
Identification et Caractéristiques des matériaux Evaluation de la qualité.

Chapitre 1. - Provenance des matériaux de l'étude

Introduction

Les formations géologiques faisant l'objet d'une exploitation pour la production de granulats sont en général des roches massives (basalte, grès, calcaire, silex) du Bassin sénégal-mauritanien. Ce bassin est le plus occidental et le plus étendu des bassins méso-cénozoïques de la marge Atlantique africaine qui s'est individualisé au Trias à la suite de la séparation des plaques africaine et américaine.

Le bassin Sénégal-mauritanien est relativement calme. Seule la partie occidentale (Cap-Vert et région de Thiès) a été affectée par des phénomènes tectoniques et des épisodes volcaniques localisées le long de failles généralement orientées NE-SW.

1. - Les formations basaltiques (Dia, 1982)

La partie occidentale du bassin sénégal-mauritanien a été le siège d'un important volcanisme vers la fin du Tertiaire sur l'ensemble du Cap Vert et du Plateau de Thiès, et au quaternaire sur la presqu'île de Dakar.

Le premier épisode volcanique a lieu au Miocène. Il se manifeste par des épanchements de basalte dans la presqu'île du Cap-Vert et des intrusions dans la région de Thiès (Diack).

Le Basalte est une roche magmatique effusive très commune. C'est une roche noire (mésocrate à mélanocrate), microlitique, comportant des plagioclases, et des pyroxènes, accompagnés selon les cas d'olivine, d'hypersthène, de magnétite, d'ilménite ; il peut s'y ajouter, en faible pourcentage, soit de quartz, soit des feldspathoïdes. Trois types de faciès ont été identifiés à Diack :

- un faciès à grains fins, majoritaire, représenté essentiellement par des Basanites. Il a une structure microlitique porphyrique à phénocristaux de pyroxène et d'olivine, dans une mésostase riche en verre et en microlites de plagioclase, de microcristaux de pyroxène et d'olivine.
- un faciès à grain moyen moins abondant que le faciès précédant. La structure est doléritique intersertale avec pourcentage élevé de plagioclase en lattes englobant des pyroxènes et/ou des olivines en phénocristaux ou en microcristaux.
- un faciès à gros grain représenté par une roche grenue entièrement cristallisée, sans mésostase interstitielle. La structure est de type grenue pegmatitoïde contenant de nombreuses lattes de plagioclase et des cristaux de pyroxène.

Un second épisode volcanique a eu lieu au Quaternaire. C'est le « volcanisme des mamelles » qui n'affecte que la région de Dakar. Il est de composition doléritique et basanitique.

2. - Les formations calcaires (Dramé, 2004)

Les formations calcaires du bassin sénégal-mauritanien sont d'âge Crétacé Supérieur à Paléocène et sont présentes dans une grande extension dans la Presqu'île de Cap Vert et le Plateau de Thiès. Les sondages exécutés dans les carrières calcaires de Bandia où les matériaux ont été prélevés montrent une lithologie constituée essentiellement de calcaire gréseux et de calcaire franc.

2.1. - Le calcaire gréseux

Ce calcaire a une couleur jaunâtre avec un aspect massif et très dure. Vu au microscope, il a une texture de type « wackstone ». Les éléments figurés sont principalement constitués de minéraux de quartz et d'éléments biogènes (algues vertes, fragments de lamellibranches et de bryozoaires, des débris de gastéropodes recristallisés en calcite, des plaques d'échinodermes) pris dans une matrice micritique partiellement recristallisée.

