Le fuseau granulométrique, à l'intérieur duquel devra s'inscrire la courbe, est le suivant :

	% passant (1)
50 mm	100
40 mm	95-100
31,5 mm	85-100
20 mm	60-100
10 mm	35- 90
5 mm	20- 75
2 mm	12- 50
1 mm	10- 40
0,5 mm	7- 35
80 µm	4- 20

Le pourcentage des fines restera inférieur à 20 % et l'IP à 15.

L'augmentation du pourcentage de fines, avant et après compactage (à l'essai Proctor), devra rester inférieure à 8 %.

Le gonflement mesuré lors de l'essai CBR devra rester inférieur à 1 %.

La densité OPM devra être au moins égale à 2.

MISE EN ŒUVRE.

Le répandage s'effectuera au bouteur ou à la niveleuse; la teneur en eau de compactage sera $W_{OPM} \pm 1$; la compacité à atteindre sera au moins les 95 % de γ_dOPM. L'engin de compactage le mieux adapté est le rouleau lourd à pneus (charge par roue > 2 tonnes).

(1) Après compactage *in situ*.

L'épaisseur unitaire des couches compactées sera au maximum de 25 cm.

Les valeurs indicatives de déflexions admissibles sur la couche de base (Dm + 1,3 σ) sous essieu de 13 tonnes varient de 50/100 à 150/100 mm selon les trafics (T_3 à T_1).

Graveleux naturels traités au ciment ou à la chaux.

Les graveleux naturels, soit latéritiques, soit provenant d'autres gites (anciennes terrasses alluviales par exemple) peuvent être rendus aptes à être utilisés en couche de base par un traitement à la chaux ou au ciment.

Ils sont dits *améliorés* si, en leur ajoutant un faible pourcentage de chaux ou de ciment, ils ont un comportement qui reste souple. Ils sont, par contre, dits *stabilisés* quand ils acquièrent, par incorporation d'un pourcentage un peu plus élevé de ciment, une rigidité appréciable et une faible déformabilité.

Il est généralement nécessaire pour que les matériaux puissent, après traitement, satisfaire aux spécifications requises en matière de résistance et de portance, qu'ils aient, avant traitement, un CBR de l'ordre de 60.

• Graveleux améliorés au ciment ou à la chaux.

On les utilise en couche de base pour les trafics T_1 et T_2.

Les caractéristiques des matériaux susceptibles d'être traités sont les suivantes :

Dimension maximale	de 10 à 50 mm
Pourcentage de passant à 80 µm	inférieur à 35
Indice de plasticité	inférieur à 25
Module de plasticité	inférieur à 2 000
Teneur en matières organiques	inférieure à 1 %

Les exigences complémentaires, dans le cas de traitement à la chaux, se rapportent à l'indice de plasticité qui doit être supérieur à 10 et au passant à 0,425 mm dont le pourcentage doit être supérieur à 15.

Le matériau amélioré sera considéré comme satisfaisant si le CBR, à 95 % OPM, après 3 jours de cure à l'air et 4 jours d'immersion, est supérieur à 160.

● Graveleux stabilisés au ciment.

Ils conviennent pour tous les trafics, mais des raisons économiques évidentes les feront réserver aux trafics T_4 et T_5.

Les graveleux aptes à être stabilisés doivent avoir :

— une dimension maximale de 10 à 50 mm;

— un pourcentage de passant à 80 µm inférieur à 35 %;

— un indice de plasticité inférieur à 25;

— un coefficient d'uniformité $Cu = \frac{D60}{D10}$ supérieur à 10;

— un module de plasticité :

inférieur à 1 500 dans le cas d'un traitement en place,
inférieur à 700 dans le cas d'un traitement en centrale.

Le matériau stabilisé doit satisfaire aux exigences de résistance suivantes :

- La résistance à la compression simple (Rc), après 7 jours de cure à l'air des éprouvettes paraffinées, doit être supérieure à 18 bars et inférieure à 30 bars. Dans les mêmes conditions, la résistance à la traction mesurée par compression diamétrale (essai Brésilien) doit être supérieure à 3 bars.
- La résistance à la compression simple (R'c) sur éprouvette ayant subi 3 jours de cure à l'air et 4 jours d'immersion dans l'eau doit être supérieure à 5 bars.

Dans le cas de l'amélioration comme de la stabilisation, les éprouvettes seront réalisées conformément aux modes opératoires du CEBTP (détermination de la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale dans les moules Proctor ou CBR — poinçonnement sur moulages CBR — écrasements sur moulages Proctor (0/20) ou sur moulages CBR (O/D si D > 20 mm).

Les études au laboratoire seront menées en incorporant au graveleux un pourcentage de 2 à 6 % de liant. Le dosage optimal trouvé sera augmenté de 0,5 à 1 % lors du répandage sur le chantier.

Mise en œuvre.

La fabrication du mélange se fera en place avec des moyens puissants (pulvimixer de plus de 100 cv, par exemple) ou en centrale pour les trafics T_1 et T_2 et exclusivement en centrale pour les trafics plus importants.

Le répandage se fera à la niveleuse, au finisseur ou à la machine à coffrage glissant pour les trafics T_3 et T_4.

La teneur en eau de compactage sera comprise entre WOPM et WOPM-2. Le compactage se fera dans les 3 heures et même dans les 2 heures dans le cas de traitement au ciment suivant le malaxage par la combinaison d'un vibrant lourd (M/L > 20 kg/cm) [1] et d'un rouleau à pneus (charge par roue > 4 tonnes). On devra atteindre au moins 95 % de la γ_d OPM.

Les couches seront mises en œuvre sur des épaisseurs unitaires maximales de 25 cm.

Un enduit de cure constitué par une émulsion cationique contenant de 300 à 500 g de bitume résiduel au m² sera répandu sur la grave ciment dans un délai maximal de 4 heures après le compactage. Le trafic de chantier sera interdit pendant au moins 48 heures et de préférence pendant 7 jours.

Les déflexions maximales admissibles en 1/100 mm (Dm + 1,3 σ) seront comprises entre 40/100 et 125/100 selon les trafics (T_4 à T_1).

Concassé o/d (d ≤ 40 mm).

QUALITÉ DES MATÉRIAUX.

Les concassés *o/d* — appelés aussi tout-venants de concassage — proviennent de l'extraction en carrière de roches dures ou du concassage, après criblage, de la fraction *d*/D de graves alluvionnaires à gros éléments.

Les produits de carrières rocheuses sont entièrement concassés; les matériaux obtenus à partir de graves grossières contiennent fréquemment une fraction non concassée. On définit alors l'indice de concassage comme le pourcentage pondéral d'éléments du produit *o/d* provenant du concassage de la fraction *d*/D de la grave O/D d'origine. L'opération n'est généralement digne d'intérêt que si D ⩾ 4*d* et que si la proportion d'éléments > D est supérieure à 30 %.

Il est nécessaire, afin de disposer d'un matériau à angle de frottement interne le plus fort possible, d'exiger un indice de concassage d'autant plus élevé que le trafic est plus important et la charge légale par essieu plus lourde.

(1) M/L = charge statique par unité de largeur.

En tout état de cause, un indice de concassage de 100 % sera demandé pour les granulats à utiliser en couche de base devant supporter le trafic T_4, de 80 % pour le trafic T_3, de 60 % pour le trafic T_2.

Des graves à 40 % d'indice de concassage seront tolérées pour le trafic T_1.

On a longtemps considéré que l'on devait mettre en œuvre, quand on ne disposait que de concassé, des granulométries différentes en couche de fondation et en couche de base. En fait, il est possible de réaliser une chaussée à une seule couche de *o/d* s'il s'avère que son coût est moindre que celui d'une structure comportant une couche de fondation et une couche de base de granulométries différentes.

Les concassés *o/d* sont de plus en plus utilisés, mais donnent lieu à certains désordres si leur mise en œuvre n'est pas strictement réalisée.

Il faut limiter la granulométrie à la dimension maximale de 40 mm; les fuseaux de spécifications peuvent être les suivants, étant entendu que les courbes granulométriques doivent rester parallèles aux enveloppes du fuseau :

	% passant	
	0/31,5	0/40
50 mm		100
40 mm	100	95-100
31,5 mm	95-100	85- 97
20 mm	64- 90	65- 90
10 mm	40- 70	40- 75
6,3 mm	30- 60	30- 63
2 mm	20- 42	20- 45
0,5 mm	10- 26	12- 30
80 µm	2(4)- 10	4- 12

L'indice de plasticité de ces matériaux est souvent nul. On admettra, si tel n'est pas le cas :

$IP \leqslant 6$ pour les trafics T_1 et T_2

$IP = 0$ pour les trafics plus élevés.

Le pourcentage de fines devra rester inférieur à 10 % (0/31,5) ou à 12 % (0/40), mais devra être supérieur à 4 % si l'indice de plasticité est nul. Si l'indice de plasticité est compris entre 0 et 6, la teneur en fines devra rester comprise entre 2 et 5 %.

L'équivalent de sable (ES) sera :

$$ES \geqslant 30 \text{ pour } T_1\text{-}T_2$$
$$ES \geqslant 40 \text{ pour } T_3\text{-}T_4$$

Les spécifications de coefficient Los Angelès, Micro Deval et l'Aggregate Crushing Value ont été données. Elles devront être respectées.

EXTRACTION.

Le matériau est exploité en carrière, puis traité dans une centrale de concassage où certaines fractions granulométriques auront à être recyclées si la courbe granulométrique du matériau issu d'un premier circuit n'est pas satisfaisante.

MISE EN ŒUVRE.

Le granulat sera mis en œuvre au bouteur, à la niveleuse ou au finisseur (pour les trafics T_3 et T_4) en couches d'épaisseur unitaire maximale de 25 cm qui seront compactées au rouleau vibrant lourd (M/L > 30 kg/cm) (1) et au rouleau à pneus (charge par roue > 3 tonnes).

La surface de la couche de base sera fermée par une imprégnation au moyen d'un bitume fluidifié (cut-back) 0/1 ou 10/15 suivie d'un sablage.

On devra obtenir au moins 98 % de la densité OPM. La teneur en eau sera comprise entre WOPM ± 1. Le pourcentage de vides total $n = 100 \left(1 - \frac{\gamma^d}{\gamma^s}\right)$ devra rester inférieur à 15 %; il est même souhaitable que ce pourcentage n'excède pas 13 %.

Les valeurs indicatives de la déflexion admissible sur ces matériaux sous essieu de 13 tonnes sont comprises entre 50/100 à 200/100 selon le trafic attendu (T_4 à T_1).

Les accotements devront être réalisés avec du matériau identique ou ayant une perméabilité au moins égale à celle du concassé afin d'assurer le drainage de la couche de base. La structure dite chaussée en baignoire doit absolument être évitée.

(1) M/L = charge statique par unité de largeur.

Bétons de sols.

NATURE ET QUALITÉ DES MATÉRIAUX.

L'amélioration dite mécanique des matériaux utilisés en couches de chaussées, et singulièrement en couches de base, a souvent conduit à des déboires, aussi doit-on être très prudent quand on réalise des structures mettant cette technique en œuvre.

Toutefois, pour des trafics T_1 et T_2, il ne convient pas, surtout si la région est pauvre en matériaux, de rejeter cette possibilité qui, dans certains cas, a donné de bons résultats.

La réalisation d'un béton de sols consiste à ajouter à un sol de base généralement un peu trop plastique ou un peu trop riche en fines et manquant de squelette (il s'agira souvent d'une grave latéritique argileuse) une certaine proportion d'un autre matériau non plastique et à très bon squelette.

Les proportions optimales de chaque constituant et les conditions de leur mise en œuvre sur chantier seront déterminées par essais de laboratoire et planches expérimentales.

Par exemple, des graves latéritiques ayant les caractéristiques suivantes :

— passant à 40 mm : 100 %;
— passant à 2 mm : 20 à 50 %;
— passant à 80 μm : 10 à 25 %;
— IP : $\leqslant$ 20;
— CBR (à 95 % OPM) : 40 à 60,

peuvent être très nettement améliorées si on leur ajoute environ 30 % en poids :

— soit d'un tout-venant pierreux anguleux 0/40, à moins de 30 % de passant à 2 mm et moins de 18 % de passant à 80 μm, à IP nul et à CBR à 95 % OPM de l'ordre de 90;

— soit d'un concassé de carrière à granulométrie discontinue 12/40 par exemple;

— soit d'un autre matériau issu des ressources locales.

Le mélange doit avoir un IP inférieur à 6 et un CBR à 95 % OPM supérieur à 80.

MISE EN ŒUVRE.

L'approvisionnement des constituants en cordons sera suivi de leur régalage sans compactage, de leur humidification éventuelle, de leur mélange par scarification à la niveleuse et de leur remise en cordons à la lame. On procédera ensuite à leur malaxage par déplacements latéraux du cordon à la niveleuse avec humidification, si besoin, pour atteindre la teneur en eau optimale de compactage. Lorsque le mélange est homogène, il est répandu et compacté au compacteur à pneus.

Les mélanges peuvent aussi être répandus et malaxés au pulvimixer.

Une planche expérimentale est indispensable à réaliser avant d'adopter sur le chantier la formule optimale qui aura été définie par des essais de laboratoire.

Sable argileux traité au ciment ou à la chaux.

Les sables argileux traités au ciment ou à la chaux peuvent, pour des trafics T_1 et T_2 et parfois T_3, constituer des couches de base convenables. Leurs conditions de traitement et les performances à obtenir sont voisines de celles relatives aux graveleux dont ils diffèrent par la granulométrie.

On distinguera les sables argileux simplement *améliorés* à la chaux ou au ciment des matériaux *stabilisés* au ciment.

• Sable argileux amélioré au ciment ou à la chaux.

Les différences de caractéristiques d'avec les graveleux sont relatives :
— à la dimension maximale des grains qui sera de 1 à 10 mm;
— au pourcentage de fines qui restera inférieur à 40 %;
— au coefficient d'uniformité qui devra être supérieur à 5.

• Sable argileux stabilisé au ciment.

La dimension maximale des grains sera de 2 à 10 mm, les autres caractéristiques de matériaux utilisables sont identiques à celles des graveleux.

PERFORMANCES DES MÉLANGES.

Les mêmes performances que celles de graveleux traités sont à exiger de ces matériaux.

MISE EN ŒUVRE.

Les mêmes conditions de mise en œuvre que pour les graveleux traités peuvent être recommandées.

Sable bitume.

QUALITÉ DES MATÉRIAUX.

Bien que mis en œuvre sur des épaisseurs assez faibles, le sable bitume, en couche de base, a un comportement très satisfaisant pour des trafics T_1 à T_3.

Le matériau doit avoir les caractéristiques ci-après :

— limite de liquidité : $\leqslant 40$;
— indice de plasticité : $\leqslant 15$;
— passant à 80 μ m : $10 \leqslant f \leqslant 30$;
— coefficient d'uniformité Cu : > 5.

Le liant bitumineux peut être :

— soit du bitume fluidifié 10/15 ou 50/100;
— soit une émulsion surstabilisée à base de bitume 80/100 à 65 % de bitume résiduel.

En pays sahélien, un bitume dur (60/70) sera utilisé comme base du bitume fluidifié.

On devra obtenir pour le mélange, selon les trafics, les performances suivantes :

	T_1	T_2	T_3
Stabilité Hubbard-Field (en kg) à 60° (avant immersion)	> 500	> 500	> 700
A 18° (après semi-immersion de 7 jours)	> 300	> 300	> 400
Gonflement maximal	2 %	2 %	2 %
Absorption maximale	4 %	4 %	4 %

MISE EN ŒUVRE.

La fabrication a lieu en place ou en centrale (pour T_1 et T_2) et en centrale pour T_3.

Le répandage s'effectue à la niveleuse ou au finisseur (pour T_3). Le compactage est réalisé sous compacteur à pneus, puis cylindre lisse.

L'épaisseur de mise en œuvre est de 10 cm minimum à 20 cm maximum.

Les déflexions admissibles ($Dm + 1{,}3\ \sigma$) indicatives varient de 65/100 à 150/100 mm (trafics T_3 à T_1).

Autres matériaux traités.

Les matériaux spécifiques à certaines régions, tels que les *sables* et *graves coquilliers* ou *coralliens* peuvent, dans le cas de trafics T_1 et T_2, être utilisés après traitement, en couche de base, pourvu que les performances obtenues soient suffisantes et conformes à celles requises pour les graves et les sables traités.

Du bitume ou du ciment pourront être ajoutés au matériau.

Les sels déposés sur les coquillages ou les coraux sont susceptibles de produire une modification de la mouillabilité, ce qui pourra conduire à adopter une catégorie de liant plus mou.

Essais de laboratoire et planches expérimentales devront préciser les conditions de fabrication et de mise en œuvre de ces matériaux.

Grave bitume.

QUALITÉ DES MATÉRIAUX.

Ces matériaux, très performants, associent à une faible teneur en bitume, une forte compacité. Leur grande stabilité mécanique est assurée par le frottement interne élevé dû au squelette minéral et par la forte cohésion apportée par le bitume.

La granulométrie maximale de la grave doit être limitée à 31,5 mm.

