

Généralités sur les granulats routiers

1. - Définitions et présentation générale

La norme française définit le granulat comme un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 80 mm, destiné notamment à la confection des mortiers et des bétons ainsi qu'à celle des couches de roulement, de base et de fondation des chaussées et aux voies ferrées.

Ils sont appelés fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballast suivant leurs dimensions.

Les granulats peuvent être d'origines diverses :

- Naturelle comme les alluvions ou les formations résiduelles,
- Provenir du concassage des roches massives comme le basalte, le calcaire, les grès ;
- Artificiels ou provenant de sous-produits industriels.

2. - Nomenclature et Classification

La norme française définit la classification des granulats d'après les dimensions de leurs grains exprimée en ouvertures de tamis à mailles carrées en millimètres.

Un granulat est dit :

- d/D s'il satisfait aux conditions suivantes :
Refus sur le tamis de maille D et tamisât au tamis de maille d , compris :
 - entre 1 et 15 % si $D > 1,58d$,
 - entre 1 et 20 % si $D \leq 1,58d$.Refus nul sur le tamis de maille $1,58D$, tamisât au tamis de maille $0,63d < 3\%$, d étant $\geq 0,5\text{mm}$.
- $0/D$ s'il satisfait aux conditions suivantes :
Refus sur le tamis de maille D compris entre 1 et 15 %,
Refus nul sur le tamis de maille $1,58D$.

Il existe six classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés :

- les fillers $0/D$ avec $D < 2\text{ mm}$ et au moins 70 % de passant à $0,063\text{ mm}$,
- les sablons $0/D$ avec $D \leq 1\text{ mm}$, et moins de 70 % de passant à $0,063\text{ mm}$;
- les sables $0/D$ avec $1 < D \leq 6,3\text{ mm}$;
- les graves $0/D$ avec $D > 6,3\text{ mm}$;
- les gravillons d/D avec $d \geq 1\text{ mm}$ et $D \leq 125\text{mm}$;
- les ballasts d/D avec $d \geq 25\text{ mm}$ et $D \leq 50\text{ mm}$.

La norme française distingue deux types de Graves non traitées (GNT), selon leur mode d'élaboration :

- GNT type A obtenue en une seule fraction directement sur une installation de criblage et concassage, permettant d'obtenir une compacité minimale à l'OPM de 80 %.
- GNT type B obtenue par mélange de deux (ou plusieurs) fractions granulométriques différentes. Elles sont malaxées et humidifiées en centrale, permettant d'obtenir une compacité minimale à l'OPM de 80 % pour la catégorie B1 et 82 % pour la catégorie B2. Ce type de GNT permet d'obtenir une meilleure qualité de mise en oeuvre.

3. - Les fuseaux granulométriques

Bien qu'elle soit appliquée dans ce paragraphe à la granulométrie, elle doit être étendue à l'ensemble des propriétés des granulats (Equivalent de sable, etc.). Le fuseau granulométrique est la zone délimitée par deux courbes granulométriques enveloppes. On distingue :

- Le fuseau de spécification propre à la technique considérée, qui définit la zone dans laquelle doit se situer les fuseaux de tolérance.

- Le fuseau de fabrication, qui contient 95 % des courbes granulométriques du matériau fabriqué. Un fuseau de fabrication est entièrement inclus dans le fuseau de régularité. Sa définition requière au moins 15 valeurs afin d'être suffisamment représentatif et est établi par le producteur de granulats.
- le fuseau de régularité, ou de tolérance, qui définit l'étendue de la zone dans laquelle doit se situer 95 % des courbes obtenues au cours du contrôle.

4. - Les différentes approches pour l'étude des matériaux non liés

En fonction de l'échelle d'observation, il y a différentes approches qui peuvent être adoptées pour la détermination et l'étude des caractéristiques mécaniques des matériaux de chaussées.

4.1. - L'approche microscopique

L'observation pour cette approche se fait à l'échelle des granulats. On observe les caractéristiques géométriques et physiques des grains (Gidel, 2001 et Habiballah, 2005).

Les observations à relever à l'échelle granulaire afin de déterminer les caractéristiques mécaniques de la grave non traitée sont les suivantes :

- Les caractéristiques liées à la géométrie globale des grains : la granularité, la taille des grains et leur forme,
- Les caractéristiques liées à l'état de surface sont généralement la rugosité, l'angularité et la forme des grains ;
- Les caractéristiques mécaniques des grains sont évaluées selon leurs duretés et leurs résistances. La dureté des granulats est un facteur à prendre en compte dans la classification des matériaux non liés des chaussées souples. En absence de liant, les granulats sont amenés à supporter plus d'efforts d'attrition et de fragmentation. La résistance à ce genre d'agression repose sur la nature minéralogique des granulats. Cette résistance est mesurée par l'essai Los Angles (LA) et par l'essai Micro-Deval en présence d'eau.