2.2. - Le calcaire franc

Ce calcaire est de couleur blanchâtre à jaunâtre avec une diversité de faciès :

- **Le calcaire lumachelique** : très fossilifère, blanchâtre, très poreux, peu fracturé, massif, dur et renferme de rares cavités de dissolution. Les éléments figurés sont arrondis et brisés attestant un transport. La texture est de type « packstone ». Les bioclastes sont des fragments de mollusques associés à des débris de gastéropodes et des plaques d'échinodermes. La porosité intergranulaire est remplie par de la micrite.
- **Le calcaire microcoquillier** : à pâte fine, très poreux, fracturé et à rare cavité de dissolution. La texture est de type « packstone » avec parfois une tendance « wackstone ». Les bioclastes sont essentiellement des plaques d'échinodermes cimentées par la micrite.
- **Le calcaire macrocoquillier** : calcaire massif, cristallin, peu poreux, avec des débris coquilliers brisés, corrodés ou épigénisés en calcite. La texture est de type « packstone » avec une phase de liaison micritique. Les éléments biogènes sont des algues, des fragments de lamellibranches, de mollusques et de gastéropodes.
- **Le calcaire cristallin microfossilifère** : massif et très fossilifère. Il renferme de rares recrystallisations de calcite et de rares cavités de dissolution. La texture est de type « packstone » avec des plaques de calcite secondaire. Les bioclastes sont des miliolidés, des plaques d'échinodermes et de bryozoaires.
- **Le calcaire crayeux** : calcaire non coquillier, peu ou pas fossilifère, avec un aspect tendre et friable. Il s'intercale dans le calcaire cristallin. La texture est de type « mudstone » à rares plaques d'échinodermes. La phase de liaison est constituée essentiellement de micrite.
- **Le calcaire altéré** : il est au sommet des couches calcaires. Il se présente sous forme de blocs emballés dans une matrice à argile noire parfois latéritisée.

3. - Les silexites (Diémé, 1991 in Gaye, 1995)

Ce sont des roches hypersiliceuses se présentant sous forme de rognons ou groupées en passés plus ou moins horizontaux dans les niveaux phosphatés de la région de Taïba formés à partir du Paléocène pour se développer ensuite à la base de l'Eocène.

Ces roches sont issues d'une silicification secondaire par remplacement de matériel initial et reconcentration à partir d'un stock de silice biogène. La nature du minéral siliceux néoformé dépend souvent de la composition du milieu ambiant : quartz en milieu siliceux, calcédoine (silice plus ou moins fibreuse) en milieu riche en ions alcalins ou alcalino-terreux, opale (silice riche en eau) dans un milieu riche en phyllithes (argile).

Un échantillon d'un tout-venant de Silexite montre que la roche est constituée de 91% de silex, 6% d'induré phosphaté, 3% de fines à éléments phosphatés et argileux.

Le silex se présente généralement sous forme de blocs à cœur sombre et à cortex blanc. L'observation au microscope optique révèle que les silex sont composés de 30 à 40% d'opale, et 60 à 70% de calcédoine.

Cette prédominance de la calcédoine s'explique par sa stabilité chimique plus grande que celle de l'opale.

Les relations entre ces deux minéraux montrent que l'opale s'est cristallisée la première, puis la calcédoine se cristallise par épigénisation de l'opale.

Chapitre 2. - Les caractéristiques mécaniques des granulats

L'aptitude des granulats à être utilisés dans les assises de chaussée est appréciée par un certain nombre d'essais dont les principaux sont les suivants.

1. - Essais caractéristiques de la fabrication

1.1. - Analyse granulométrique

- On appelle analyse granulométrique l'opération permettant de déterminer
 - La granulométrie : c'est-à-dire la détermination de la grosseur des grains et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons,
 - La granularité : c'est-à-dire la répartition dimensionnelle des grains dans un granulat.

L'analyse granulométrique consiste à fractionner le matériau en différentes coupures à l'aide de tamis à maille carrée. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers. Les masses des différents refus sont rapportées à la masse initiale sèche du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de graphique en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique. La courbe appelée courbe d'analyse granulométrique est tracée de manière continue et peut ne pas passer rigoureusement par tous les points.

- Les tamis sont normalisés. Les ouvertures de mailles carrées permettent un classement granulaire. Les dimensions successives des mailles carrées suivent des progressions géométriques de raison $\sqrt[10]{10} = 1,25$ pour la série française.