Les granulométries sont, la plupart du temps, reconstituées à partir des fractions 0/6 et 6/20 ou 0/4, 4/10 et 10/20, 0/10 et 10/30. Les fuseaux suivants sont proposés :

0/31,5	Fuseau 1 % passant	Fuseau 2 % passant
40 mm	100	100
31,5 mm	95-100	95-100
10 mm	55- 82	40- 70
6,3 mm	47- 70	30- 57
2 mm	30- 50	18- 40
0,5 mm	17- 32	8- 25
80 µm	4- 10	4- 8

Le LCPC français propose, quant à lui, des formules semi-grenues et grenues en 0/20 et 0/31,5, dont on pourra aussi s'inspirer. Les fuseaux sont les suivants :

Passant	Formules semi-grenues		Formules grenues	
	0/20	0/31,5	0/20	0/31,5
10 mm		45-60		35-50
6 mm	45-60		45-50	
2 mm	25-40	20-35	20-35	15-30
0,6 mm	16-29	14-25	14-25	11-22
80 µ m	6- 9	6- 9	6- 9	6- 9

L'indice de concassage devra être de 100 %, le Los Angelès inférieur à 35. L'équivalent de sable du 0/2 supérieur à 40 (la grave est non plastique).

On utilisera un bitume 60/70 ou 80/100 dont la teneur sera de l'ordre de 3,5 à 5 % pour un module de richesse de 2,5 à 3 ou une émulsion à 60 ou 70 % de bitume résiduel 80/100 (grave émulsion).

La composition des mélanges sera étudiée de façon à obtenir les performances suivantes :

- *A l'essai Marshall à 60 °C :*

	Bitume 80/100
— stabilité Marshall	> 500 kg
— compacité	> 90 %
— fluage	< 4 mm

- *A l'essai Duriez dilaté à 18 °C :*

— résistance à la compression R_c	> 30 bars
— rapport $\frac{R'_c \text{ (après immersion)}}{R_c \text{ (avant immersion)}}$	> 0,6 (> 0,5 pour les graves émulsions)
— compacité Duriez	88 à 95 %

MISE EN ŒUVRE.

La fabrication se fait en centrale, le répandage au finisseur. Le compactage doit être intense; il est réalisé au moyen de compacteurs à pneus (charge par roue > 2,5 tonnes) et au vibrant lourd. Il faut que le pourcentage de vides en place soit inférieur à 10 %. La température de mise en œuvre, variable selon les bitumes, doit être surveillée.

Grave ciment.

QUALITÉ DES MATÉRIAUX.

Cette technique conduit à la réalisation d'un matériau rigide obtenu à partir de granulats sélectionnés dont la courbe granulométrique devra être parallèle aux limites de l'un des fuseaux suivants :

Passant	0/31,5 %		0/20 %
40 mm	100	100	
31,5 mm	95-100	95-100	
20 mm	62- 90	75-100	85-100
10 mm	40- 70	55- 82	52- 78
6,3 mm	30- 57	45- 70	40- 64
2 mm			25- 45
0,5 mm	10- 26	17- 32	12- 26
80 µm	2- 10	2- 10	2- 6

L'indice de concassage doit être d'au moins 25 % pour les faibles trafics et d'au moins 60 % pour les trafics élevés, le Los Angelès < 35 : l'ACV [1] < 28; l'équivalent de sable > 30; l'indice de plasticité nul; les matières organiques < 0,5 %.

L'incorporation de 3 à 4 % de ciment Portland ordinaire devra permettre d'obtenir les performances suivantes :

Résistance à la compression simple après 7 jours de cure à l'air.....	$Rc_7 > 35$ bars
Résistance à la compression simple après 28 jours de cure à l'air.....	$Rc_{28} > 50$ bars
Résistance à la traction par fendage diamétral (essai Brésilien) à 28 jours.....	$Rt_{28} > 5$ bars

MISE EN ŒUVRE.

La fabrication est réalisée en centrale, le répandage au finisseur ou à la machine à coffrages glissants; la teneur en eau de compactage doit être comprise entre WOPM et WOPM-2 %. L'épaisseur de mise en œuvre des couches varie de 15 cm à 30 cm.

Le compactage doit être très puissant. Il sera effectué moins de 3 heures après le malaxage au rouleau vibrant lourd et au rouleau à pneus de plus de 4 tonnes de charge par roue. Il devra permettre d'obtenir une densité d'au moins 95 % de l'OPM ou moins de 15 % de vides.

La couche traitée sera protégée de l'évaporation par un enduit de cure d'une émulsion cationique à 300 ou 500 g de bitume résiduel par m^2 au plus tard 4 heures après le compactage.

Le trafic ne sera pas autorisé avant 7 jours après le compactage.

COUCHES D'IMPRÉGNATION ET D'ACCROCHAGE

On donnait naguère de la cohésion aux macadams en répandant à leur surface un liant bitumineux qui pénétrait la couche sur plusieurs centimètres. Cette technique de pénétration se pratique encore, mais rarement.

L'imprégnation proprement dite n'affecte qu'une faible épaisseur (1 à 2 cm) de la couche que l'on traite afin d'imperméabiliser sa surface; elle assure aussi une meilleure adhérence entre une couche non traitée aux liants bitumineux et une couche bitumineuse. On parle alors de *couche d'accrochage* ou de collage.

(1) Aggregate Crushing Value.

On imprègne généralement une couche de base, mais on peut également imprégner une plate-forme ou toute autre couche que l'on souhaite protéger des intempéries.

En *imprégnation*, les liants utilisables selon les conditions peuvent être les suivants :

- *Sur matériau argileux à surface fermée :*
  Bitume fluidifié (cut-back) 0/1..... de 0,7 à 1 kg/m²
- *Sur matériau granuleux à surface ouverte :*
  Bitume fluidifié (cut-back) 10/15..... de 0,8 à 1,2 kg/m²
- *En climat (ou en période) humide, on pourra employer :*
  Une émulsion surstabilisée à 50-60 % de bitume à raison d'environ..... 2 kg/m²

En couche *d'accrochage* ou de *collage* entre une couche de base traitée et le revêtement, on utilisera des bitumes fluidifiés à séchage moyen (50/100 à 400/600) ou rapide (100/250) ou des émulsions à rupture rapide. Le dosage variera en fonction de la nature des couches à coller (de 0,6 à 0,4 kg/m² dans le cas de grave-ciment à 1 ou 1,5 kg/m² pour des couches de base à structure plus ouverte).

REVÊTEMENTS

La couche de roulement des chaussées revêtues peut être constituée d'enduits superficiels, de sand-asphalt, d'enrobés denses ou de bétons bitumineux.

Enduits superficiels.

Les enduits superficiels ont été longtemps réservés aux chaussées supportant des trafics faibles à moyens alors que les bétons bitumineux constituaient les tapis des routes fortement circulées. Les conditions de réussite des enduits superficiels étant maintenant mieux maîtrisées, on hésite moins à les utiliser beaucoup plus largement, y compris sur les autoroutes; c'est, en effet, une technique moins consommatrice d'énergie que les enrobés et qu'il ne convient pas de rejeter *a priori*.

De plus, c'est la solution qui s'impose dans le cadre d'aménagement progressif des chaussées, quand on souhaite reporter à quelques années la mise en place d'un tapis de béton bitumineux. On a aussi recours à cette solution lorsque l'on doit attendre la stabilisation d'un corps de chaussée sous le trafic.

Les fiches de structures du Guide ne prévoient la mise en œuvre habituelle des enduits superficiels que pour les trafics T_1 et T_2. On ne devra cependant pas les exclure dans le cas de trafics plus élevés mais, compte tenu qu'ils ne participent pas à la structure du point de vue de l'équivalence des matériaux, on devra alors considérer qu'un rechargement en béton bitumineux devra être mis en place entre 2 à 8 ans, selon les trafics, après la mise en service de la chaussée (cf. page 33).

La formulation des enduits superficiels peut, en première approximation et avant la réalisation d'une planche expérimentale, être basée sur les recommandations suivantes :

LIANTS.

Bien que les bitumes purs 80/100 et 180/200 soient utilisés, ils ne sont pas conseillés. On préfèrera :

— le bitume fluidifié (cut-back) 400/600 en zones tempérées et le 800/1 400 en régions chaudes. Le 150/250, trop fluide, doit être évité;

— l'émulsion cationique à 60 % de bitume 80/100.

GRANULATS.

Ils doivent être issus de roches dures, ne pas être pollués, avoir une forme satisfaisante et une bonne adhésivité au bitume.

- *Dureté* (résistance à l'attrition, à la fragmentation et au polissage).

Selon le trafic, les exigences seront les suivantes :

Trafic total (en véhicules par jour) :

	LA	MDE*	ACV**	CPA***
< 500	< 35	< 20	< 26	> 0,4
500-2 000	< 30	< 20	< 23	> 0,4
2 000-5 000	< 25	< 15	< 20	> 0,4
> 5 000	< 20	< 10	< 16	> 0,45

* Micro-Deval en présence d'eau.
** Aggregate Crushing Value.
*** Coefficient de polissage accéléré.

● *Propreté-adhésivité.*

La propreté des granulats est une condition importante de la réussite des enduits superficiels; elle est caractérisée par le pourcentage de passant à 0,5 mm qui devra être inférieur à 2 % dans le cas de trafics faibles et à 0,5 % pour les trafics élevés.

Une mauvaise adhésivité peut être due non seulement à la présence de mines polluant le matériau, mais aussi tenir à la nature de la roche; des dopes doivent être ajoutés au liant dans le cas de granulats siliceux (quartzite, grès dur, rhyolite).

● *Forme et tolérances granulométriques.*

Le coefficient d'aplatissement exprimé par le pourcentage en poids de granulats plats (c'est-à-dire ceux dont le rapport $\frac{G}{E}$ est supérieur à 1,58 — $\left.\begin{matrix} G = \text{grosseur} \\ E = \text{épaisseur} \end{matrix}\right)$ est un indicateur de la forme des granulats. Il doit être inférieur à 25 pour les trafics faibles, à 20 pour les trafics moyens et à 10 pour les trafics supérieurs à 5 000 véhicules par jour.

Les tolérances granulométriques pour un granulat d/D peuvent être exprimées par :

— le refus à D et le tamisat à d qui doivent rester chacun inférieurs à 15 %;

— la variation (par rapport à la courbe granulométrique moyenne du fuseau) du refus à $\frac{D + d}{2}$ qui doit rester inférieur à 15 %.

● *Dimension des granulats.*

On utilise beaucoup les dimensions 4/6 - 6/10 - 10/14, mais d'autres possibilités dépendant des usages locaux existent : 5/15 - 15/25 par exemple ou 6/10 - 10/14 - 14/18; on peut aussi utiliser des coupures granulométriques présentant des discontinuités entre elles; par exemple : 6/10 - 14/18 au lieu de 6/10 - 10/14 - 14/18; ces formules discontinues ont actuellement la faveur des projeteurs.

● *Dosage.*

On peut recommander l'emploi de l'abaque Shell qui donne généralement de bons résultats permettant d'avoir les valeurs de base pour l'exécution de planches expérimentales.

Méthode Shell*

Détermination des dosages pour enduits superficiels

Calcul des facteurs de correction (additionner avec leur signe)

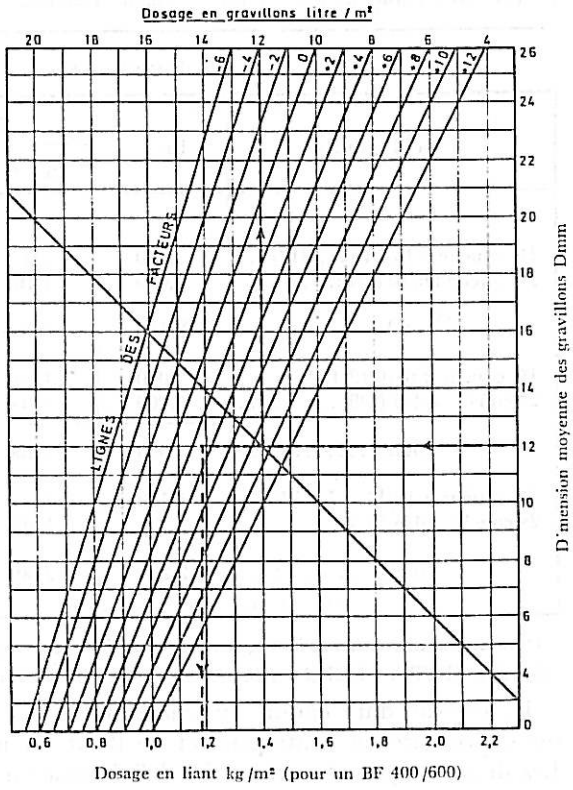
Trafic journalier		État de surface de la couche à recouvrir		Type de granulat		Conditions climatiques	
Poids lourd	Correction	État	Correction	Type	Correction	Conditions	Correction
0- 15	+2	Très ouverte.	+4	Plaquettes...	−2	Humide et froid...	+2
15- 45	+1	Ouverte....	+2	Cubiques...	0	Humide....	+1
45- 150	0	Moyenne...	0	Rond.....	+2	Tempéré ...	0
150- 450	−2	Grasse.....	−1			Sec.....	−1
450-1500	−4	Très grasse..	−3			Sec et chaud	−2
1500-4500	−6						

Exemple : D = 12 mm

	facteur
Trafic 150 - 450.....	— 2
Surface ouverte.....	+ 2
Granulat rond.....	+ 2
Humide.....	+ 1
TOTAL.....	+ 3

LIANT..... 1,2 kg/m²

GRAVILLONS..... 12 l/m²



* Shell bitumen review n° 5 — march 1959 — Shell international Petroleum Cie limited. Jackson GP. 1959 surface dressing.

On pourra aussi s'inspirer de la Directive française pour la réalisation des enduits superficiels de février 1972 (cf. tableau).

MONOCOUCHES

Type d'enduits	BF		Émulsion		Granulats l/m²
	150/250	400/600	65 %	70 %	
4/6 (5/8) (*)...	0,850	0,900	1,200	1,100	6,5 à 7,5
6/10 (8/12,5) ...	1,100	1,150	1,500	1,400	9 à 10
10/14 (12,5/18)...	1,450	1,500	—	1,850	12,5 à 14

(*) 4/6 : maille tamis — (5/8) : diamètre passoire.

BICOUCHES

Type d'enduits	BF	Émulsion		Granulats l/m²
		65 %	70 %	
1re couche : 10/14 (12,5/18)...	1,100	1,800	1,600	11 à 13
2e couche : 6/10 (8/12,5).....	1,000	1,100	1,000	7 à 8
Total.....	2,100	2,900	2,600	
1re couche : 6/10 (8/12,5).....	1,000	1,300	1,200	9 à 10
2e couche : 4/6 (5/8).....	0,800	1,100	1,000	6 à 7
Total.....	1,800	2,400	2,200	
1re couche : 10/14 (12,5/18)...	1,100	1,500	1,300	11 à 13
2e couche : 4/6 (5/8).....	1,100	1,100	1,000	6 à 7
Total.....	2,200	2,600	2,300	

Formulations moyennes : Dosage en liant (kg/m²) et en granulats (l/m²).
Directive SETRA - LCPC sur la réalisation des enduits artificiels — Février 1972.

La réussite d'un enduit superficiel dépend, dans une très large mesure, du savoir-faire de l'entreprise et de l'état du matériel dont elle dispose. Les dosages optimaux ayant été définis grâce à la planche expérimentale, la réalisation d'un enduit bien fait dépend principalement du chauffage du liant à la température convenable et de la régularité de fonctionnement des systèmes d'épandage.

Micro-enrobés (sand asphalt).

Ce matériau est recommandé pour les revêtements de chaussées devant supporter des trafics T_1 et T_2 dans les régions riches en sable ou lorsqu'on dispose de stocks de sable issu du concassage de roches en carrières; un mélange de sable éolien et de sable de concassage peut également convenir. Mis en œuvre sur des épaisseurs faibles (3 et 4 cm), son comportement demeure satisfaisant pendant de longues années. Il peut présenter des défauts d'étanchéité aussi doit-on éviter de l'utiliser sur des couches de base en concassé 0/40.

On peut remédier au risque de glissance à craindre avec ce matériau en le cloutant par un faible apport de granulats épandus à la surface du tapis au moment de sa réalisation. 4 à 5 kg/m² de granulats durs, de taille 10/14, peuvent être utilisés.

Les spécifications suivantes peuvent être recommandées :

GRANULOMÉTRIE.

Passant (en mm)

6,3	100
2	75-100
1	50- 96
0,5	25- 88
0,2	10- 50
0,08	6- 14

$$3{,}5 < Cu = \frac{D\,60}{D\,10} < 20 \;;\; 1 < Cc = \frac{(D\,30)^2}{D\,10 \times D\,60} < 3$$

IP non mesurable.

Équivalent de sable $\geqslant$ 40

Bitume : 80/100 ou 60/70.

Compacité Hubbard-Field $\geqslant$ 80 %.

Fabrication en centrale, répandage au finisseur et compactage au cylindre lisse.

Les modules de richesse sont au maximum de 4,2, ce qui correspond à des teneurs en bitume de l'ordre de 7 %.

Enrobés denses.

Les enrobés denses sont des matériaux à faible pourcentage de vides, largement utilisés jusqu'ici en pays tropicaux en revêtement de chaussées supportant des trafics T_1 à T_3. Les granulométries varient du 0/6 au 0/16. Le diamètre maximal des éléments devra être compris entre 1/3 et 1/4 de l'épaisseur du tapis mis en œuvre.

- Les granulats devront avoir un Los Angelès inférieur à 40 pour les trafics T_1 et T_2 et inférieur à 35 pour les trafics T_3 et T_4.
- Le sable grossier sera préférentiellement issu du concassage de roches de Los Angelès < 40.
- Le sable fin pourra être d'origine éolienne, marine ou provenir de roches concassées. Son équivalent de sable sera > 60.
- Les fines d'apport auront un IP nul. Il pourra s'agir de farines minérales, de limons inertes, de chaux ou de ciment.