4.2. - L'approche macroscopique

L'échelle de l'observation est celle d'un échantillon homogène dont les dimensions sont suffisamment supérieures au diamètre maximal des grains afin de pouvoir assimiler l'échantillon à un milieu continu (Gidel, 2001 et Habiballah, 2005). Grâce à cette approche, il est facile de simuler des sollicitations et de relever les réponses de l'échantillon. Cette approche est l'une des bases des méthodes de dimensionnement rationnel des chaussées. Parmi les essais utilisés, il y a l'essai CBR (Californian Bearing Ratio) et l'essai triaxial à chargements répétés (TCR).

4.3. - L'approche globale

Pour cette approche, l'observation des phénomènes se fait à l'échelle des couches (Gidel, 2001 et Habiballah, 2005). Elle permet l'étude du comportement de l'ensemble d'une structure de chaussée en prenant en compte les conditions in situ non réalisables dans les deux premières approches. Dans le cas des chaussées souples, l'approche globale de l'étude du comportement mécanique des matériaux à l'échelle des couches est basée sur la mesure de la déformation verticale en surface de la chaussée. La méthode réglementaire consiste en une évaluation globale de l'état de la structure et du sol support à partir de la comparaison de la déflexion mesurée avec des seuils prédéfinis (*exemple de la structuration du code de calcul Alizé 3*). L'approche globale s'appuie sur des essais réalisés sur l'ensemble chaussée-sol support, notamment l'essai de plaque statique et cyclique, la dynaplaque, le manège de fatigue et les chaussées instrumentées.

5. - Caractéristiques géométriques des granulats routiers (Tourenq et Denis, 1982 in Gaye, 1995)

Les matériaux constituant les différentes couches d'une chaussée peuvent être des matériaux concassés ou roulés. Cependant, afin de disposer d'un angle de frottement le plus fort possible, il est nécessaire d'exiger un indice de concassage d'autant plus élevé que le trafic est plus important et la charge légale à l'essieu plus lourde.

Les caractéristiques géométriques principales des granulats routiers sont : l'état de surface, l'angularité, la forme et la granularité.

5.1. - Etat de surface des granulats

Dans le cas des roches polycristallines ($\varnothing > 1$ mm), la rugosité dépend de la structure de la roche. Si le grain est monominéral ($\varnothing < 1$ mm), la surface est généralement lisse.

Pour les roches polycristallines, la rugosité dépend de la dimension « d » des cristaux. Plus une roche a un « grain fin », plus sa cassure est lisse. Par contre, les roches à « gros grain » ont toujours des surfaces rugueuses.

L'état de surface des grains joue un rôle au niveau de la maniabilité des matériaux, de la stabilité des assises non traitées et de la microrugosité des couches de surfaces. Cependant, l'action du trafic tend à polir la surface des grains, mais il est admis qu'une bonne microrugosité assure généralement une bonne adhérence à faible vitesse.

5.2. - Angularité des granulats

Elle joue un rôle important pour les gravillons de la couche de roulement, en améliorant l'adhérence, et pour ceux des assises de chaussée, dont elle améliore la stabilité.

Pour un granulat de roche massive, elle est égale à 100 %.

Pour un granulat d'origine alluvionnaire, elle est définie par deux données :

- l'indice de concassage IC , proportion en poids d'éléments supérieurs à la dimension D du granulat élaboré,
- le rapport de concassage RC , rapport entre d du matériau soumis au concassage et D du granulat obtenu.

Pour les assises de chaussées non traitées l'angularité favorise les propriétés mécaniques en augmentant l'angle de frottement interne : celui-ci augmente d'environ 12° dans un essai triaxial quand on passe des billes de verre entièrement roulées aux billes de verre concassées.

Pour les couches de roulement, ce facteur favorise l'adhérence pneumatique, la rupture du film d'eau et le drainage.

La maniabilité et la compactibilité sont également liées à l'angularité : le déplacement relatif des grains et leur mise en place sont facilités lorsqu'ils sont arrondis.