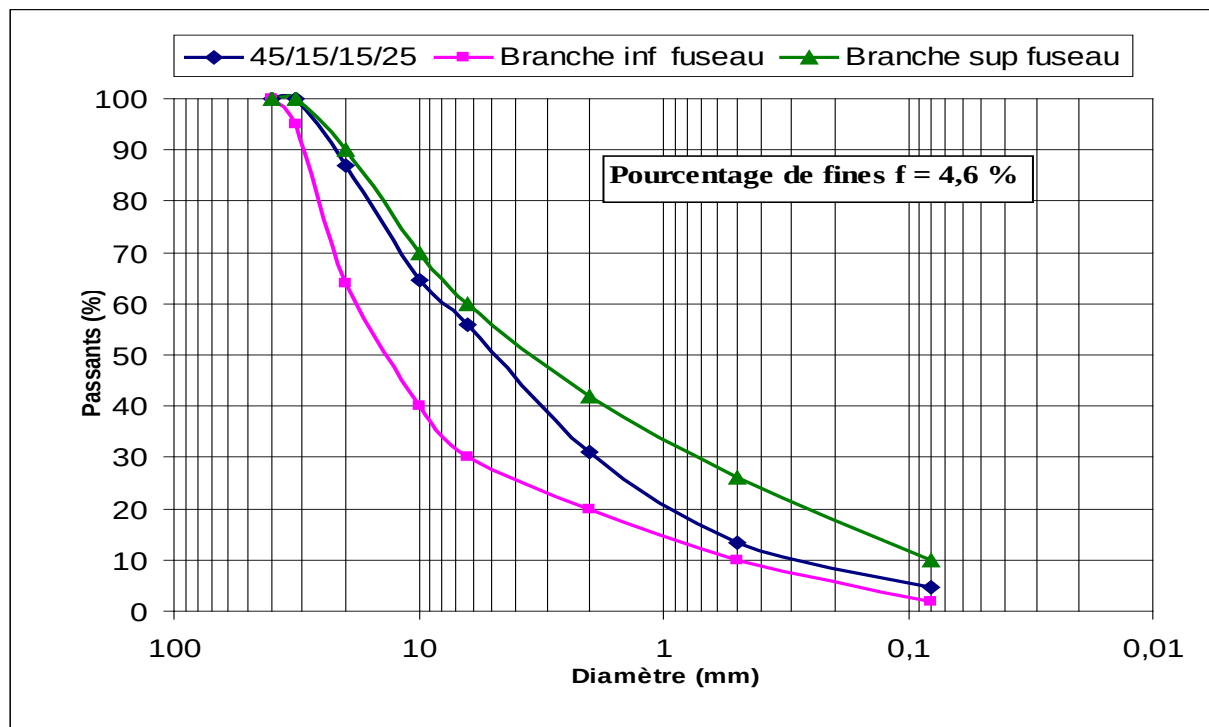


Fig. 21. - Courbe granulométrique de la fraction 0/31,5 du Basalte dans le fuseau 0/31,5 Concassés 0/d du CEBTP (1984).