Les fuseaux granulométriques suivants sont proposés :

Passant	0/10		0/14
20 mm			100
14 mm	100	100	95-100
10 mm	80-100	95-100	75-100
6,3 mm	60-100	65- 92	50- 88
2 mm	25- 75	25- 65	23- 60
0,2 mm	6- 25	6- 20	6- 20
0,08 mm	3- 7	3- 8	3- 8

Les mélanges comportant 4 à 7 % de bitume (module de richesse : 3 à 4) seront étudiés au moyen des essais Marshall et Duriez. Les caractéristiques suivantes devront être obtenues :

Bitume	80/100	60/70
Essai Marshall (50 coups)		
Compacité.....	92-96 %	
Fluage.....	< 2-4 mm	
Stabilité à 60 °C.....	> 600 kg	> 700 kg
Essai Duriez (8 jours 18 °C 1 mm/s)		
Résistance à la compression.....	> 30 bars	> 35 bars
Compacité.....	90-94 %	
Taux d'absorption d'eau	< 5 %	
$\frac{R'c}{Rc}$	⩽ 0,7	

Bétons bitumineux.

Ces matériaux sont des enrobés bitumineux hautement élaborés que l'on utilisera surtout pour le revêtement des chaussées supportant les trafics T_4 et T_5. Ils ne seront mis en œuvre que si l'on est assuré de disposer d'un excellent support : couche de base en matériau traité peu déformable, chaussée réalisée dans l'optique d'un aménagement progressif et ayant acquis une certaine maturité sous le trafic.

Les granulats doivent être de bonne qualité et la composition du mélange bien étudiée. Les bétons bitumineux contiennent habituellement 5 à 8 % de bitume (module de richesse : 3,5 à 4), les granulats entrant dans leur composition sont des gravillons concassés de taille maximale 8 à 14 mm et des sables propres dont l'ES devra être supérieur à 40 dans le cas de sables concassés et supérieur à 70 pour les sables roulés. Le Los Angelès sera inférieur à 35 pour les trafics T_3 et T_4 et à 30 pour le trafic T_5.

Les pourcentages des diverses fractions servant à constituer le mélange peuvent être les suivants :

Granulométrie du béton bitumineux	0/8	0/10	0/12	0/14
Refus à 6 mm	10-25	25-35	32-42	40-50
Refus à 2 mm	30-50	55-70	57-72	60-75
Teneur en fines	6-10	5- 9	4- 8	4- 8

De nombreuses formules pourront être utilisées. On se reportera à la directive SETRA-LCPC pour la réalisation des couches de surface de chaussées en béton bitumineux. Les spécifications françaises seront adaptées aux conditions des pays tropicaux où il n'y a pas lieu de craindre une rigidification du matériau due au froid. Par contre, un vieillissement très rapide de certains bitumes est parfois observé d'où une augmentation importante de la rigidité des enrobés.

Les qualités à obtenir des mélanges peuvent être les suivantes :

Bitume	80/100	60/70	40/50
Essai Marshall (50 coups)			
Compacité	96 à 98 %		
Fluage	< 4 mm		
Stabilité à 60 °C	⩾ 800 kg	⩾ 900 kg	⩾ 1.000 kg
Essai Duriez (8 jours-18 °C) 1 mm/s			
Résistance à la compression	⩾ 50 bars	⩾ 60 bars	⩾ 70 bars
Compacité	92 à 94 %		
$\frac{R'c}{Rc}$	⩾ 0,75		
Taux d'absorption d'eau	< 3 %		

Comme pour les enrobés denses, les bétons bitumineux seront préparés en centrale, mis en place au finisseur et compactés au moyen d'ateliers comportant des compacteurs à pneus et des tandems lisses.

Remarque sur les tapis minces d'enrobés.

Ils sont, en principe, employés dans le cas où un enduit ne peut pas être réalisé, par manque de granulats convenables par exemple. Il faut alors utiliser des enrobés souples (sand-asphalt ou enrobé 0/10 à bitume 80/100). L'attention doit, d'autre part, être attirée sur le caractère limite de la technique de répandage et de compactage de ces couches minces.

Types particuliers de revêtements.

Revêtements en enrobés bitumineux antidérapants.

Ces bétons bitumineux, à formule discontinue, seront mis en œuvre en faible épaisseur (3 cm pour le 0/10 et 4 cm pour le 0/14); les fractions 2/6 pour le 0/10 et 6/10 ou 4/10 pour le 0/14 sont éliminées et stockées pour être utilisées ailleurs en enduit superficiel.

Bétons bitumineux cloutés.

Dans le cas des régions pauvres en matériaux durs, où surtout sont utilisés des granulats polissables, on répandra à la surface du béton bitumineux, au moment de sa mise en place, avant cylindrage, 5 à 6 kg/m^2 de granulats durs 10/14.

Enrobés au bitume et au soufre.

Dans les régions pétrolières, le soufre est un sous-produit du raffinage qui peut être utilisé pour environ 20 % dans les mélanges bitumineux (béton bitumineux ou sable bitumineux des couches de base et des revêtements).

Il est recommandé, avant de préconiser toutes ces formules, de les étudier au laboratoire et de les tester sur des planches expérimentales.

Revêtements pour très faibles trafics.

On doit rappeler que les techniques du sablage sur répandage de liant et d'enduit avec graveleux sont d'une réalisation économique sur les routes à très faible trafic.

Types de bitumes.

On a longtemps utilisé le 80/100 presque exclusivement, puis on a employé un bitume plus dur 60/70 résistant mieux à l'orniérage sous climat chaud. On a même proposé le 40/50, mais il apparaît que ce bitume, trop dur, a un comportement à moyen terme défavorable. Il vieillit trop vite. Les bitumes les plus satisfaisants sont actuellement le 60/70 dont on doit recommander l'utilisation et le 80/100.

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES ANNEXES DE LA CHAUSSÉE

LES ACCOTEMENTS

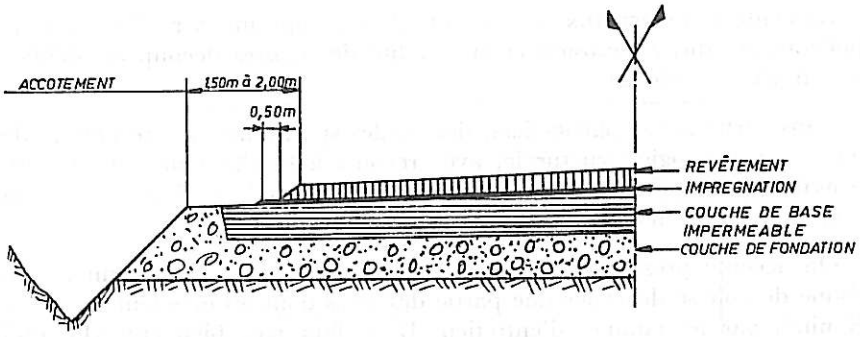
Les accotements ont un rôle important de butee et de drainage de la chaussée. Les impératifs techniques suivants devront prévaloir sur les considérations économiques visant à constituer les accotements à moindre coût :

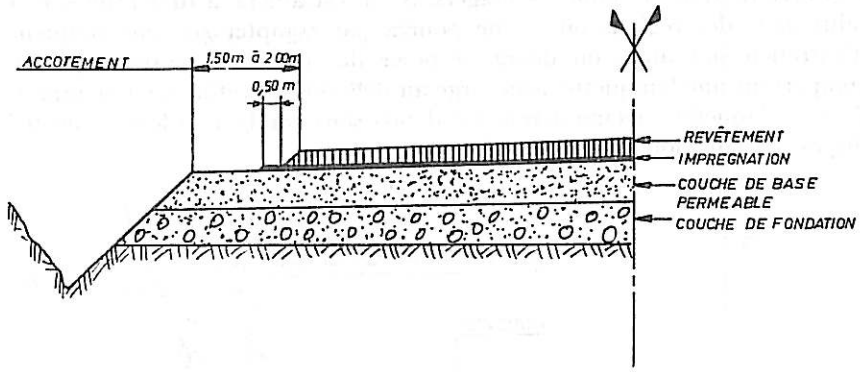
— éviter absolument la réalisation d'une chaussée en baignoire;

— réserver la possibilité d'élargissement ultérieur de la chaussée;

— permettre l'évacuation rapide des eaux de pluie.

Les profils types suivants satisfont à ces conditions. On évite notamment ainsi d'enfermer une couche de base perméable (en o/d concassé par exemple) entre des matériaux imperméables.





N.B. — Pente transversale du revêtement : 2,5 %;
4 % pour accotements non stabilisés;
6 % pour accotements stabilisés ou imprégnés.

Le revêtement des accotements des chaussées à faible trafic sera réalisé au moyen d'une imprégnation sur au moins 50 cm de largeur. Pour les chaussées supportant des trafics supérieurs à T_3, il est recommandé de prévoir un monocouche sur au moins 1 m au-delà de la bordure de la couche de roulement et sur 2 m en pays désertique.

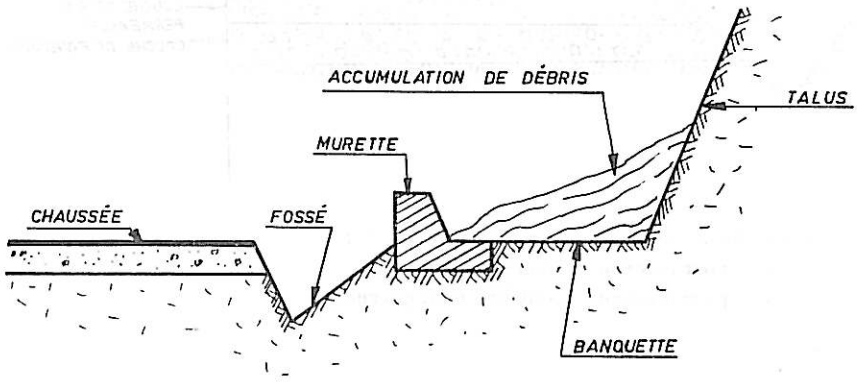
Les accotements servant occasionnellement d'aire de stationnement ou d'arrêt, la portance des matériaux qui les constituent doit rester suffisante (CBR minimum de 20 pour les trafics T_1 à T_3 et de 30 pour T_4 et T_5).

PENTE DES TALUS

La pente à donner aux talus résulte d'un compromis à réaliser entre les phénomènes dûs à l'érosion et la stabilité des masses découpées (déblais) ou édifiées (remblais).

Dans certains cas particuliers, des études spécifiques de mécanique des sols ou de géologie structurale, avec recours à l'ordinateur, seront indispensables pour définir des pentes à donner aux talus de déblais ou les conditions de réalisation des remblais sur sols compressibles.

On accepte presque toujours, quand on dresse des déblais, un certain risque de voir se dégrader une partie des talus dont les éboulements seront éliminés par les équipes d'entretien. Il ne faut pas, bien entendu, qu'il s'ensuive de dangers pour les usagers. Si on est amené à dimensionner des talus dans des régions où on ne pourra pas compter sur une fréquence d'entretien suffisante, on devra proposer des profils en travers spéciaux comportant une banquette assez large au-delà du fossé et même une murette derrière laquelle s'accumuleront les débris sans combler le fossé; une telle disposition améliore la visibilité.



Les valeurs données ci-après sont des ordres de grandeur des pentes habituelles selon lesquelles sont dressés les remblais et taillés les déblais.

Dans le cas des déblais de hauteur importante, au-delà de 8 m dans le cas général, le talus devra comporter des risbermes dont la conception en ce qui concerne le profil et le drainage dépendra de la nature des terrains; l'exécution de fossés de crête et de descentes d'eau sera fonction des mêmes impératifs.

En zones désertiques à dunes mouvantes, le projet devra au maximum « coller » au terrain, de façon à éviter toutes les possibilités d'accumulation des sables; les pentes resteront alors toujours faibles (4/1 à 6/1).

Remblais	Pente des talus	
	Horizontal	Vertical
Pour les hauteurs inférieures à 1 m et quelle que soit la nature des matériaux les constituant.....	3	1
Pour les hauteurs supérieures à 1 m et pour tous les matériaux (sauf les sables pulvérulents).....	1,5	1
Pour les hauteurs supérieures à 1 m et quelle que soit la hauteur au-delà de ce minimum, lorsque le remblai est constitué de sable peu cohésif.....	2	1
Pour les remblais reposant sur sol de fondation vaseux ou d'argile molle.....	Étude spéciale de stabilité	

Déblais	Pente des talus	
	Horizontal	Vertical
En terrain rocheux sain et* quelle que soit la hauteur.....	Verticale	
Dans la roche peu altérée et* quelle que soit la hauteur.....	1	6
Dans les matériaux latérisés et à prédominance sableuse :		
hauteur < 3 m	1	4
3 m < hauteur < 10 m	1	3
10 m < hauteur < 20 m	1	2
Dans les matériaux latérisés et à prédominance argileuse* :		
hauteur < 3 m	1	5
3 m < hauteur < 10 m	1	4
10 m < hauteur < 20 m	1	3
Dans les matériaux d'origine sédimentaire, sable fin cohésif, limons, etc.....	1	1
Dans les sables dénués de toute cohésion, quelle que soit la hauteur.....	2	1

* La pente des talus dans les matériaux schisteux ou stratifiés pouvant dépendre des valeurs du pendage et de sa direction, on devra en tenir compte dans les cas où ce phénomène est apparent et procéder à une analyse structurale du massif.

DRAINAGE

On renverra aux ouvrages spécialisés pour la réalisation des systèmes de drainage dont on distingue deux types :

— le drainage superficiel destiné à évacuer les eaux de ruissellement;

— le drainage profond dont le but est l'élimination de l'eau excédentaire contenue dans les sols.

En cas de comportement défectueux d'une chaussée, il conviendra, en premier lieu, de vérifier si le drainage ne peut être mis en cause avant d'entreprendre d'autres investigations. L'imbibition de la plate-forme et les remontées capillaires sont les causes principales de perte de portance des sols contre lesquelles il faut se prémunir.

On rappellera que le matériau utilisé comme filtre doit satisfaire à certaines exigences de granulométrie pour qu'il ne soit pas contaminé par les fines du terrain encaissant. On retiendra :

Le critère de Terzaghi :

$$4\ S_{15} < F_{15} < 4\ S_{85}$$

et/ou celui de Coquand :

$$5\ S_{15} < F_{15} < 5\ S_{85}$$

ou encore :

$$5 < \frac{F\ 50}{S\ 50} < 10$$

S_{15}, S_{50}, S_{85} : mailles des tamis à travers lesquels passent respectivement 15, 50 ou 85 % en poids du sol.

F_{15}, F_{50}, F_{85} : *idem* pour le matériau filtrant.

VÉRIFICATION THÉORIQUE DES CONTRAINTES DANS LE CORPS DE CHAUSSÉE

Le critère de résistance au poinçonnement du sol de plate-forme devient moins important que celui de la résistance à la traction des couches rigidifiées lorsque les matériaux sont traités par des liants.

L'effet de dalle répartit les pressions en diminuant les contraintes agissant sur le sol de plate-forme mais produit par flexion des contraintes de traction qui peuvent amorcer la rupture des couches rigidifiées.

La démarche de vérification des contraintes dans les structures de chaussées comporte les opérations suivantes :

1° Définition du corps de chaussée;

2° Détermination des charges agissantes;

3° Caractérisation des matériaux;

4° Détermination des contraintes et déformations;

5° Comparaison des contraintes exercées et des performances des matériaux.

DÉFINITION DU CORPS DE CHAUSSÉE

On pourra soit ramener à un modèle simplifié la chaussée étudiée, soit prendre en compte toutes ses couches en considérant aussi la nature de leurs relations réciproques d'interface (glissement parfait, partiel ou non glissement).

● Dans le premier cas, on aura un *système bicouche* constitué d'une couche supérieure : couche de roulement et couche de base — par exemple béton bitumineux et grave bitume — et d'une couche inférieure d'épaisseur infinie : couche de fondation et sol de plate-forme.

● Dans le second cas, il faudra prendre en compte un *multicouche ;* des catalogues d'abaques sont disponibles pour traiter sans trop de difficultés les bicouches et les tricouches.

Pour les multicouches, il faudra faire appel à l'ordinateur et utiliser les programmes « Alizé 3 » du LCPC, « Milfeuil » du LBTP d'Abidjan ou « Ramsès » du CEBTP. On peut étudier ainsi des systèmes de 3 à 6 couches. Chaque couche sera caractérisée par :

— son épaisseur h;

— son module élastique E;

— son coefficient de Poisson ν.

On peut ramener un ensemble de deux couches à une couche unique, en utilisant les formules suivantes :

$$h' = h_b + 0{,}9\, h_a \sqrt[3]{\frac{E_a}{E_b}} \text{ en adoptant } E_b \text{ comme module unique}$$

ou

$$h'' = h_a + 0{,}9\, h_b \sqrt[3]{\frac{E_b}{E_a}} \text{ en adoptant } E_a \text{ comme module unique}$$

On admet que le coefficient de Poisson $\nu = 0{,}5$.

$$\frac{h_a\,;\,E_a}{h_b\,;\,E_b} \equiv \frac{h'\,;\,E_b}{} \equiv \frac{h''\,;\,E_a}{}$$

CARACTÉRISTIQUES DES CHARGES AGISSANTES

Les *abaques « Alizé 3 » du LCPC* (1) basés sur la théorie de Burmister ont été calculés pour l'essieu à roues jumelées supportant 13 tonnes; la charge q s'exerce sur 2 cercles de rayon a distants de 1. On a pris :

$$q = 6{,}62 \text{ bars}$$
$$a = 12{,}5 \text{ cm}$$
$$l = 3a = 37{,}5 \text{ cm}$$

Le *programme « Milfeuil » du LBTP* s'appuie sur la méthode de Jones qui suppose le contact sans glissement de deux couches successives. Il considère la pression p exercée par la charge q d'une roue unique sur une aire de contact de rayon a ($p = 7$ bars; $q = 6{,}5$ tonnes; $a = 17{,}2$ cm).