5.3. - La forme des granulats

Elle joue un rôle important à la fois pour les granulats de la couche de roulement, des gravillons plats ayant tendance à se coucher au moment du compactage, et pour les matériaux d'assise, des granulats plats ou allongés réduisant la compacité et la stabilité.

Elle a aussi une grande influence sur les caractéristiques mécaniques des matériaux (Los Angeles, Micro-Deval, fragmentation dynamique).

cubes, sphères	trois dimensions à peu près égales (bonne compacité)
plaquettes	une dimension beaucoup plus petite que les deux autres (mauvaise compacité)
aiguilles	une dimension beaucoup plus grande que les deux autres (très mauvais compacité)

Tableau 1. - Formes des granulats.

5.4. - La granularité des granulats

Elle caractérise la répartition du granulat en tranches dimensionnelles. La granularité a une importance primordiale car elle permet d'obtenir une compacité maximale et d'éviter la ségrégation au moment de la mise en œuvre.

La granularité que l'on peut maîtriser et optimiser pour tous les matériaux, apparaît comme le recours le plus général pour corriger les autres caractéristiques géométriques des granulats et dans une certaine mesure une résistance mécanique déficiente.

6. - Le Compactage des matériaux (Kabre, 1991 in Gaye, 1995)

6.1. - Définition

Compacter un matériau, c'est réduire le volume des vides de ce matériau et organiser la structure des grains de manière à obtenir un assemblage plus stable. Cette opération qui s'appelle le compactage peut être obtenue par des sollicitations statiques (compactage statique), dynamiques (compactage dynamique), ou par vibrations (compactage *in situ*).

6.2. - Rôle du compactage sur la durée de vie des ouvrages

Le compactage met le matériau dans un état suffisamment serré de telle sorte qu'un tassement ultérieur soit impossible ou peu important. Les mouvements relatifs sont réduits ou supprimés, diminuant ainsi l'attrition. En réduisant le volume des vides, le compactage augmente la densité apparente sèche et diminue la perméabilité qui est fonction de l'indice des vides.

Le compactage entraîne une élévation des caractéristiques mécaniques. En effet, le resserrement des grains augmente le nombre de contact entre eux et par conséquent leur frottement. L'angle de frottement interne et la cohésion en sont accrus. Il y a également augmentation considérable du module de déformation.

6.3. - Les paramètres influents du compactage

o La teneur en eau

L'influence de la teneur en eau et de l'énergie de compactage sur la densité sèche du matériau a été mise en évidence en 1933 par l'ingénieur américain Proctor.

En effet pour une énergie de compactage donnée, si l'on fait varier la teneur en eau w et l'on représente graphiquement la variation du poids spécifique sec γ_d en fonction de cette teneur en eau, on obtient une courbe en cloche qui présente un maximum appelé Optimum Proctor séparant de gauche à droite la branche sèche et la branche humide.

Lorsque la teneur en eau est raisonnable, l'eau joue un rôle de lubrifiant et la densité sèche augmente avec la teneur en eau jusqu'à un maximum (Branche sèche). Par contre lorsque la teneur en eau est élevée (Branche humide), l'eau absorbe une partie importante de l'énergie de compactage. Elle occupe la place des grains solides et aucun tassement n'est possible.

o La nature du matériau

Le comportement et les sollicitations développés par les matériaux sont plus ou moins fonction de leur nature. De façon générale, la courbe Proctor est très aplatie pour les sables et par contre présente un maximum très marqué pour les argiles plastiques.

Pour les matériaux à courbe Proctor aplatie, le compactage est peu influencé par la teneur en eau. Ces matériaux sont peu sensibles à l'eau mais il est souvent difficile d'améliorer leurs caractéristiques (Energie de compactage à fournir plus importante).

o L'énergie de compactage

Pour un matériau donné, si l'énergie de compactage augmente, le poids volumique maximum augmente et les courbes deviennent plus pointues.

Khaye, Morel et Machet (1979) *in* Gaye (1995) montrent que la densité sèche après compactage augmente avec la charge de la roue et la pression de gonflage.

Martinez (1980) *in* Gaye (1995) remarque que la réponse des matériaux granulaires aux sollicitations cycliques qui n'atteignent pas les charges de rupture peut être de trois types :

- Adaptation : l'énergie dissipée et la déformation permanente est nulle et la réponse du matériau est réversible et élastique,
- Accommodation : les déformations permanentes sont stabilisées et l'énergie dissipée n'est pas nulle (phénomène d'hystérésis). La réponse réversible est non linéaire ;
- Rochet : l'énergie dissipée et les déformations permanentes augmentent avec la sollicitation jusqu'à la stabilisation ou la rupture (déformation plastique).

o L'angularité, la forme, la granularité et le pourcentage des fines

Des matériaux très anguleux se mettent difficilement en place entraînant l'augmentation de l'énergie de compactage.