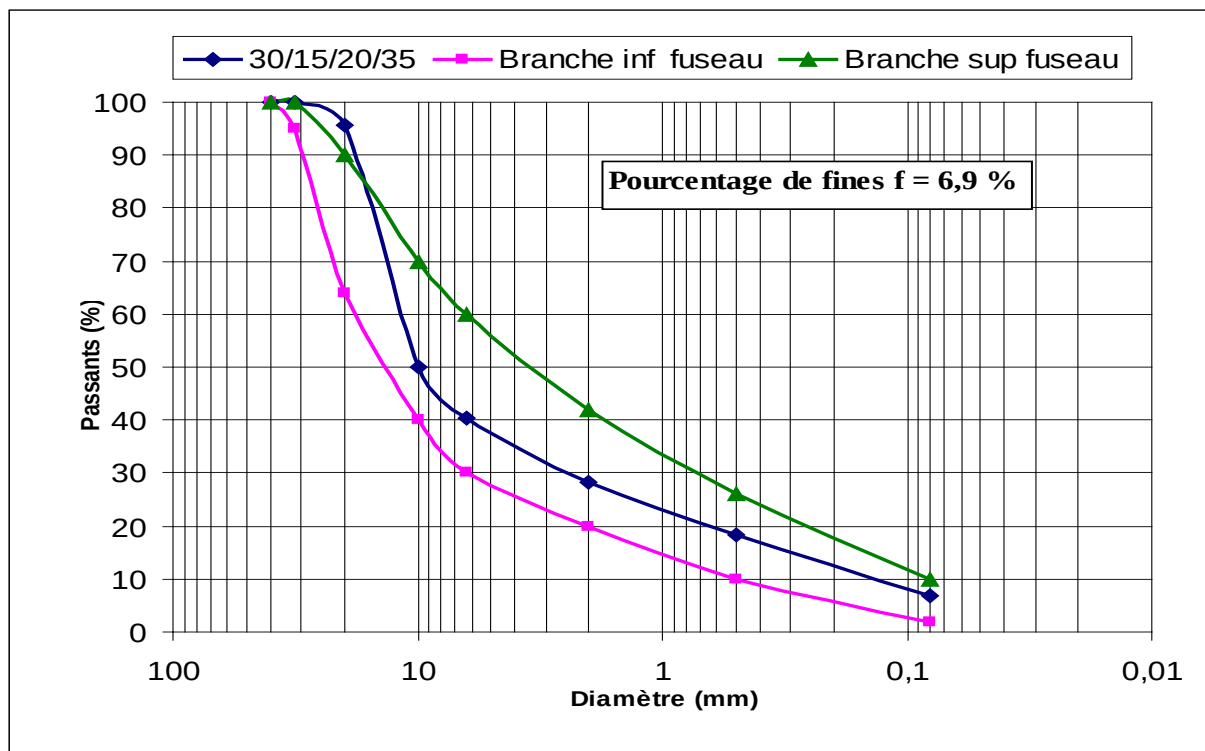


Fig. 22. - Courbe granulométrique de la fraction 0/31,5 du Calcaire dans le fuseau 0/31,5 Concassés 0/d du CEBTP (1984).