En règle générale, les contraintes calculées par la méthode de Jones sous une roue unique sont surestimées de 30 à 50 % par rapport aux contraintes évaluées sous un jumelage supportant la même charge.

La vérification des contraintes pour les trafics habituels se réfèrera aux charges légales maximales admises dans le pays où la chaussée est dimensionnée. Selon les pays, il s'agira de l'essieu simple à roues jumelées de 8,2 tonnes, 10 tonnes ou 13 tonnes.

Les déflexions, les contraintes et les allongements variant dans le même sens que la pression de contact, il conviendra de procéder à une vérification des structures si des campagnes de pesage montrent un important pourcentage de surcharges.

(1) Les abaques des pages 111 à 114 ont été reproduits avec l'aimable autorisation du Directeur du LCPC.

CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX

Des essais *in situ* (mesure de vitesse de propagation des ondes — essais de plaque — mesures de déflexion) et des essais de laboratoire permettent de définir les valeurs des caractéristiques physiques des matériaux utilisés dans la chaussée.

On devra connaître les ordres de grandeur :

— du CBR;

— de la résistance à la compression Rc;

— de la résistance à la traction Rt (mesurée à l'essai brésilien ou à l'essai de traction directe);

— des modules élastiques dynamique et statique Ed et Es;

— du coefficient de Poisson ν;

— des températures auxquelles sont soumis les matériaux.

DÉTERMINATION DES CONTRAINTES ET DES DÉFORMATIONS

Les systèmes d'abaques et les programmes informatiques fournissent un certain nombre de valeurs en fonction des données d'entrée :

— épaisseur des couches;

— modules des couches;

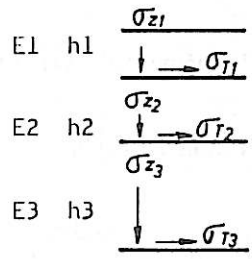
— valeur de la charge;

— rayon de la surface d'application de la charge.

Les éléments intervenant dans les vérifications des contraintes et déformations dans les cas les plus courants sont présentés ci-après.

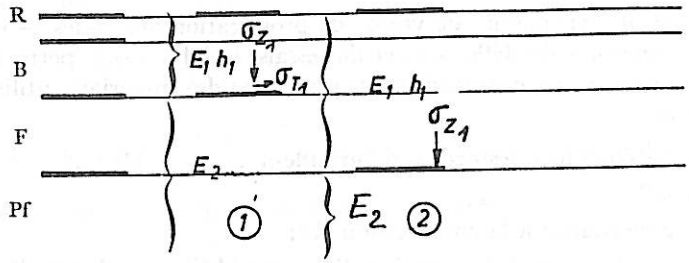
DÉSIGNATION DES ÉLÉMENTS
INTERVENANT DANS LES VÉRIFICATIONS DES CONTRAINTES

Coupe classique de chaussée (quadricouche).



E1	h1	Revêtement
E2	h2	Couche de base (traitée ou non)
E3	h3	Couche de fondation (parfois traitée)
E4		Plate-forme

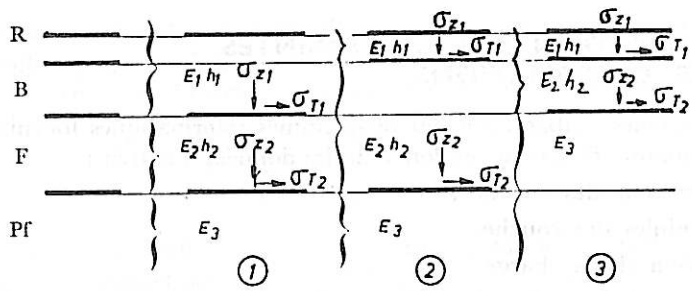
Schéma bicouche.



① Revêtement en BB et couche de base en GB;
Fondation non traitée.

② Enduit superficiel + (couche de base + couche de fondation non traitées);
Plate-forme.

Schéma tricouche.



① Revêtement BB et couche de base GB;
Couche de fondation traitée ou non;
Plate-forme.

② Revêtement en BB;
Couche de base et couche de fondation soit toutes les deux traitées, soit toutes les deux non traitées;
Plate-forme.

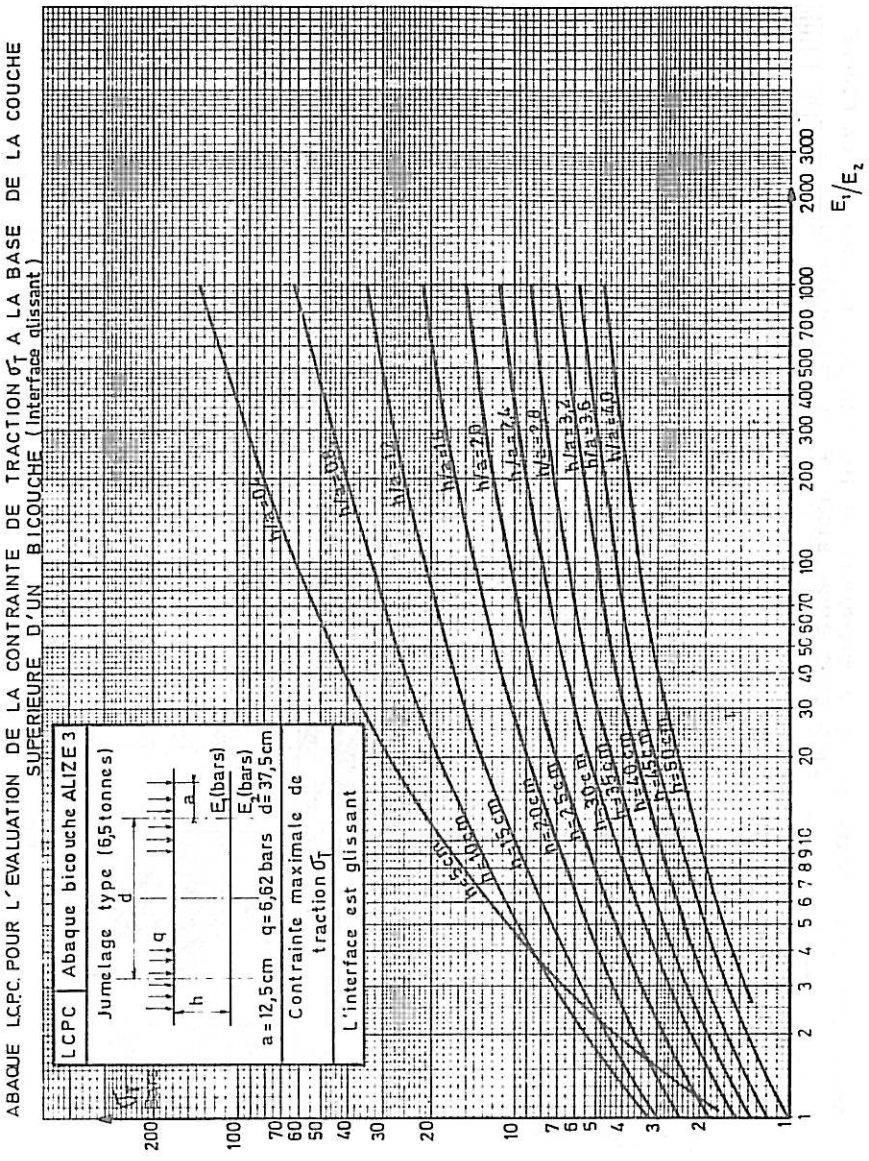
③ Revêtement en BB;
Couche de base traitée;
Couche de fondation non traitée et plate-forme.

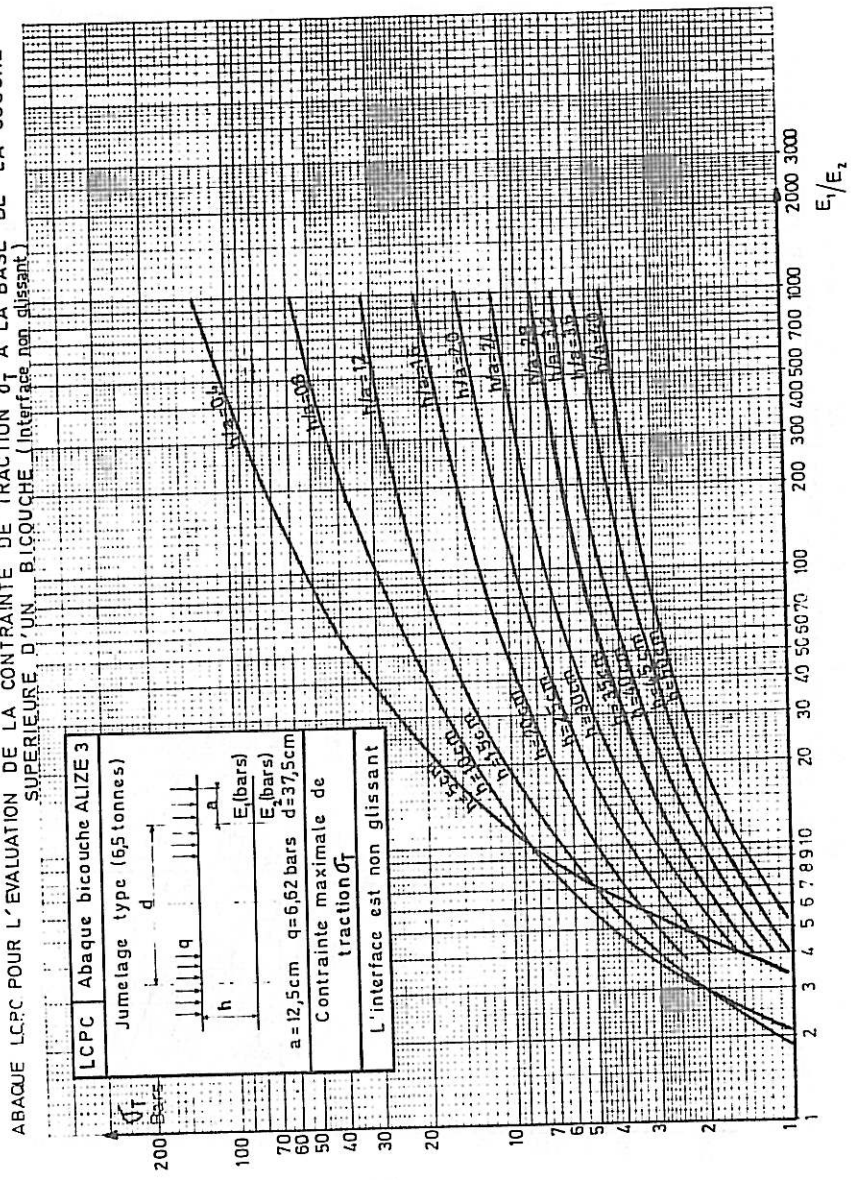
Les déformations seront désignées par ε selon le même code (ε_1, ε_2, ε_3) et la déflexion en surface par d.

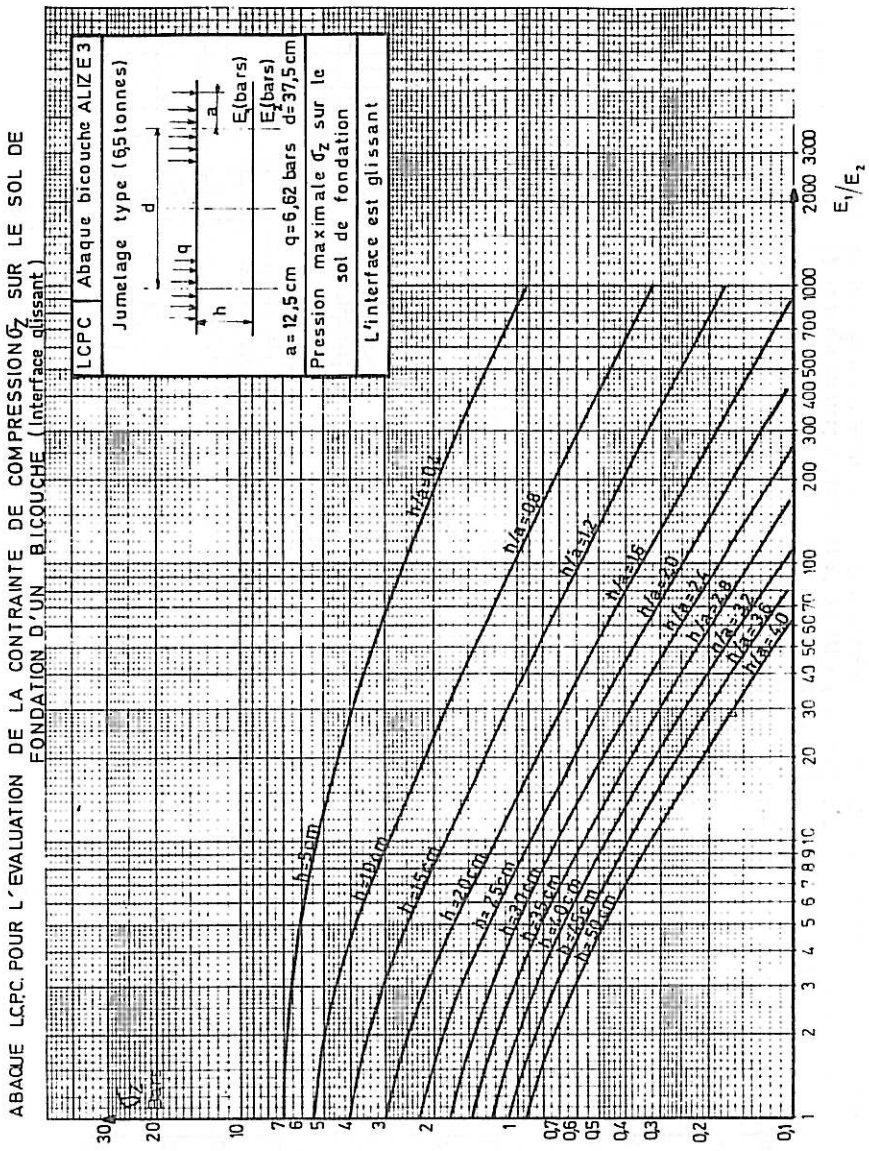
On a pris, dans tous les cas, le coefficient de Poisson $\nu = 0{,}5$.

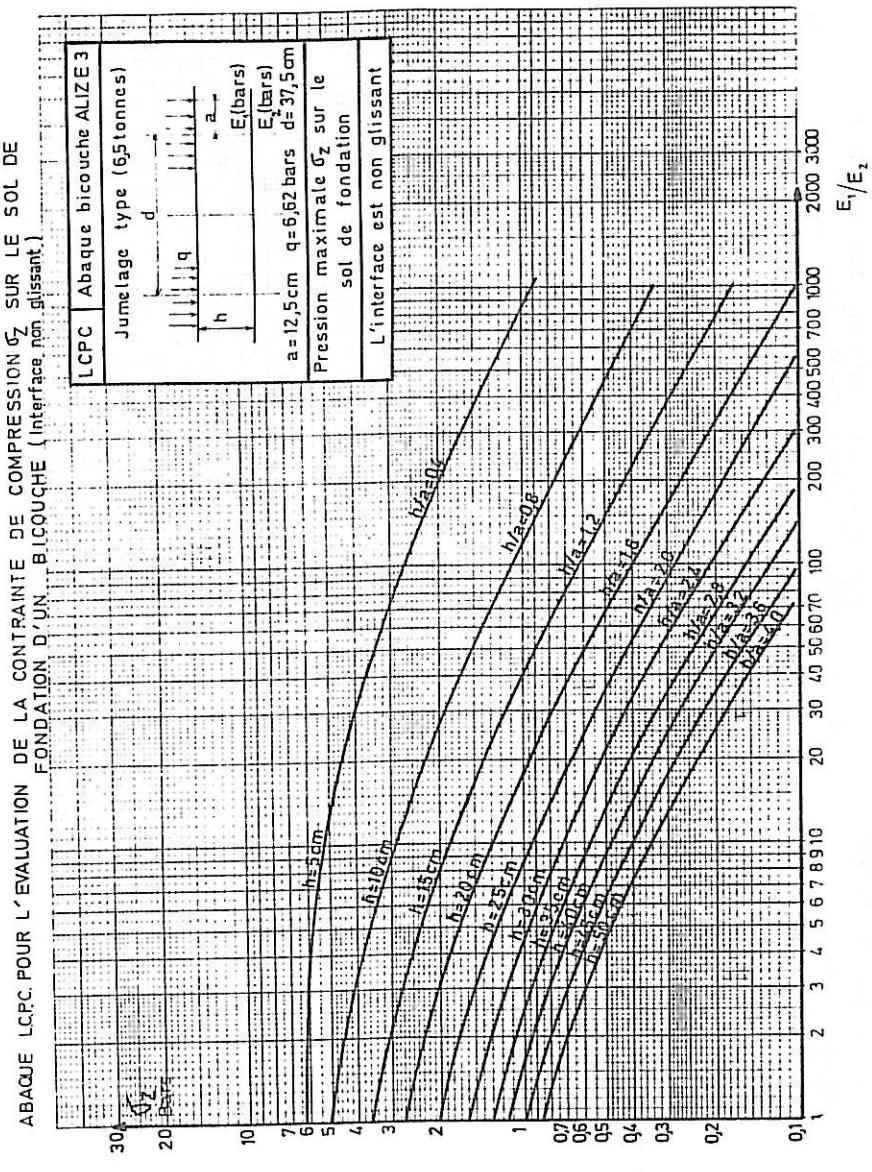
Lorsque $\nu = 0{,}35$ (couches liées) :