Arquie et Morel (1988) *in* Gaye (1995) montrent qu'un matériau ayant une bonne granularité aura une densité maximale plus élevée qu'un matériau creux ou ayant un excès de sable.

Kabre (1991) *in* Gaye (1995) indique que la compacité augmente avec le coefficient

$$\text{d'uniformité } C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}.$$

D_{60} et D_{10} sont les diamètres des tamis qui laissent passer respectivement 60 % et 10 % du matériau.

Morel et Machet (1980) *in* Gaye (1995) trouvent que pour une énergie de compactage donnée, l'indice des vides décroît avec le pourcentage d'éléments fins ($< 80\mu\text{m}$).

o Le sol-support

Pour une même épaisseur de matériau, un support plus rigide conduit à des densités plus élevées. Les sollicitations développées par un rouleau vibrant sont considérablement influencées par les caractéristiques du sol-support.

7. - Dimensionnement des structures de chaussées

Le sol ne peut seul supporter un trafic routier sans subir d'importantes déformations. C'est pourquoi il est surmonté d'un corps de chaussée dont le rôle principal est la répartition latérale des contraintes dues à des charges roulantes en surface afin de les amener à des niveaux compatibles avec les caractéristiques mécaniques du sol naturel.

La structure de la chaussée est constituée du bas vers le haut de la Plate-forme (éventuellement surmontée d'une couche de forme), de l'assise et de la couche de surface.

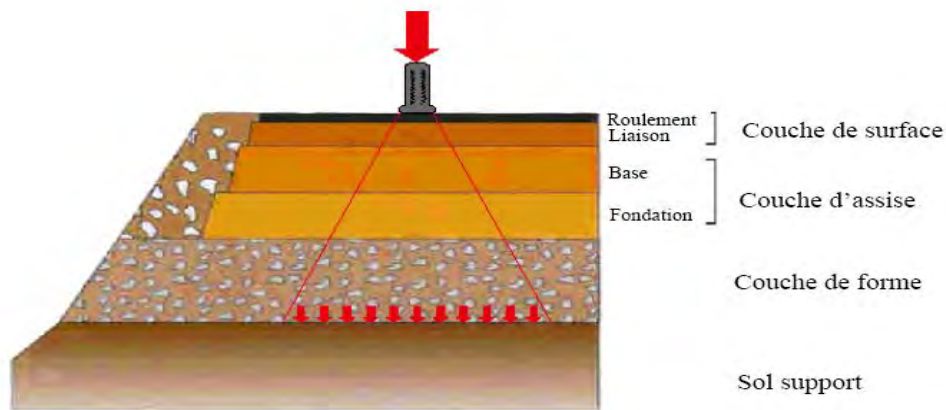


Fig. 1. - Structure de chaussée type et répartition des contraintes [Guide technique SETRA (1994)].

La plate-forme constitue le support sur lequel repose la chaussée. Elle est constituée du sol support (déblai ou remblai, sol en place ou rapportée) désigné dans sa zone supérieure (sur 1m d'épaisseur environ), par le terme Partie Supérieure des Terrassements (PST), et dont la surface constitue l'arase de terrassement ; et d'une couche de forme éventuelle.

L'assise est généralement constituée de deux couches, la couche de fondation surmontée de la couche de base. Ces couches apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic. Elles répartissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans des limites admissibles.

Eventuellement on peut trouver, entre la plate-forme et la fondation une sous-couche.

La couche de surface est la couche supérieure de la chaussée. Elle est constituée de la couche de roulement sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat, et le cas échéant, d'une couche de liaison, intermédiaire entre les couches d'assise et la couche de roulement qui permet d'assurer une bonne adhérence entre la couche de base et la couche de roulement.

7.1. - Les modèles empiriques et semi empiriques de dimensionnement

Ces modèles sont fondés sur une observation expérimentale des chaussées et de leur comportement sous trafic. Il existe plusieurs méthodes empiriques et semi empiriques parmi lesquelles nous avons l'habitude de citer la méthode du CBR et celle du CEBTP.