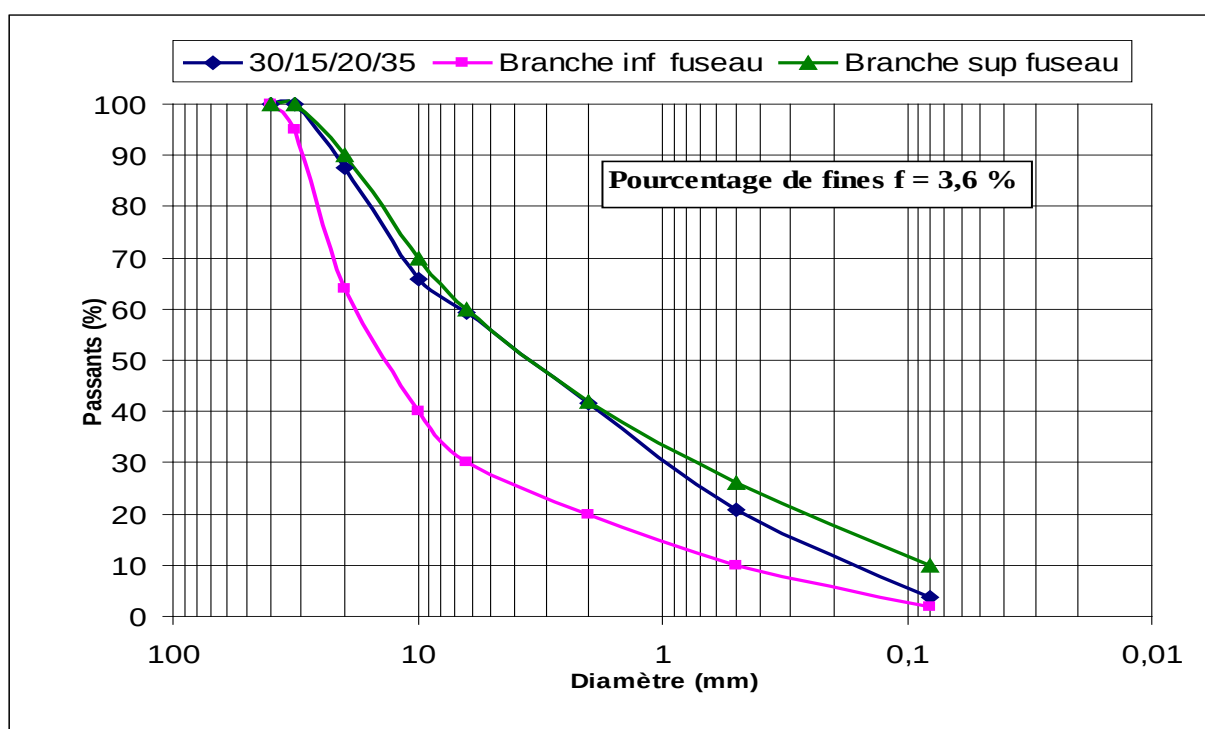


Fig. 23. - Courbe granulométrique de la fraction 0/31,5 du Silexite dans le fuseau 0/31,5 Concassés 0/d du CEBTP (1984).

Les différentes courbes granulométriques indiquent une granularité continue et étalée. Seul le calcaire n'entre pas dans le fuseau de spécification du CEBTP ; cela est dû à un pourcentage de refus faible au niveau du tamis de maille 20 mm. En effet c'est la forme de la courbe qui est plus importante. Elle conditionne l'aptitude au compactage, l'absence de ségrégation et la compacité du matériau. Plus les contacts entre les grains sont nombreux, plus la couche sera stable, plus le matériau sera compact, moins on risquera de voir se produire des déplacements des grains et par suite des tassements. A cet égard, ce sont donc les courbes continues et bien graduées qui sont les plus satisfaisantes.

Le pourcentage de fines est satisfaisant. Si ce pourcentage est nul ou insuffisant pour combler les vides entre les gros grains, le matériau est peu compact. S'il est excessif il y a formation de boue au compactage et donc une augmentation ultérieure des déformations permanentes. Cependant pour le calcaire le malaxage et le compactage produisent des fines qui peuvent passer d'un pourcentage de 7 à 17,31 %. C'est pourquoi la fourchette de 4 à 10 % de fines proposée par le CEBTP semble ne pas être adaptée à toutes les catégories de granulats calcaires. Si le pourcentage de fines après compactage risque de dépasser un certain seuil, il faudrait diminuer cette fourchette. La nature minéralogique de ces fines joue un rôle important.

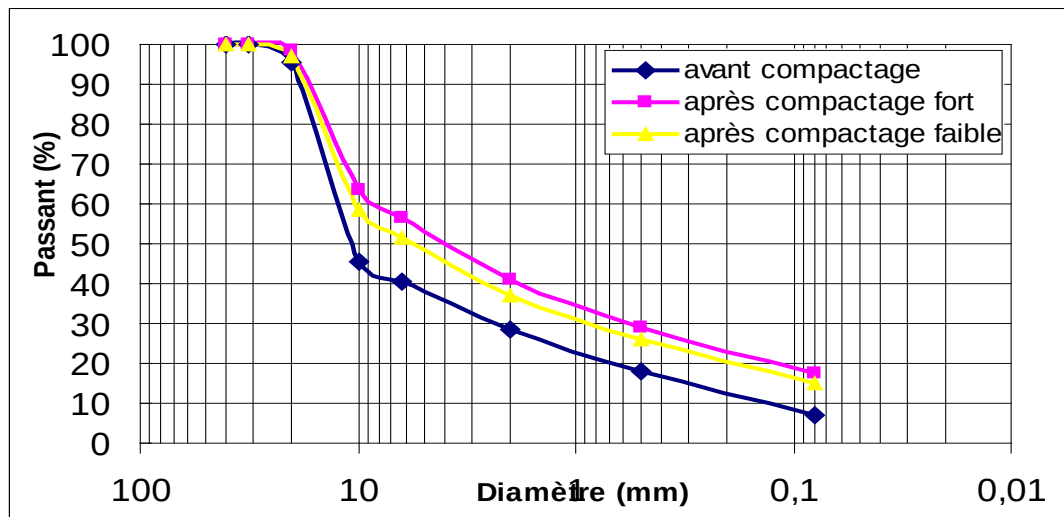


Fig. 24. - Granulométrie après compactage du Calcaire.