σz $\neq 1{,}1\ \sigma z$ σ_T $\neq 0{,}8\ \sigma_T$
($\nu = 0{,}35$) ($\nu = 0{,}5$) ($\nu = 0{,}35$) ($\nu = 0{,}5$)


ABAQUE LCPC POUR L'EVALUATION DE LA CONTRAINTE DE TRACTION σ_T A LA BASE DE LA COUCHE SUPERIEURE D'UN BICOUCHE (Interface glissant)
LCPC
Abaque bicouche ALIZE 3
Jumelage type (6,5 tonnes)
a = 12,5cm q = 6,62 bars
E1 (bars)
E2 (bars) d = 37,5cm
Contrainte maximale de traction σ_T
L'interface est glissant
σ_T bars
E_1/E_2
h/a=0,4
h/a=0,8
h/a=1,6
h/a=2,0
h/a=2,8
h/a=3,4
h/a=3,6
h/a=4,0
h=5cm
h=10cm
h=15cm
h=20cm
h=25cm
h=30cm
h=35cm
h=40cm
h=45cm
h=50cm


ABAQUE LCPC POUR L'EVALUATION DE LA CONTRAINTE DE TRACTION σT A LA BASE DE LA COUCHE SUPERIEURE D'UN BICOUCHE (Interface non glissant)
LCPC
Abaque bicouche ALIZE 3
Jumelage type (6,5 tonnes)
d
q
h
a
E1 (bars)
E2 (bars)
a = 12,5cm q = 6,62 bars d = 37,5cm
Contrainte maximale de traction σT
L'interface est non glissant
σT Bars
E1/E2
h/a = 0,4
h/a = 0,6
h/a = 1,2
h/a = 1,5
h/a = 2,0
h/a = 2,4
h/a = 2,8
h/a = 3,2
h/a = 3,6
h/a = 4,0
h = 12,5cm
h = 10cm
h = 7,5cm
h = 5cm
h = 3,5cm
h = 2,5cm
h = 1,5cm
h = 0,5cm


ABAQUE L.C.P.C. POUR L'EVALUATION DE LA CONTRAINTE DE COMPRESSION σz SUR LE SOL DE FONDATION D'UN BICOUCHE (Interface glissant)
LCPC
Abaque bicouche ALIZE 3
Jumelage type (6,5 tonnes)
a = 12,5 cm q = 6,62 bars
E1 (bars)
E2 (bars)
d = 37,5 cm
Pression maximale σz sur le sol de fondation
L'interface est glissant
σz
bars
E1/E2
h = 5 cm
h = 10 cm
h = 15 cm
h = 20 cm
h = 25 cm
h = 30 cm
h = 35 cm
h = 40 cm
h = 45 cm
h = 50 cm
h/a = 0,4
h/a = 0,8
h/a = 1,2
h/a = 1,6
h/a = 2,0
h/a = 2,4
h/a = 2,8
h/a = 3,2
h/a = 3,6
h/a = 4,0


ABAQUE L.C.P.C. POUR L'EVALUATION DE LA CONTRAINTE DE COMPRESSION σZ SUR LE SOL DE FONDATION D'UN BICOUCHE (Interface non glissant)
LCPC
Abaque bicouche ALIZE 3
Jumelage type (6,5 tonnes)
d
q
h
a
E1(bars)
E2(bars)
a=12,5cm q=6,62 bars d=37,5cm
Pression maximale σZ sur le sol de fondation
L'interface est non glissant
σZ
Bars
h=5cm
h=10cm
h=15cm
h=20cm
h=25cm
h=30cm
h=35cm
h=40cm
h=45cm
h=50cm
h/a=0,4
h/a=0,8
h/a=1,2
h/a=1,6
h/a=2,0
h/a=2,4
h/a=2,8
h/a=3,2
h/a=3,6
h/a=4,0
E1/E2

Le calcul des déformations relatives horizontales aux interfaces s'obtient par les formules :

$$\varepsilon_1 = \frac{p}{2E_1}(\sigma_{T_1} - \sigma_{Z_1})$$

en faisant $\nu = 0{,}5$ dans la formule :

$$\varepsilon_1 = \frac{p}{E_1}\left(\sigma_{T_1} - \nu(\sigma_{T_1} + \sigma_{Z_1})\right)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{p}{2E_2}(\sigma_{T_2} - \sigma_{Z_2})$$

$(\sigma_{T_1} - \sigma_{Z_1})$ et $(\sigma_{T_2} - \sigma_{Z_2})$ sont donnés par les tableaux de Jones et les abaques de Peattie (note technique CEBTP 10-1 ou « Principles of Pavement Design » de Yoder et Witczak) σ_{T_1} y est désigné par σ_{r_1} et σ_{T_2} par σ_{r_2}.

p = *pression de contact (hypothèse de Jones).*

E_1 et E_2 = *modules dynamiques dans le revêtement ou dans la couche de base.*

COMPARAISON DES CONTRAINTES EXERCÉES ET DES PERFORMANCES DES MATÉRIAUX

La vérification de la *résistance au poinçonnement de la plate-forme* sur laquelle s'exerce la contrainte σz se fait en comparant cette valeur obtenue par les abaques ou fournie par les programmes informatiques à la résistance au cisaillement admissible du sol.

La note technique CEBTP 10-3 propose de considérer *comme contrainte admissible de compression* (σz_{ad}) au niveau supérieur de la plate-forme celle donnée par la formule semi-empirique de Kerkhoven et Dormon [1] faisant intervenir l'effet de la répétition des charges (N) et le CBR, le CBR lui-même étant rattaché au module statique E par la relation E = 50 CBR :

$$\sigma_{Z,ad} = \frac{0{,}3\ \text{CBR}}{1 + 0{,}7\ \log \text{N}}\ \text{kg/cm}^2$$

N.B. — N est le nombre d'essieux de 13 tonnes.

Si on trouve $\sigma z > \sigma z_{ad}$, il faut augmenter l'épaisseur de la chaussée.

(1) Cette formule est très sécuritaire dans le cas de sols latéritiques.

La vérification de la rupture en traction à la base des couches rigidifiées s'effectue en s'assurant que les résistances de rupture à la traction (Rt) des éprouvettes des matériaux traités au laboratoire sont, moyennant la prise en compte d'un coefficient de sécurité, supérieures aux contraintes (σ_T) fournies par les abaques ou par l'ordinateur. On devra vérifier que :

$$\sigma_T \leqslant 0{,}7\,Rt \text{ ou } Rt \geqslant 1{,}4\,\sigma_T$$

L'influence de la fatigue des matériaux sous l'effet de la répétition des charges dues au trafic se traduit par les relations suivantes :

— matériaux traités aux liants hydrauliques :

$$\sigma = \sigma_o \left(1 - \frac{1}{\alpha} \log N\right) \qquad \alpha = 10 \text{ à } 12$$

— matériaux traités avec liants bitumineux :

$$\varepsilon_N = \varepsilon_o \left(\frac{N_o}{N}\right)^{\frac{1}{\beta}} \qquad \beta = 5 \text{ à } 5{,}25$$

σ = valeur de la contrainte admissible pour N cycles
σ_o = valeur de la contrainte de rupture au premier chargement
ε = valeur de la déformation relative admissible pour N cycles
ε_o = valeur de la déformation relative admissible pour N_o cycles

La déformation relative, pour un enrobé bitumineux soumis à environ 10^6 passages d'essieux équivalents de 13 tonnes, est considérée comme admissible si elle est de l'ordre de 120 à 150.10^{-6} (à 15 °C).

MODULES DES MATÉRIAUX

La valeur des modules élastiques à prendre en compte dans les vérifications des contraintes et déformations varie selon les auteurs. De nombreuses expérimentations ont conduit cependant à proposer des ordres de grandeur des modules dynamiques (ou statiques) pour les matériaux constituant les chaussées.

Les modules *dynamiques* mesurés *in situ* au vibreur ou au moyen de la propagation d'onde ou au laboratoire, sur des échantillons intacts, peuvent être estimés, en première approximation, à partir de la relation empirique suivante :

$$E_{dyn} = 100 \text{ CBR}$$

On les prend en compte dans le calcul des déformations.

Les modules *statiques* mesurés par essais de plaque *in situ* ou par essai d'écrasement au laboratoire [1] sont, eux aussi, en relation avec le CBR. On peut adopter l'équivalence suivante :

E_{stat} = 50 CBR pour les matériaux à gros éléments

E_{stat} = 30 CBR pour les matériaux à fraction fine importante.

Dans le cas de *matériaux traités au ciment,* la formule longtemps utilisée : $E_{stat} = 200\ R_{c7}$ avec R_{c7} = résistance à la compression simple à 7 jours doit être remplacée par celle-ci :

$$E_{stat} = 1\,000 \text{ à } 2\,000\ R_{c7}$$

1 000 correspondant aux matériaux les plus plastiques;

2 000 correspondant aux matériaux les plus crus.

Les *modules des matériaux bitumineux* sont très variables avec la température (module complexe). On devra procéder aux vérifications des contraintes et déformations pour les valeurs correspondant aux températures extrêmes les plus habituelles auxquelles sont portées les structures (par exemple 5 000 bars à 50 °C et 50 000 bars à 20 °C).

En tout état de cause, on consultera les Laboratoires nationaux du Bâtiment et des Travaux publics sur les valeurs à prendre réellement en compte dans ces vérifications.

On pourra se reporter au tableau des modules proposés pour ces vérifications (voir en annexe).

(1) Par exemple, en exploitant la courbe effort-déformation de l'essai CBR.

ANNEXES

I. LINÉAIRE GÉOTECHNIQUE SYNOPTIQUE

Le linéaire géotechnique synoptique est très apprécié; il permet d'appréhender d'un seul coup d'œil toutes les données relatives à une section du projet.

Le document le plus intéressant comporte :

— en haut, le plan du tracé et de ses abords sur une bande de quelques centaines de mètres. Il est à l'échelle du 1/5 000, du 1/2 000 ou du 1/1 000 selon la phase d'étude du projet;

— au-dessous, le profil en long correspondant (1/5 000-1/250) ou (1/2 000-1/200) ou (1/1 000-1/100) que l'on complète d'un habillage géotechnique. On y représente la coupe géologique et géotechnique interpolée entre les sondages qui y sont figurés.

Si l'on ne dispose pas du plan et du profil en long, on fera figurer dans la partie supérieure du tableau les données qui leur correspondent.

On donne, page suivante, un exemple de linéaire synoptique.

PLAN	
Profil en long avec habillage géologique et géotechnique et position des sondages	
Plate-forme : Couches meubles.....	Épaisseur; Nature; Teneurs en eau - Niveau hydrique; Classification géotechnique; CBR.
Substratum.....	Nature.
Géomorphologie.	
Géologie. - Pédologie.	
Hydrogéologie.	
Emprunt pour remblai et couche de forme.....	Nature Traitement Quantité Longueur couverte
Zonage pour le dimensionnement de la chaussée avec CBR choisi compte tenu de la constitution prévisible de la plate-forme.	
Chaussée :	Trafic :
Nature et épaisseur.....	Revêtement Couche de base Couche de fondation Couche de forme
Emprunt.....	Nature Couverture Quantité Utilisation
Carrière rocheuse.....	Nature pétrographique Quantité
Divers.....	Érosion Rippabilité des déblais Instabilité des pentes Pentes des talus Zones compressibles

II. DIMENSIONNEMENT ET RECHARGEMENT DES CHAUSSÉES EN TERRE

Il est d'usage, en pays francophones, d'appeler « routes en terre », par opposition aux routes revêtues et aux pistes, celles sur lesquelles on met en œuvre, sur une certaine épaisseur, une couche de matériaux sélectionnés.

L'usure des matériaux sous le trafic nécessite le rechargement périodique de la chaussée.

Un certain nombre d'exigences doivent être satisfaites pour qu'une chaussée en terre remplisse son rôle de façon satisfaisante :

— son épaisseur doit rester suffisante pour éviter le poinçonnement de la plate-forme;

— les matériaux qui la constituent doivent posséder des qualités contradictoires : avoir suffisamment de cohésion pour assurer la liaison des grains en saison sèche afin de diminuer la formation de la tôle ondulée et maintenir la portance de la couche; ne pas contenir trop de fines, ni être trop plastiques pour que la glissance ne soit pas trop élevée en saison pluvieuse.

Les caractéristiques géométriques et géotechniques à donner à des routes en terre neuves dépendent de l'aménagement prévu à moyen terme.

S'il est envisagé de les revêtir dans des délais relativement courts, il faudra leur donner des caractéristiques géométriques de routes revêtues et construire une chaussée qui servira ultérieurement de couche de fondation.

Dimensionnement.

On doit calculer, d'une part, l'épaisseur minimale de matériau nécessaire pour éviter le poinçonnement du sol de plate-forme et d'autre part, compte tenu de la fréquence prévue des rechargements, déterminer la surépaisseur utile pour pallier l'usure des matériaux sous le trafic.

Calcul de l'épaisseur minimale.

L'épaisseur dépend du CBR du sol de plate-forme et du trafic prévu. Étant donné qu'une certaine plastification du sol est admise, on prend en compte, pour ce dimensionnement, un CBR supérieur à celui habituellement retenu.

Pour ce faire, on exploite le diagramme de l'essai CBR conformément à l'exemple traité page suivante. On trace l'asymptote à la courbe effort-déformation qui fournit la charge de rupture; le CBR est calculé, pour un enfoncement de 2,5 mm, à partir de la pression égale à la moitié de la contrainte de rupture; on obtient ainsi le CBR corrigé utilisé pour la détermination de l'épaisseur de la chaussée par la formule de Peltier :

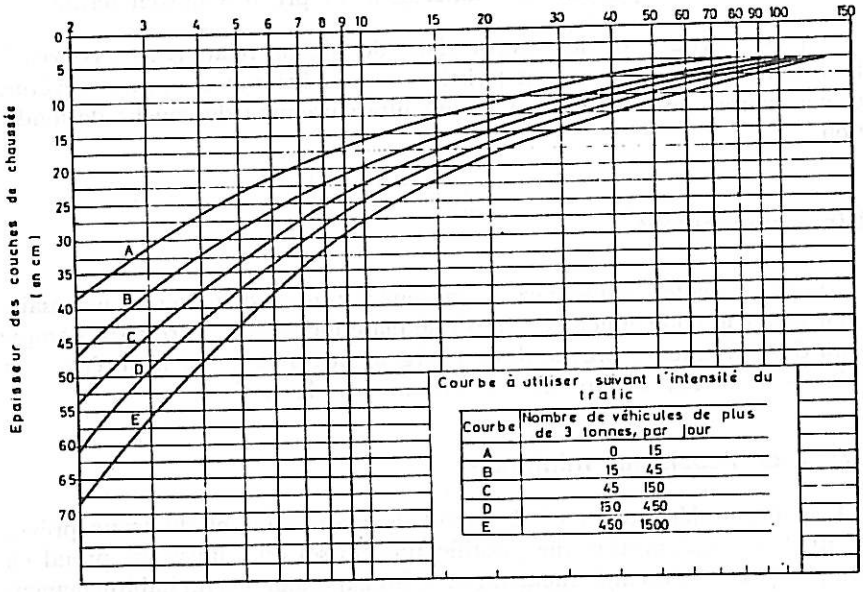
$$e = \frac{100 + \left(75 + 50 \log. \frac{N}{10}\right)\sqrt{P}}{CBR + 5}$$

e = épaisseur en cm;
N = nombre de poids lourds de plus de 3 tonnes par jour;
P = poids de la roue maximale en tonnes (ou de 2 roues jumelées).