7.1.1. - La méthode du CBR

Elle est basée d'une part sur la résistance au poinçonnement du sol de fondation, résistance appréciée par un essai normalisé le, CBR, et d'autre part sur la théorie de Boussinesq donnant la répartition en profondeur des pressions verticales.

On considère un massif homogène, isotrope et élastique limité par un plan horizontal et de dimension infinie. Si l'on applique à la partie supérieure du massif une charge verticale P répartie uniformément sur un cercle de rayon R , il en résulte sur un plan horizontal situé à une profondeur z , une pression verticale σ_z .

A la profondeur $z = e$ correspondant par exemple à l'épaisseur de la chaussée, la pression σ_e qui s'exerce sur le sol de fondation doit être inférieure à la résistance au poinçonnement I de ce sol.

$$\sigma_e = KI \text{ (K coefficient de sécurité tenant compte du caractère empirique de l'essai).}$$

Ceci a permis d'établir des abaques donnants, en fonction du CBR, l'épaisseur nécessaire du corps de chaussée.

7.1.2. - La méthode proposée par le CEBTP pour les pays tropicaux

Cette méthode s'appuie sur les principes de bases suivantes :

- Dans le cas des chaussées souples, l'indice portant de la Plate-forme et l'intensité du trafic déterminent l'épaisseur totale de la chaussée,
- Dans le cas des chaussées à assise traitée donc susceptibles d'une rupture en traction, le dimensionnement précédant qui vise uniquement à éviter le poinçonnement de la forme, doit être complété par une analyse théorique pour s'assurer que les contraintes de traction à la base des couches rigidifiées sont compatibles avec les performances des matériaux.

Essieu équivalent de 13 tonnes	Essieu équivalent de 8,2 tonnes	Classes de Plate-forme d'après Le CEBTP	
$T_1 < 5.10^5$	$T_1 < 3.10^6$	5 < CBR	S1
$5.10^5 < T_2 < 1,5.10^6$	$3.10^6 < T_2 < 10^7$	5 < CBR < 10	S2
$1,5.10^6 < T_3 < 4.10^6$	$10^7 < T_3 < 2,5.10^7$	10 < CBR < 15	S3
$4.10^6 < T_4 < 10^7$	$2,5.10^7 < T_4 < 6.10^7$	15 < CBR < 30	S4
$10^7 < T_5 < 2.10^7$	$6.10^7 < T_5 < 10^8$	CBR > 30	S5

Tableau 2. - Classes de trafic équivalent et de plate forme (CEBTP, 1984).

Spécifications du CEBTP pour couches de bases des chaussées : cas des concassés 0/d

- Indice portant CBR à 95% de l'OPM et après 4 jours d'imbibition supérieur à 80,
- Fuseau 0/31.5 ;