1.2. - Le coefficient d'aplatissement

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques :

- La longueur L, distance minimale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat,
- L'épaisseur E, distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat ;
- La grosseur G, dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat.

Le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des

éléments qui vérifient la relation : $\frac{G}{E} > 1,58$

On fait un tamisage classique sur une colonne de tamis normalisés à mailles carrées afin de séparer les granulats en une succession de classes granulaires d/D dont les dimensions sont telles que $D = 1,25d$. Les différentes classes granulaires d/D ainsi isolées sont tamisées une à

une sur une grille à fentes parallèles d'écartement $E = d/1,58$ (ce qui correspond aussi à $E=D/2$).

L'échantillon est tamisé sur un tamis de 4 mm d'ouverture et le refus de masse M_0 est utilisé pour la détermination de A.

Pour une classe granulaire d/D donnée, on peut définir un coefficient d'aplatissement partiel.

$$A_i = 100M_{ei}/M_{gi}$$

Avec M_{gi} = masse de la classe granulaire d/D,

M_{ei} = masse passant à travers le tamis à fentes d'écartement E correspondant.

Le coefficient d'aplatissement global A s'exprime en intégrant les valeurs partielles déterminées sur chaque classe granulaire :

$$A = \sum M_{ei} / \sum M_{gi}$$

Type de granulat	Basalte	Calcaire	Silexite
Coefficient d'aplatissement (%)	14,93	6,1	24,93

Tableau 4. - Coefficient d'aplatissement des différents types de granulats

La forme des granulats calcaires est meilleure que celle des granulats de Basalte et de Silexite. Ceci indique une difficulté relative au concassage des Basaltes et des Silexites due à leur aspect trop massif. Toujours est-il que les granulats de Silexite ont une forme plus plate que celle des granulats de basalte.

Des matériaux très anguleux ne se mettent pas toujours facilement en place et la compacité après compactage peut ne pas être élevée. C'est ainsi que les graves concassées, qui comportent une fraction importante de sable rond, sont plus maniables et plus aisément compactables. Cependant la forme des granulats a également une forte influence sur la résistance aux déformations permanentes. En effet les matériaux alluvionnaires roulés résistent mal à l'orniérage. Une étude au triaxial, sur l'influence de la forme des granulats (roulés ou concassés) sur le comportement des Graves Non Traitées a montré que les matériaux concassés ont la meilleure résistance aux déformations permanentes.

1.3. - L'Equivalent de Sable

L'Equivalent de sables est un rapport conventionnel volumétrique entre les grains fins et les autres. Il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique.

Cet essai s'applique assez bien aux sols faiblement plastiques et peut s'appliquer à tous les matériaux grenus.

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- hauteur H1 : sable propre + éléments fins,
- hauteur H2 : sable propre seulement.

Il existe deux types de mesures en fonction du degré d'argilosité du matériau. En effet pour les sols par exemple, la mesure de la hauteur H2 peut être délicate, on substitue à l'essai visuel, l'essai au piston.

Type de granulat	Basalte	Calcaire	Silexite
Equivalent de Sable (%)	50,82	45,22	52

Tableau 5. - Equivalent de sable des différents types de granulats

L'Equivalent de sable élevé satisfaisant à tous les niveaux de trafic. Il indique le degré de pollution des éléments sableux des granulats. Plus l'Equivalent de sable est élevé, moins le matériau contient d'éléments fins nuisibles. A cet égard *les calcaires sont moins propres que les Basaltes et les Silexites. Cependant la gangue phosphatée des Silexites doit être éliminée. Cet essai rend compte globalement de la quantité des éléments les plus fins mais est moins fiable en ce qui concerne l'aspect qualitatif c'est-à-dire donne peu d'informations sur la nature de ces fines.* C'est pourquoi il faut savoir si ces particules fines sont « inertes » c'est-à-dire sont un simple filler minéral provenant du broyage de la roche par concassage comme les fines siliceuses ou calcaires, ou s'il s'agit de particules « actives » c'est-à-dire des particules argileuses qui vont se gonfler en présence d'eau faisant chuter le frottement interne jusqu'à l'annuler presque totalement entraînant l'orniérage de la couche incriminée.