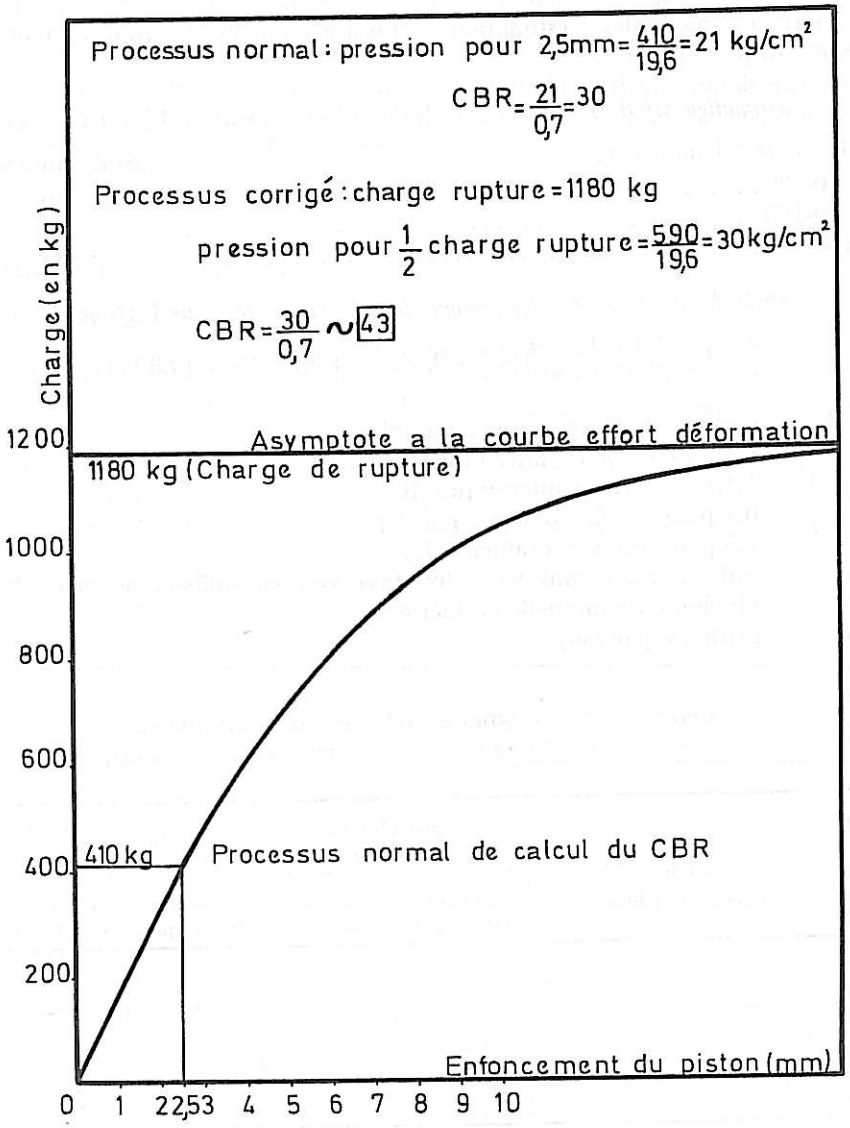
ou au moyen des abaques du TRRL donnés ci-dessous.

ABAQUES DU ROAD RESEARCH LABORATORY
UTILISÉS POUR LES ROUTES EN TERRE

CBR en % (coefficient 2 par rapport à la rupture)



Dimensionnement des chaussées en terre



Exemple de calcul de CBR pour une route en terre

Calcul de l'usure sous le trafic.

Plusieurs méthodes d'estimation de l'usure annuelle des routes en terre sont disponibles :

— *estimation CEBTP portant sur l'observation de routes d'Afrique tropicale :*

Trafic (véhicules/jour)	Usure annuelle
10- 30	1 cm
30-100	2 cm
100-300	3 cm

— *étude de la commission économique des Nations-Unies pour l'Afrique* (1) :

$$GL_A = f\left(\frac{T_A^2}{T_A^2+50}\right)(4{,}2 + 0{,}092\,T_A + 3{,}50\,R^2_L + 1{,}88\,V_c)$$

GL_A = perte annuelle moyenne de graviers en mm;

f = 0,94 pour gravier latéritique (A);
= 1,1 pour gravier quartzique (B);
= 0,7 pour gravier volcanique (C);
= 1,5 pour gravier corallien (D);

T_A = trafic annuel dans les deux directions en milliers de véhicules;

R_E = pluviométrie annuelle en mètres;

V_c = pente (*m* par km).

ORDRE DE GRANDEUR DES PERTES ANNUELLES DE MATÉRIAUX CALCULÉES PAR CETTE FORMULE (mm)

Trafic journalier (Véhicules/jour)	Climat pluvieux zone montagneuse		Climat sec	
	Gravier latéritique	Gravier quartzeux	Gravier latéritique	Gravier quartzeux
25	16	18	4,5	7
150	28	33		
400	37	42	19	30

(1) Évaluation de la priorité économique de l'entretien des routes (C.G. HARRAL, P.E. FOSSBERG), Conférence Ghana, novembre 1977.

Le dimensionnement initial et la planification des rechargements périodiques permettent d'établir le bilan des matériaux nécessaires dont on devra disposer le long de l'itinéraire; les réserves en matériaux devront donc être connues.

En tout état de cause, l'épaisseur de la chaussée ne devra jamais devenir inférieure à l'épaisseur minimale calculée; le programme des rechargements sera conçu en fonction de cet impératif.

Qualité des matériaux.

Si le trafic est supérieur à 30 véhicules par jour, un CBR de 30 (défini ainsi qu'il a été précisé) sera pris en compte; un CBR de 20 sera considéré comme suffisant si le trafic est inférieur à 30 véhicules par jour.

Si la route doit être ultérieurement revêtue, le matériau de la chaussée en terre servira, plus tard, de matériau de couche de fondation; il faudra alors qu'il ait conservé un CBR (classique) au moins égal à 30.

Les fuseaux granulométriques du matériau de route en terre pourront être les suivants :

Diamètre	% passant		
	1	2	3
40 mm			100
20 mm	100	100	85-100
10 mm	70-100	65-100	35-100
5 mm	50- 90	45- 85	40- 95
2 mm	30- 60	30- 68	23- 77
1 mm	25- 50	25- 55	18- 62
0,5 mm	20- 40	20- 48	15- 54
0,2 mm	15- 35	15- 37	12- 43
80μ	10- 30	12- 32	10- 38

Le fuseau 2 est recommandé.

Les caractéristiques de plasticité dépendent des conditions climatiques :

Climat	LL max.	IP
Chaud et humide.....	35	10-15
Tropical à saison sèche.	40	15-25
Aride.....	55	10-30

Module de plasticité :

Minimum..... 200
Maximum..... 1 200

Une plasticité minimale sera d'autant plus nécessaire à obtenir que le matériau sera mis en œuvre en zone plus sèche. On pourra même envisager d'améliorer la rétention d'eau sous les climats arides en ajoutant au matériau du chlorure de calcium ou du chlorure de sodium.

Dans les pays pétroliers, le répandage de sous-produits huileux apportera la cohésion à des matériaux trop granuleux ou permettra de lutter contre la poussière.

Dans certains pays de savane dépourvus de matériaux, la collecte des termitières-champignons fournit un matériau de fortune qui, après avoir été fragmenté, donne une bonne chaussée en terre.

Le principal inconvénient des chaussées en terre, après la poussière pendant la saison sèche, reste la tôle ondulée contre laquelle il est difficile de lutter. Il semble que, toutes choses égales par ailleurs et notamment à trafic constant, elle se forme d'autant plus facilement que le climat est sec et le matériau peu cohérent; il faut donc chercher à utiliser des matériaux cohésifs. Il n'en demeure pas moins que ce phénomène n'est que retardé et que les moyens mécaniques restent à prévoir pour écrêter périodiquement les ondulations.

L'expérience semble montrer que les meilleurs matériaux utilisables pour les routes en terre possèdent l'un des couples de valeurs (C_{uu}-φ_{uu}) suivants :

C_{uu} *bar*	$\varphi_{uu}{}^{o}$
2,5	0
1,2	10
1	20
0,9	30
0,8	40

III. RECOMMANDATIONS POUR LA RÉALISATION DES CHAUSSÉES SUR ARGILES GONFLANTES

La réalisation des chaussées sur des sols expansifs présente des difficultés particulières nécessitant des dispositions de construction spéciales.

Les phénomènes alternatifs de retrait et de gonflement de certains sols tiennent à la nature minéralogique des argiles dont ils sont constitués. Ces matériaux, appartenant généralement au groupe de la montmorillonite, ont une structure en feuillets qui peuvent réversiblement absorber et rejeter de l'eau selon les conditions hydriques du milieu. Les variations de volume et de pression qui en résultent peuvent être énormes.

En saison sèche, une importante déshydratation se produit conduisant à l'ouverture de fissures de retrait qui peuvent atteindre 10 cm de large et 3 à 4 m de profondeur. En saison humide, l'eau pénètre par les fissures et imbibe le terrain qui subit un gonflement mettant les ouvrages qu'il supporte en péril.

Les sols en question sont les tirs d'Afrique du Nord, les « black-cotton soils » d'Afrique et d'Asie, les karals d'Afrique centrale. Leurs caractéristiques géotechniques sont les suivantes :

CBR : < 2
Gonflement dans le moule CBR : > 3 %

Gonflement libre	Limite de retrait	Indice de plasticité	Passant à 2 μm	Degré de gonflement
%				
> 100	< 10	> 32	> 30	Très élevé.
100	6-12	23-45	20-40	Élevé.
50-100	8-12	12-34	15-30	Moyen.
< 50	> 13	< 20	< 20	Faible.

Les chaussées construites sur ce genre de terrain doivent être souples et leur environnement doit être conçu de telle sorte que les variations de teneur en eau du sol soient réduites au minimum.

La plate-forme doit être terrassée avec une pente transversale d'au moins 5 % et si possible traitée à la chaux avant compactage; le compactage doit rester modéré et réalisé à une teneur en eau supérieure à l'OPM. Une imprégnation et un sablage protègent la plate-forme de la dessiccation; les membranes imperméables sont mises en place, dans certains cas, dans le même but.

Les remblais doivent être évités; la dessication du sol sous la chaussée progresse plus difficilement si la route est en déblai. Une meilleure butée reste ainsi disponible pour la chaussée.

C'est généralement par les accotements que débute la dégradation d'une route sur sols gonflants, aussi leur exécution sera-t-elle l'objet de précautions spéciales. Ils seront constitués du même matériau que le corps de chaussée. Ils auront une pente transversale d'au moins 6 % et seront imprégnés sur toute leur largeur ou de préférence revêtus d'un bicouche. La largeur de l'accotement sera d'au moins 2,5 m.

Les fossés seront imperméabilisés et surdimensionnés; leur fil d'eau sera à 20 ou 30 cm sous le niveau de la plate-forme.

La présence des arbres est très néfaste. Par leurs racines, ils contribuent à la dessication du sol en période sèche. Ils devront être déracinés jusqu'à au moins 5 m du fossé.

Le corps de chaussée aura une épaisseur d'au moins 60 cm; la surcharge qu'il représente s'oppose au gonflement du sol.

On doit éviter les assises traitées et utiliser des concassés en couche de base et des graves naturelles ou concassées en couche de fondation. Ces matériaux ont malheureusement une perméabilité souvent assez élevée qui est néfaste. Ils devront être protégés des infiltrations par des revêtements très étanches mais restant souples.

Les revêtements les mieux adaptés sont les enduits superficiels que l'on peut refaire périodiquement en même temps que l'on recharge, si besoin est, la couche de base.

Un tapis d'enrobés ne sera mis en place que si le trafic l'exige et après stabilisation du gonflement.

Il est souvent recommandé de parfaire l'imperméabilisation du revêtement par un coulis bitumineux éventuellement clouté pour améliorer la glissance.

IV. NOTES SUR QUELQUES ESSAIS GÉOTECHNIQUES

Essai de compactage Proctor.

On n'entrera pas dans le détail de la réalisation de cet essai. On se reportera au mode opératoire du LCPC du 29 juillet 1970 (édition Dunod) et à celui proposé par le CEBTP (RC-01, septembre 1977).

On se limitera ici à rappeler les formules de correction à appliquer dans le cas de matériaux comportant une fraction notable d'éléments dont la taille est supérieure à la maille carrée de 20 mm. La correction n'est valable que si cette fraction reste inférieure à 25 % du poids total.

Teneur en eau corrigée : $W' = W\left(1 - \frac{m}{100}\right)$.

Densité sèche corrigée :

$$\frac{\gamma'd}{\gamma d} = \frac{1}{1 + \left[\frac{m}{100}\left(\frac{\gamma d}{\gamma s} - 1\right)\right]}$$

W = teneur en eau optimale de l'essai Proctor
γd = densité sèche maximale de l'essai Proctor
γs = poids spécifique absolu des éléments > 20 mm
W' = teneur en eau optimale corrigée
$\gamma' d$ = densité sèche maximale corrigée
m = pourcentage du refus à 20 mm (%)

Essai à la plaque.

(Mode opératoire LCPC [20 décembre 1972] Édition Dunod)

L'essai consiste à mesurer le déplacement vertical appelé déflexion (W) d'un point de la surface du sol sous le centre de gravité d'une plaque rigide chargée. Les plus gros éléments des matériaux dont on mesure la déformabilité ne doivent pas dépasser 200 mm.

La charge sur la plaque est transmise par un vérin dont le massif de réaction est assuré par un camion lesté à 7 000 DaN (≃ 7 tonnes).

La plaque a un diamètre de 600 mm; une liaison à rotule est prévue entre la plaque et la tige de commande du vérin.

La mesure des déflexions est faite au moyen d'une poutre Benkelman dont l'extrémité du fléau prend appui sur une tige coulissant à l'intérieur de la plaque.

La mesure de la charge comporte un peson à jauges de 0-1 000 DaN et un manomètre ou un anneau dynamométrique permettant le contrôle visuel de la charge appliquée sur la plaque.

La plaque est placée sur la couche à tester par l'intermédiaire d'un mince lit sableux (0/1 mm) légèrement humide ou sur une mince couche de plâtre.

On procède alors à un premier chargement à la vitesse de 80 DaN/s jusqu'à obtenir 2,5 bars sous la plaque (charge totale 7 065 DaN); la stabilisation est atteinte lorsque la déflexion varie de moins de 0,02 mm/mn. On supprime la charge en 2 ou 3 secondes.

On réalise alors le second chargement à la même vitesse et de façon à obtenir 2 bars sous la plaque (charge totale 5 650 DaN). L'essai est terminé quand la stabilisation est atteinte.

On a mesuré : W_1 mm = déflexion du premier chargement;
W_2 mm = déflexion du second chargement.

On aura noté les conditions de réalisation de l'essai (météo, pluie...) et tous les incidents qui auraient pu se produire.

RÉSULTATS.

Formule de Boussinesq donnant la déflexion :

$$W = \frac{1{,}5\,\sigma \cdot a}{E_v}(1 - \nu^2)$$

W = Déflexion en millimètres au centre de la plaque;
E_v = Module de déformation à la plaque en bars;
σ = Pression moyenne sous la plaque en bars;
a = Rayon de la plaque en millimètres;
ν = Coefficient de Poisson pris égal à 0,25.

Formules donnant les modules

— au premier chargement : $E_{v1} = \frac{1125}{W_1}$

— au second chargement : $E_{v2} = \frac{900}{W_2}$

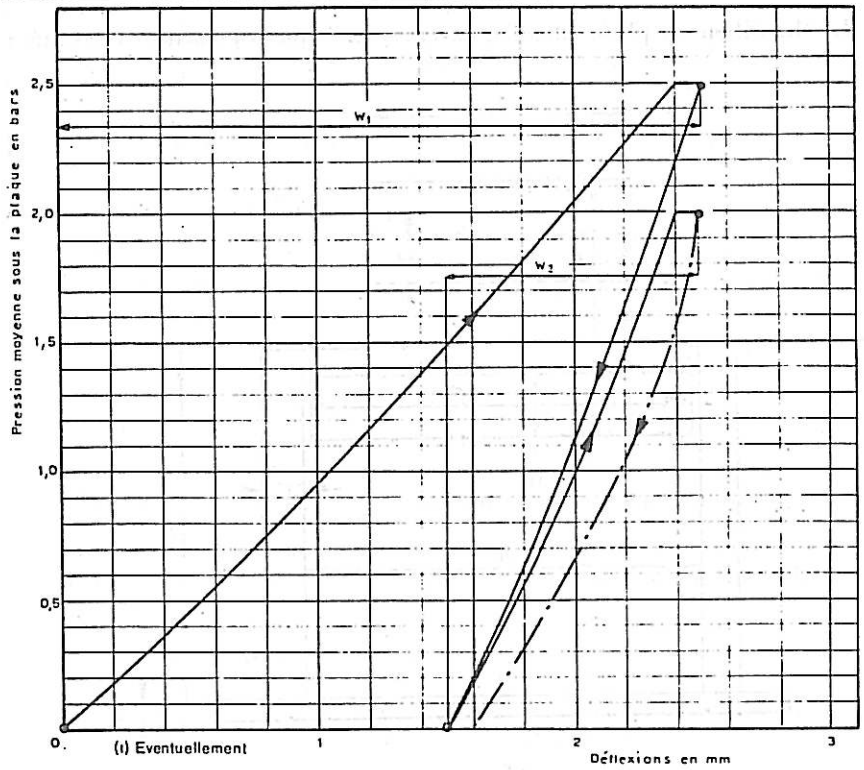
— $K = \frac{E_{v2}}{E_{v1}}$

MESURE DE LA DÉFORMABILITÉ D'UNE PLATE-FORME PAR ESSAI A LA PLAQUE (1)

Laboratoire de : Essai n° :

Dossier : Chantier : Date : Opérateurs :	Nature du matériau : GL Teneur en eau sous la plaque (1) : 10 % Teneur en eau O.P.N.(1) : Limites d'Atterberg (1) : W_L = Ip = Valeurs recommandées : $Ev_1 \geqslant$; $Ev_2 \geqslant$; $K \leqslant$	P.k. n° 7 Profil n° 112 Essai réalisé à : 10 m en aval du Profil 112 4 m

$W_1 = 2,5$	$Ev_1 = \frac{1125}{W_1} = 450$ bars	$K = \frac{Ev_2}{Ev_1} = 2$	Conclusions :
$W_2 = 1,0$	$Ev_2 = \frac{900}{W_2} = 900$ bars		



(1) Eventuellement

Exemple de feuille d'essai

(1) Document reproduit avec l'aimable autorisation du Directeur du LCPC.