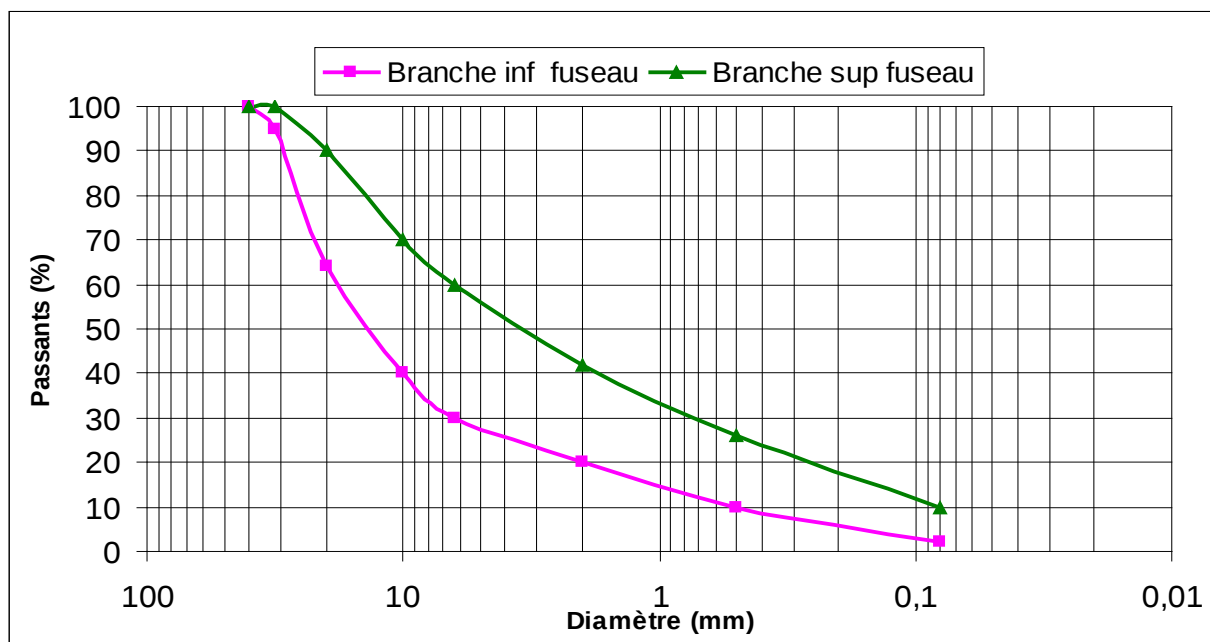


Fig. 2. - fuseau 0/31.5 Concassés 0/d (CEBTP, 1984)

- Pourcentage de fines compris entre 2 et 10 % ;
- Equivalent de sable (ES) :

ES supérieur ou égal à 30 pour trafic T1 - T2,

ES supérieur ou égal à 40 pour trafic T3 - T4 ;

- Porosité : $n = 100 \times \left(1 + \frac{\gamma_{d_{\max}}}{\gamma_s}\right) < 15\%$;
- Les résistances exigées pour les granulats constitutifs de la couche de base sont :
 - Los Angeles inférieur ou égal à 45 (T1 – T3) ou à 30 (T4 – T5),
 - Micro-Deval inférieur ou égal à 15 (T1 – T3) ou à 12 (T4 – T5).

7.2. - Les méthodes rationnelles de dimensionnement

Ces méthodes sont basées sur les comportements élastiques et viscoélastiques des matériaux et donnent, en fonction de la géométrie du pneumatique, de l'épaisseur et des rapports de modules des différentes couches de la chaussée, la valeur des contraintes soit de compression, soit de traction aux différentes interfaces.

Les contraintes et les déformations sont calculées au niveau de chaque couche par :

$$\sigma_z^{adm} = \frac{0,3 \times CBR}{1 + \log N} \quad \text{en bars} \quad [1]$$

Selon le nombre équivalent d'essieu NE, la valeur seuil de la déformation élastique au sommet du sol-support est calculée par la formule suivante :

$$\varepsilon_z^{adm} = A \times (NE)^{-0,222} \quad \text{en mm} \quad [2]$$

A = contrainte pour laquelle la rupture en flexion sur éprouvette de 360 jours, est obtenue pour 10^6 chargements.

$$\begin{aligned} A &= 0,0016 \text{ pour les trafics} & T < T_3 \\ A &= 0,012 \text{ pour les trafics} & T \geq T_3 \end{aligned}$$

Ces valeurs sont comparées avec celles obtenues en laboratoire soit sur la résistance à la compression, soit sur la résistance à la traction des matériaux constituant la chaussée.

La grave non traitée est classée en trois catégories en fonction de la classe de trafic, de la propreté des granulats, de leur dureté, de leur indice de concassage et de leur teneur en fines. A chaque catégorie est attribué un module de Young variant entre 200 et 600 MPa. Le coefficient de Poisson est pris égal à 0.35 à défaut d'informations spécifiques.

	Valeur du module de Young pour la GNT (Chaussée souple à faible trafic)											
Chaussée à faible trafic (T < T3)												
Couche de base	Catégorie 1 : $E_{GNT} = 600 \text{ MPa}$ Catégorie 2 : $E_{GNT} = 400 \text{ MPa}$ Catégorie 3 : $E_{GNT} = 200 \text{ MPa}$											
Couche de fondation (GNT subdivisée en sous-couches de 25 cm d'épaisseur)	$E_{GNT} [1] = k E_{\text{plate-forme support}}$ $E_{GNT} [\text{sous-couche } i] = k E_{GNT} [\text{sous-couche } (i-1)]$ <table><tr><td>catégorie</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr><tr><td>k</td><td>3</td><td>2.5</td><td>2</td></tr></table>				catégorie	1	2	3	k	3	2.5	2
catégorie	1	2	3									
k	3	2.5	2									

Tableau 3. - Valeurs du module de Young pour la grave non traitée selon le guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussée [Guide technique SETRA (1994)].

La déformation verticale au sommet du sol est aussi déterminée à partir du code de calcul ALIZE. Cette valeur est comparée avec la déformation verticale admissible.

Il faut que $\mathcal{E} < \mathcal{E}_z^{adm}$ sinon il y a orniérage.