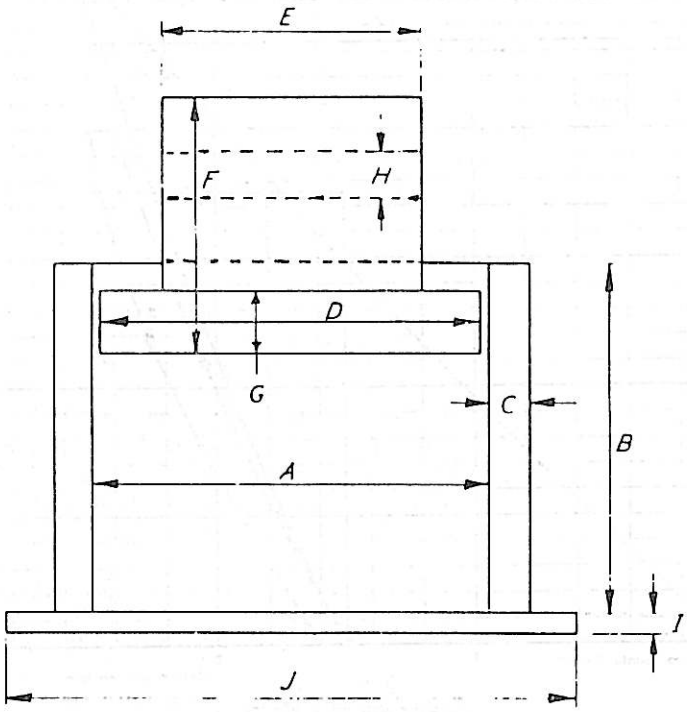
Essai ACV.

(Mode opératoire de l' « Aggregate Crushing Value »
BS 812 : Part 3, 1975/7)

Cet essai donne une mesure relative de la résistance à l'écrasement d'un granulat sous une charge de compression appliquée progressivement. Il reste significatif tant que la valeur obtenue reste inférieure à 30.

Il est réalisé sur des gravillons passant au tamis de 14 mm et retenus sur le tamis de 10 mm (gravillons 10/14).

L'échantillon est placé dans l'appareil cylindrique représenté ci-dessous :



		Cylindre de diamètre nominal de 150 mm	Cylindre de diamètre nominal de 75 mm
		mm	mm
	Cylindre		
A	Diamètre intérieur	154 ± 0,5	78 ± 0,5
B	Profondeur intérieure	125 à 140	70 à 85
C	Épaisseur des parois	< 16	< 8
	Piston		
D	Diamètre du piston	152 ± 0,5	76 ± 0,5
E	Diamètre de la tige	95 à 155	45 à 80
F	Longueur totale de la tige et du piston	100 à 115	60 à 80
G	Épaisseur du piston	< 25	< 19
H	Diamètre nominal du trou	20	10
	Embase		
I	Épaisseur nominale	6	6
J	Côté du carré	200 à 230	110 à 115

On doit disposer :

— d'une règle métallique à section circulaire de 16 mm de diamètre et d'une longueur de 450 à 600 mm dont une extrémité est arrondie;

— d'une presse d'une puissance de 400 KN pouvant donner un taux uniforme de chargement permettant d'obtenir la force de 400 KN en 10 minutes;

— d'une balance de 3 kg à ± 1 g près;

— d'une éprouvette métallique cylindrique pour mesurer l'échantillon; diamètre intérieur 115 mm, profondeur intérieure 180 mm.

Le granulat doit être testé sec et à la température ambiante. Il ne devra pas avoir séjourné plus de 4 heures à l'étuve dont la température devra rester inférieure à 110 °C.

La quantité de matériau doit être telle que la profondeur dans le cylindre après tassement soit de 100 mm. On remplit le cylindre en trois couches, chacune d'elles étant tassée au moyen d'un compactage de 25 coups avec la règle métallique tombant de 50 mm par son extrémité arrondie sur la surface des granulats. Le poids du matériau est appelé « A ».

On met en place le piston qui repose sur la surface de l'échantillon. On dispose l'appareil avec son piston en position sous le plateau de la presse; on procède au chargement régulièrement de façon à atteindre 400 KN en 10 minutes.

On tamise l'échantillon testé sur un tamis de 2,36 mm; le poids du passant est appelé « B ».

Le pourcentage de fines produit définit l'ACV :

$$ACV = \frac{B}{A} \times 100$$

Remarque. — On peut tester des gravillons de taille supérieure à 10/14 (jusqu'à 28 mm) ou inférieure (jusqu'à 2,36 mm). Dans le cas de granulats plus petits que 10/14, on utilise un appareil d'un diamètre nominal de 75 mm et on applique une force de 100 KN. La profondeur de l'échantillon après tassement est de 50 mm.

V. C B R — MODULES ET CONTRAINTES

Ordre de grandeur des CBR et des modules statiques de quelques sols et matériaux.

	CBR	E stat.
– Sols mous à très mous	< 2 –	< 100
– Argiles	2 – 10	200 à 600 bars
– Limons et argiles raides	8 – 40	400 à 2 000 bars
– Sables	8 – 30	400 à 1 500 bars
– Graves	15 – 80	1 000 à 4 000 bars
– Concassé	80 – 100	4 000 à 5 000 bars
– Sols ciment (Rc_7 de 5 à 50 bars)		2 000 à 50 000 bars
– Grave-ciment (Rc_7 de 10 à 200 bars)		40 000 à 200 000 bars
– Enrobés bitumineux (selon la température de 30 °C à 10 °C)		5 000 à 50 000 bars
– Béton de ciment		150 000 à 225 000 bars

Valeurs prises en compte par le programme « Milfeuil ».

MODULES ADOPTÉS POUR LES VÉRIFICATIONS DE CONTRAINTES.

Plate-forme.

S_1	250 bars
S_2	500 bars
S_3	750 bars
S_4	1 500 bars
S_5	3 000 bars

Matériaux de couche de fondation.

Graves non traitées	3 000 bars
Sable argileux	3 000 bars
Sols-ciment	4 500 bars
Sols-bitume	3 500 bars
Sols-chaux	3 500 bars

Matériaux de couche de base.

Concassé	5 000 bars
Graves	3 000 bars
Sols-ciment	15 000 bars
Grave-ciment	80 000 bars
Grave-bitume	40 000 bars

CONTRAINTES DE TRACTION ADMISSIBLES ADOPTÉES.

Enrobés bitumineux en couche de roulement	10 à 15 bars selon trafic
Graveleux ciment en couche de base	2 à 3 bars selon trafic
Sols-ciment en couche de base	2,5 à 3,5 bars selon trafic
Grave-ciment en couche de base	5 à 7,5 bars selon trafic
Grave-bitume en couche de base	7 à 10 bars selon trafic
Sols-bitume en couche de base	2,5 à 3,5 bars selon trafic

VI. EXEMPLE DE FICHE D'UN CATALOGUE DE STRUCTURES — TYPES DE CHAUSSÉES

DOCUMENT REPRODUIT AVEC L'AIMABLE AUTORISATION DU LABORATOIRE DU BÂTIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS DE CÔTE-D'IVOIRE

FICHE N° 2

CHAUSSÉE NEUVE

Base : graveleux-ciment gC.
Fondation : graveleux naturels gn.

	T1	T2	T3	T4 *	T5
S1	3cm (r) 15cm gC 40cm g	4 cm(r) 15cm gC 45cm gn	5cm(r) 20cm gC 45cm gn	7 cm(r) 20 cm gC 50 cm gn	Voir fiches N° 4_5
S2	3cm (r) 15cm gC 20cm gn	4cm(r) 15 cm gC 25cm gn	5cm(r) 20cm gC 25cm gn	7cm(r) 20cm gC 30cm gn	
S3	3cm (r) 15cm gC 15cm gn	4 cm (r) 15 cm gC 20cm gn	5cm(r) 20 cm gC 20cm gn	7 cm(r) 20 cm gC 25 cm gn	
S4	3cm (r) 15 cm gC 10cm gn	4cm(r) 15cm gC 15cm gn	5cm(r) 20cm gC 15cm gn	7cm(r) 20cm gC 20 cm gn	
S5	3 cm(r) 15 cm gC	4cm(r) 15cm gC	5 cm(r) 20cm gC	7cm(r) 20cm gC	

Nota. — * Structure dont la justification technique mérite des études et observations particulières sur tronçons expérimentaux.

1. Domaines d'emploi du type de chaussée.

L'utilisation en couche de base de graveleux traités au ciment s'impose dès que les matériaux à l'état naturel ne présentent pas un indice portant CBR supérieur à 60 ou 80.

Cette technique de chaussée convient pratiquement à toutes les régions de la Côte-d'Ivoire à l'exclusion de la région R1 où les ressources en graves naturelles sont peu ou point disponibles.

Il est néanmoins conseillé d'en limiter l'emploi aux classes de trafic T_1, T_2 et T_3; l'utilisation de cette technique pour la classe T_4 reste sujette à des études particulières et à un contrôle rigoureux.

Dans tous les cas, une attention particulière doit être accordée lors du choix des emprunts et de la mise en œuvre aux problèmes de teneur en eau, de malaxage et de compactage.

Bien que s'apparentant plutôt au type souple qu'au type rigide de chaussée, cette structure peut présenter des fissures, notamment de retrait, dues à la plasticité des fines et aux surdosages éventuels en ciment.

2. Types de revêtements envisageables.

Classe de trafic	Formule d'aménagement	
	Aménagement progressif en 2 phases	Aménagement définitif en 1 phase
T_1	ES bicouche puis 8-10 ans après ES monocouche d'entretien.	Tricouche ou 3 cm de ED, SA ou BB.
T_2	ES bicouche puis 7-8 ans après 3 cm de ED, SA ou BB.	4 cm de ED, SA ou BB.
T_3	ES bicouche puis 3-5 ans après 4 cm de BB.	5 cm de BB.
T_4	4 cm de BB puis 6-7 ans après 4 cm de BB.	7 cm de BB.

BB : Béton bitumeux;
ES : Enduit superficiel;
ED : Enrobés denses;
SA : Sand-Asphalt:

3. Nature des accotements et profils en travers.

Classe de trafic	Aménagement des accotements			
	Matériaux constitutifs	Traitement de surface	Pente transversale	Largeur minimale
T_1	Partie supérieure : Fondation ou base. Partie inférieure : Fondation.	Imprégnation (fond) sur 0,50 m minimum ou cure (base) sur toute largeur.	4 - 5 %	1,50 m
T_2	Partie supérieure : Fondation ou base. Partie inférieure : Fondation.	Imprégnation (fond) ou cure (base) sur toute largeur.	4 - 5 %	2,00 m
T_3	Partie supérieure : Base. Partie inférieure : Fondation.	Cure et sablage sur toute largeur.	4 - 5 %	2,00 m
T_4	Partie supérieure : Base. Partie inférieure : Fondation.	Cure et ES monocouche sur toute largeur.	4 - 5 %	2,50 m

4. Recommandations pour la mise en œuvre.

4.1. COUCHE DE FONDATION.

Graveleux naturels

Constituant :

Type de graveleux..... G2 ou G1 (selon classification LBTP)
Indice CBR minimum..... 25 pour T_1; 30 pour T_2, T_3, T_4
Gonflement maximum..... 3 %

Mise en œuvre .

Répandage	Au bull ou à la niveleuse
Teneur en eau de compactage.	WOPM ± 2 points
Taux de compacité minimal	95 % OPM
Engin de compactage	Rouleau à pneus avec charge par roue supérieure à 2 tonnes
Nombre de passes	A fixer sur planche d'essai
Épaisseurs de mise en œuvre	Minimum 10 cm; maximum 25 cm (couche élémentaire)

4.2. COUCHE DE BASE.

GRAVELEUX-CIMENT

Graveleux :

Type de graveleux	G_2 ou G_1 (selon classification LBTP)
Diamètre maximum des grains	40 mm
Indice de plasticité maximum.	20 pour T_1, T_2; 15 pour T_3, T_4
Tamisat à 0,08 mm	20 pour T_1, T_2; 15 pour T_3, T_4
Teneur en matières organiques.	0,5 % maximum

Ciment :

Nature	CPA 325
Dosage	Minimum 3 %; maximum, compatible avec l'obtention des performances suivantes

Mélange :

Indice CBR à 95 % OPM et à 7 jours (3 jours air + 4 jours eau)	160 minimum
Rc à 95 % OPM et 7 jours air	25 à 30 bars maximum
R'c à 95 % OPM et à 7 jours (3 jours air + 4 jours eau)	5 bars minimum

Mise en œuvre :

Fabrication.....	*In situ* ou en centrale T_1, T_2; centrale pour T_3, T_4
Tolérance sur dosage en ciment	± 0,5 %
Répandage.....	Au bull ou niveleuse T_1, T_2; finisseur pour T_3, T_4
Teneur en eau de compactage	Entre WOPM et WOPM - 2 points
Délai de compactage.....	3 heures maximum après malaxage
Compacité minimum.....	95 % OPM
Engin de compactage.....	Combinaison vibrant M/L > 20 kg/cm) pneu (R > 2T, P > 5 bars
Nombre de passes.....	A fixer sur planche d'essai
Délai d'ouverture au trafic...	48 heures minimum (de préférence 7 jours)
Épaisseur de mise en œuvre...	Minimum 15 cm; maximum 25 cm

4.3. REVÊTEMENT.

SAND-ASPHALT

Sable.

Granularité :

Tamis	passant
6,3 mm.....	100 %
2 mm.....	75-100 %
1 mm.....	50- 96 %
0,5 mm.....	25- 88 %
0,2 mm.....	10- 53 %
0,08 mm.....	4- 16 %

Équivalent de sable : 40 minimum.

Liant : Bitume 80/100 ou 60/70.

Mélange :

Hubbard Field imbibé à 60 °C : 500 kg minimum

Mise en œuvre :

Fabrication.....	En centrale
Répandage.....	Au finisseur
Compactage.....	Rouleau à pneu R > 2 tonnes

Enduit superficiel

Granulats (G).

Granularité d/D. 4/6 6/10 10/14 mm
Los Angeles.... 35 maximum

Liant (L) :

Bitume fluidifié 400/600
ou
Émulsion cationique PH > 4 avec 60-70 % de bitume résiduel

Mise en œuvre :

Compactage : rouleau à pneus, R > 1,5 tonnes, 4 ⩽ P ⩽ 5 bar

Dosage G (1/m²) Bit. résiduel.

	1re couche	2e couche	3e couche
d/D.....	10/14	6/10	4/6
G.....	11	10	7
L.....	0,800	1,300	1,000
d/D.....	10/14	4/6	–
G.....	11	7	–
L.....	0,700	1,350	–
d/D.....	10/14	4/6	–
G.....	11	7	–
L.....	0,650	1,350	–

Enrobés denses ED et béton bitumineux BB

Granulats.

Granulométrie :

Tamis	ED % passant	BB % passant
10.....	80-100	90-100
6,3.....	60-100	65- 75
2.....	25- 75	45- 60
0,2.....	6- 25	8- 14
0,08.....	3- 7	5- 9
ES minimum....	40	60
% de concassé minimum.....	0-50	90-100

Los Angeles maximum : 40 T_1, 35 T_2 et T_3

Bitume : 40/50 60/70 ou 80/100

Mélange :

	ED	BB
Rc à 7 jours 18°.	25 bar	50 bar
Marshall (minimum)	500 kg	1 000 kg

Mise en œuvre : Répandage au finisseur.

Compactage : pneu R > 2 tonnes puis Tandem ⩾ 6 tonnes

5. Déformabilité après exécution.

Déflexions maximales admissibles (Dm + 1,3 σ) en 1/100 mm sous essieu chargé à 13 tonnes.

Niveau concerné	Plate-forme					Fondation	Base	Chaussée en service après 1re saison des pluies
	Mesures effectuées immédiatement avant réception (saison sèche)							
	Classe S							
Classe T	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 1 à S 5	S 1 à S 5	
T 1.....	500	400	400	350	300	300	125 à 150	150
T 2.....	400	250	250	250	200	200	90 à 100	100
T 3.....	250	200	200	200	150	150	60 à 65	65
T 4.....	200	150	150	100	100	100	35 à 40	40

Note. — Déflexion sur base mesurée après au moins sept jours de cure.

VII. BIBLIOGRAPHIE

SECRÉTARIAT D'ÉTAT AUX AFFAIRES ÉTRANGÈRES CHARGÉ DE LA COOPÉRATION ET MINISTÈRE DE LA COOPÉRATION - BCEOM - CEBTP :

- *Manuel sur les routes dans les zones tropicales et désertiques :*

Tome 1. — *Conception et économie des projets routiers,* Paris, 1972;

Tome 2. — *Études et construction,* Paris, 1975 (voir la bibliographie de ce volume);

Tome 3. — *Entretien et exploitation de la route,* Paris, 1972.

SECRÉTARIAT D'ÉTAT AUX AFFAIRES ÉTRANGÈRES - CEBTP :

- *Emploi des sols fins dans les travaux routiers,* Paris, juillet 1972.
- *Manuel pour le dimensionnement de chaussées pour les pays tropicaux,* Paris, octobre 1972.

MINISTÈRE DE LA COOPÉRATION - BCEOM :

- *Manuel d'exécution des petites ouvrages routiers en Afrique,* 1975.

MINISTÈRE DE LA COOPÉRATION - BCEOM :

- *Manuel sur les comptages routiers et les enquêtes de trafic,* 1976.

MINISTÈRE FRANÇAIS DE L'ÉQUIPEMENT ET DU LOGEMENT, DES TRANSPORTS, DE L'ENVIRONNEMENT ET DU CADRE DE VIE — LCPC — SETRA :

- *Catalogue 1977 des structures types de chaussées neuves.*
- *Directives :*

— *pour la réalisation des assises de chaussées en graves et sables laitiers,* 1973;

— *pour la réalisation des assises des chaussées en grave-ciment,* 1969;

— *complément à la directive pour la réalisation des assises de chaussées en grave-ciment,* 1975;

— *pour la réalisation des assises de chaussées en grave-bitume et sable-bitume, 1972.*

— *pour la réalisation des assises de chaussées en grave-émulsion,* 1974;

— *pour la réalisation des couches de surface de chaussées en béton bitumineux,* 1969;

— *pour la réalisation des enduits superficiels,* 1972.

- *Recommandations :*
  - — *pour la réalisation des chaussées en graves non traitées,* 1974;
  - — *pour le traitement en place des sols fins à la chaux,* 1972;
  - — *pour les terrassements routiers* (3 fascicules), janvier 1976;
- *Les granulats en technique routière,* 1975.
- *Guides de chantier :*
  - — *à l'usage des surveillants et conducteurs de travaux pour la construction des chaussées en béton hydraulique,* 1971;
  - — à *l'usage des surveillants et conducteurs de travaux pour l'exécution des couches de surface en béton bitumineux,* 1974;
  - — *à l'usage des surveillants et conducteurs de travaux pour la réalisation des enduits superficiels,* 1975;
  - — *pour le contrôle du compactage des couches de chaussées,* 1975;
- *Guide technique complémentaire au Guide pour le contrôle de compactage des couches de chaussées,* 1975.
- *Bulletins de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées* (numéros spéciaux) :
  - — *Essais de plaques et mécanique des chaussées et supplément,* 1965;
  - — *Les laitiers de haut-fourneau en construction routière,* 1965-1970;
  - — *Essais AASHO,* 1966;
  - — *La prospection électrique appliquée aux problèmes des Ponts et Chaussées,* 1967;
  - — *Ann Arbor,* 1967-1968;
  - — *Hydraulique des sols,* 1970;
  - — *Émulsions de bitume,* 1974;
  - — *Contrôle de qualité,* 1975;
  - — *Enduits superficiels,* 1975;
  - — *Stabilité des talus,* 1976;
  - — *Les granulats,* 1977;
  - — *Bitumes et enrobés bitumineux,* 1977;
  - — *Traitement des sables pour assises de chaussées,* 1978;
  - — *Le phosphogypse,* 1978;
  - — *Les graves-ciment BLR 94,* mars-avril 1978.

LCPC :

- Journées d'information sur les assises traitées aux liants hydrauliques, mai 1974 (7 fascicules).

LCPC - SETRA :

- *Guide pour le contrôle de compactage des couches de chaussées,* mars 1975.

LCPC - SETRA :

- *Dimensionnement des renforcements de chaussées souples*, juin 1978.

CEBTP :

- Notes techniques 001 à 100 de juin 1966 à septembre 1979.

CEBTP :

- Modes opératoires, 1977 (document interne).

LABORATOIRE DU BÂTIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS DE CÔTE-D'IVOIRE :

- *Manuel pour la conception et le dimensionnement des chaussées neuves. Catalogue des structures-types*, septembre 1977;
- *Recommandations :*
  - — *pour l'utilisation en corps de chaussées des graveleux latéritiques naturels*, août 1977;
  - — *pour l'utilisation en corps de chaussées des graveleux latéritiques améliorés au ciment*, juillet 1977;
  - — *pour l'utilisation en corps de chaussées de sables argileux traités au ciment*, août-septembre 1977;
  - — *pour l'utilisation en corps de chaussées des tout-venants de concassage*, mai 1977;
  - — *pour la formulation et la réalisation des enduits superficiels*, juin 1977;
  - — *pour le choix, l'étude et la mise en œuvre des sols de plate-forme*, mars 1978;
  - — *pour le choix, l'étude et la réalisation des couches bitumineuses de surface :*
    - 1re partie : « Le Sand asphalt », mai 1978,
    - 2e partie : « Les enrobés denses », mai 1978,
    - 3e partie : « Les bétons bitumineux », mai 1978;
  - — *pour l'utilisation en corps de chaussée des sables argileux traités à l'émulsion ou au bitume fluidifié*, novembre 1978;
  - — *pour l'utilisation en couche de base des graves-bitume*, janvier 1979;
  - — *pour l'utilisation en couche de base des graves-ciment*, mars 1979;
  - — *pour l'étude et l'estimation du trafic à prendre en compte, pour le dimensionnement des chaussées*, septembre 1980;
  - — *pour le choix des pentes de déblais routiers et des systèmes de lutte contre l'érosion*, mai 1983;
  - — *pour la conception et l'exécution des fossés latéraux : longueurs critiques et mesures anti-érosives*, juillet 1983.

- *Guide pratique pour l'entretien des routes (3 tomes)*, juin 1982.

CEBTP :

- G. LIAUTAUD et E. BÉRARD, *Les structures de chaussées au Cameroun*, 1976 (document interne).

MINISTRY OF WORKS. — ROAD DEPARTMENT (KENYA) :

- G. COURTEILLE and J.P. SERFASS (CEBTP), *Performance evaluation of Kenyan pavements strengthening requirements*, Nairobi, March 1978.

MINISTRY OF WORKS (KENYA) :

- J. P. SERFASS (CEBTP) and N. B. ONDUTO, *Surface dressing in Kenya. — Proposed design method and specifications*, Nairobi, janvier 1978.

MINISTRY OF WORKS (KENYA) :

- J. P. SERFASS (CEBTP) and N. B. ONDUTO, *The use of crushed stone for road base and sub-base construction*, novembre 1977.

CHRONIQUES DU LABORATOIRE NATIONAL DU BÂTIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS :

- *Dimensionnement des chaussées neuves à Madagascar*, numéro spécial A, 1973.

LABORATOIRE NATIONAL DU BÂTIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS :

- *Note sur les structures de chaussées en Haute-Volta*, Ouagadougou, 1978;
- *Les matériaux utilisés en construction routière en Haute-Volta, un matériau non traditionnel : le « lithostab »*, Ouagadougou, 1978.

LABORATOIRE DU BÂTIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS DE POLYNÉSIE.

- *Étude des matériaux coralliens*, Papeete, 1973.

REVUE GÉNÉRALE DES ROUTES. — FORMATION PERMANENTE :

1970. *Économie. — Conception. — Utilisation de la route.*

1971. *Géotechnique routière. — Matériaux. — Liants.*

1972. *Construction des chaussées.*

1973. *Voirie urbaine.*

1974. *Voirie urbaine. — Infrastructures aéroportuaires.*

1975. *Le compactage. — Les tunnels routiers. — Évolution récente des matériaux des chaussées souples ;*
Méthodes modernes de surveillance du réseau routier ;
Routes sur ouvrages d'art en béton. — Capacité des routes ;
Exploitation des voies rapides. — Relations administrations/Entreprises.

1976. *L'entreprise routière face à ses problèmes de gestion.*

1977. *Préparation et exécution des chantiers routiers. Recherche et créativité dans les entreprises routières. Le règlement de comptes dans les marchés publics de travaux.*
La politique financière de l'entreprise routière ;
Contribution à la réflexion sur l'insertion de l'informatique dans l'industrie routière. — L'expansion de l'entreprise routière. — Traitement en place des sols à la chaux et au ciment. — L'évolution de la technique des chaussées en béton.

1978. *Les enrobés bitumineux. — Assises de chaussées non traitées ou traitées aux liants hydrauliques ou pouzzolaniques ;*
Liste d'aptitude compacteurs vibrants ;
Commentaires du catalogue 1977 des structures types de chaussées neuves ;
L'évolution des matériels d'enduisage.

1979. *Notions élémentaires sur le comportement des chaussées. — Éléments de minéralogie et de géotechnique routière. — Reconnaissance géotechnique et éléments de mécanique des sols ;*
Les terrassements ;
Préparation et organisation des chantiers ;
Drainage et assainissement.

REVUE GÉNÉRALE DES ROUTES (collectif).

- *La stabilisation des sols aux liants hydrocarbonés.* — RGR 540, mars 1978.

OCDE :

- *L'eau dans les chaussées : prévisions de l'humidité des sols sous les chaussées,* Paris, 1973.

COMMISSION ÉCONOMIQUE DES NATIONS UNIES POUR L'AFRIQUE :

- *Symposium d'Addis-Abéba sur les Techniques routières en Afrique,* avril 1974 :
  — conception et construction des couches de base;
  — emploi de la chaux de production locale pour la stabilisation de l'infrastructure des routes;

— choix des caractéristiques des routes africaines;
— rôles et organisation des laboratoires routiers;
— méthodes de reconnaissance et d'évaluation des terrains;
— conception et construction des revêtements routiers bitumineux;
— conception et construction des couches de base et de surfaces bitumineuses.

DEUXIÈME CONFÉRENCE PANAFRICAINE SUR L'ENTRETIEN ET L'AMÉLIORATION DES ROUTES, ACCRA. GHANA, novembre 1977 :

Research into the determination and strengthening of road pavement in developing countries;

Research into road deterioration in relation to traffic volumes and loads in Nigeria;

The CEBTP curviametre;

The development of vertical photography from a Land Rover to monitor the performance of gravel roads;

Prospection, détermination et organisation des gîtes de matériaux destinés à l'entretien des routes (CEBTP);

Collecte et traitement de données géotechniques routières dans le cadre de l'élaboration d'un programme national d'entretien (CEBTP);

Réflexions sur la méthodologie de rédaction et de présentation des manuels (LCPC, BCEOM, CEBTP);

Réduction de l'entretien par des modes de construction appropriés.

IRF (FÉDÉRATION ROUTIÈRE INTERNATIONALE).

- *3e conférence routière africaine,* Abidjan, octobre 1976 :
  — Routes rurales : études, construction, entretien;
  — Recherche appliquée au Laboratoire du Bâtiment et des Travaux publics;
  — La construction des routes économiques : stabilisation des sols, revêtements hydrocarbonés, méthode rapide de contrôle...;
  — Techniques de stabilisation des sols pulvérulents. — Méthode de mesure de teneur en ciment des sols améliorés;
  — Influence des paramètres locaux sur les épaisseurs de chaussées;
  — Procédés de construction permettant de limiter l'entretien des routes;
  — Utilisation des fondations en sols stabilisés en Afrique;
  — Technique de stabilisation des sols applicable en Afrique;
  — Emploi du tuf gypseux et du tuf calcaire en chaussée économique;
  — Construction routière en Côte-d'Ivoire. — Matériaux locaux et techniques utilisées;
  — Les enduits superficiels et leurs applications aux routes africaines.

IRF. — VIIIe Congrès mondial IRF, Tokyo, octobre 1977.

- Thème D : Techniques de construction des routes :
  - — *Tendances actuelles en matière de contrôle routier* (G. Liautaud, CEBTP).

IRF.

- *Conférence régionale pour le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord,* Le Caire, avril 1978 :
  - — Stabilization of fine sand by reinforcement;
  - — L'adaptation des techniques routières aux conditions de l'environnement;
  - — Reconnaissance géologique et géotechnique des tracés routiers.

Fourth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement. Proceedings, August 1977, Ann Arbor.

- LCPC :
  - — Dimensionnement des couches bitumineuses utilisées en renforcement de chaussées.

O.N.U. — Economic Commission for Asia and Far-East.

- *Guide to highway feasibility studies,* 1973.

SEFI :

- *Projet de cahier de prescriptions communes pour les travaux routiers en Afrique,* 1973.

J. Alexandre (et coll.) :

- *Le ciment dans les routes. — Manuel d'initiation technique,* Centre d'information de l'Industrie cimentière, 1977.

M. Allal (et coll.) :

- *Manuel sur l'utilisation des techniques à forte intensité de main-d'œuvre dans les travaux routiers,* 1977.

P. Autret (LCPC) :

- *Nouvelles spécifications brésiliennes concernant les couches de base et de fondation en stabilisé mécanique concernant les sols latéritiques, BLR* (1) *74,* novembre-décembre., 1974.

(1) Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées.

M. Bouche (CEBTP) :

- *Mouvement de l'eau dans les sols fins compactés. Action d'un produit hydrophobant.* 1975.

B. Celard (ESSO) :

- *La technique ESSO de dimensionnement des chaussées,* mars 1978, Ann Arbor.

M. Chagnas-J.C. Tijou :

- « Problèmes posés par la construction des chaussées au Gabon », *Revue générale africaine de l'industrie,* n° 13, juillet 1977.

M. Dumas-G. Liautaud. :

- *A propos des nouvelles normes brésiliennes concernant les latérites,* BLR 81, janvier-février 1976.

M.D. Gidigasu :

- *Laterite soil engineering. — Pedogenesis and engineering principles,* BRRI, Kumasi-Ghana, 1976.

J.M. Gresillon :

- *Quelques observations sur l'usure mécanique des chaussées non revêtues appelée tôle ondulée,* RGR, 539, février 1978.

C.G. Harral (et coll.) :

- *Évaluation de la priorité économique de l'entretien des routes,* conférence Ghana, 1977.

G. Jeuffroy :

- *Conception et construction des chaussées,* 2 tomes, édition Eyrolles, Paris, 1967.

R. Joneaux :

- *Possibilités comparées des routes non revêtues et des routes revêtues en pays africains,* ministère de la Coopération, Paris, 1975.

M. Joubert (SETRA) :

- *Les granulats en technique routière,* 1973.

G. LIAUTAUD :

- *L'adaptation des techniques routières aux conditions de l'environnement,* IRF, Le Caire, 1978.

SHELL FRANÇAISE.

- *Méthode SHELL de dimensionnement des chaussées souples,* 1979.

TRANSPORT AND ROAD RESEARCH LABORATORY.

- TRRL. — Road Note 31.

  — *A guide to the structural design of bituminous surfaced roads in tropical and subtropical countries,* London ,1977, 3e édition.

E.J. YODER, M. W. WITCZAK :

- *Principles of pavement design,* 2nd edition, New York, 1975.

ADDENDUM 1984

- *Les émulsions de bitume et leurs applications routières.* Syndicat des fabricants d'émulsions routières de bitume, 52, Champs-Élysées, Paris, 1976;
- *Les chaussées en béton.* Ministère des Transports. Bulletin spécial LCPC, septembre 1978;
- *Les encroûtements calcaires et les encroûtements gypseux en géotechnique routière.* José Carlos de Os HORTA. BET. Laboratoire de mécanique des sols, Alger, 1979;
- *Entretien préventif du réseau routier national* (Guide technique, répertoire des dégradations, complément au guide). Ministère des Transports, LCPC, SETRA, 1979-1984;
- *Chaussées neuves à faible trafic. Manuel de conception.* Ministère des Transports, LCPC, SETRA, juillet 1981;
- *Les enrobés au liant bitume-soufre. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées,* n° 118, mars-avril 1982, p. 61-66*c*;
- Nouvelle méthodologie d'étude des enrobés. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées,* n° 118, mars-avril 1982, p. 53-60*c*;

- *Manuel d'entretien des routes* (3 tomes). Nations-Unies, Commission économique pour l'Afrique. Ministère de la Coopération et du Développement, BCEOM, LCPC, CEBTP, BAST, TRRL, 1982;
- *Matériels de travaux publics.* Ministère des Transports, LCPC n° spécial XII, 1982;
- *Le Matériel LPC.* Ministère des Transports, LCPC, 1982;
- *Reconnaissance géologique et géotechnique des tracés de routes et autoroutes.* Ministère des Transports. Note d'information technique, LCPC, 1982;
- *Assainissement routier (recommandation).* Ministère des Transports. LCPC, SETRA, 1982;
- *La route Tahoua-Arlit (Niger). Les matériaux de chaussées.* ISTED, 1983;
- *Latérites et graveleux latéritiques.* ISTED, 1983;
- *Réalisation des assises de chaussées en graves traitées aux liants hydrauliques (directive).* Ministère des Transports, LCPC, SETRA, 1983;
- *Memento des spécifications françaises. Chaussées.* Ministère des Transports, LCPC, SETRA, février 1984;
- *Spécifications relatives aux granulats pour chaussées (directive).* Ministère des Transports, LCPC, SETRA, avril 1984;
- *Comportement et entretien des routes revêtues en zone sahélienne. L'exemple du Niger.* ISTED, 1984.

- *Réalisation des assises de chaussées en graves traitées aux liants hydrauliques (directive).* Ministère des Transports, LCPC, SETRA, 1983;
- *Memento des spécifications françaises. Chaussées.* Ministère des Transports, LCPC, SETRA, février 1984;
- *Spécifications relatives aux granulats pour chaussées (directive).* Ministère des Transports, LCPC, SETRA, avril 1984;
- *Comportement et entretien des routes revêtues en zone sahélienne. L'exemple du Niger.* ISTED, 1984.

FILMS

- *Les granulats,* LCPC;
- *Les enduits superficiels,* LCPC;
- *Le curviamètre,* CEBTP;

- *Le stradographe,* CEBTP;
- *La route en Afrique,* CEBTP;
- *Les émulsions cationiques de bitume,* LCPC;
- *Sable-bitume en technique routière,* LCPC;
- *Le compactage ou l'horreur du vide,* LCPC;
- *Renforcement des chaussées - Méthode et expérience françaises,* LCPC;
- *Un petit cours de route,* LCPC;
- *Le bon et le mauvais profil de la route,* LCPC.

IMPRIMERIE NATIONALE
4 301018 T 76

Diffusé par

LA DOCUMENTATION FRANÇAISE
29-31, quai Voltaire
75340 Paris Cedex 07
Tél. : (1) 261.50.10
Télex 20.48.26 DOCFRANC PARIS

Prix : 65 F

ISBN-2-11-084811-1