2. - Les essais caractéristiques des propriétés intrinsèques

2.1. - Masses volumiques

2.1.1. - Définitions

o La masse volumique absolue

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse de l'unité de volume de ce matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains.

La densité absolue est le rapport de la masse absolue d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse du même volume d'eau distillée à la même température.

o La masse volumique réelle

La masse volumique réelle d'un matériau est la masse de l'unité de volume de ce matériau déduction faite des vides entre particules. La déduction ne concerne pas les vides compris dans le matériau mais seulement ceux entre les particules.

La densité réelle est le rapport de la masse réelle d'une unité de volume du matériau sec dans l'air à température donnée à la masse d'un égal volume d'eau distillée à la même température.

o La masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique de l'unité de volume du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.

Type de granulat	Basalte	Calcaire	Silexite
Poids spécifique (kN/m ³)	27,25	24,44	24

Tableau 6. - Poids spécifique des différents types de granulats

2.2. - Résistance à l'usure et aux chocs

2.2.1. - Essai Los Angeles

Cet essai permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par choc et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau à une série de chocs et de frottements dans la machine Los Angeles. A un coefficient Los Angeles faible correspond un excellent matériau. Dans la machine Los Angeles, introduire la prise d'essai $M = 5000$ g et la charge de boulets de la classe granulaire choisie. Après 500 rotations de la machine, à une vitesse régulière comprise entre 30 et 33 tr/min, recueillir le granulat et le tamiser à 1,6 mm, peser le refus m .

Par définition le coefficient Los Angeles est le rapport : $LA = \frac{m}{M} \times 100$

2.2.2. - Essai Micro-Deval

L'essai permet de mesurer la résistance à l'usure par frottements entre les granulats et une charge abrasive. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite dans un broyeur, dans des conditions bien définies, à sec ou en présence d'eau. Plus le coefficient Micro-Deval est élevé, meilleur est le matériau.

Dans les cylindres de la machine, introduire chaque prise d'essai $M = 500$ g et la charge abrasive (billes en acier de 10 mm de diamètre) correspondant à la classe granulaire choisie.

Les essais peuvent s'effectuer à sec ou en présence d'eau. Dans ce dernier cas, on ajoutera 2,5 litres d'eau par essai. Après rotation des cylindres à une vitesse de 100 tr/min pendant 2 heures, tamiser le matériau sur le tamis de 1,6 mm et peser le refus m .

Par définition le coefficient Micro-Deval est le rapport : $M_D = \frac{m}{M} \times 100$

Type de granulat	Basalte	Calcaire	Silexite
Los Angeles (%)	12,54	32,65	21
Micro-Deval (%)	16	54,7	17

Tableau 7. - Los Angeles et Micro-Deval des différents types de granulats

Les coefficients Los Angeles et Micro-Deval du Basalte et du Silexite sont conformes aux spécifications. Les granulats de basalte et de Silexite montrent une grande résistance à l'usure et à la fragmentation. Cependant le Silexite est moins résistant que le Basalte. Les Calcaires ont une faible résistance à l'usure et au frottement.

3. - Essai Proctor - Essai CBR

3.1. - L'essai Proctor modifié

Cet essai simule l'évolution du sol au cours du compactage et permet de déterminer pour une énergie de compactage donnée, la teneur en eau optimale pour obtenir la densité sèche maximale.

L'essai consiste à compacter l'échantillon dans un moule standard, à l'aide d'une dame normalisée, à raison de 55 coups par couche (5 couches). Le compactage s'effectue avec des teneurs en eau croissantes rapportées au poids du matériau sec. Après chaque opération on mesure la densité humide (γ_h) du matériau et la teneur en eau (w) puis on calcule la densité sèche (γ_d).

On trace ensuite la courbe Proctor du matériau avec en abscisse les teneurs en eau et en ordonnée les densités sèches. On détermine ensuite la teneur en eau optimale qui correspond à la densité sèche maximale.

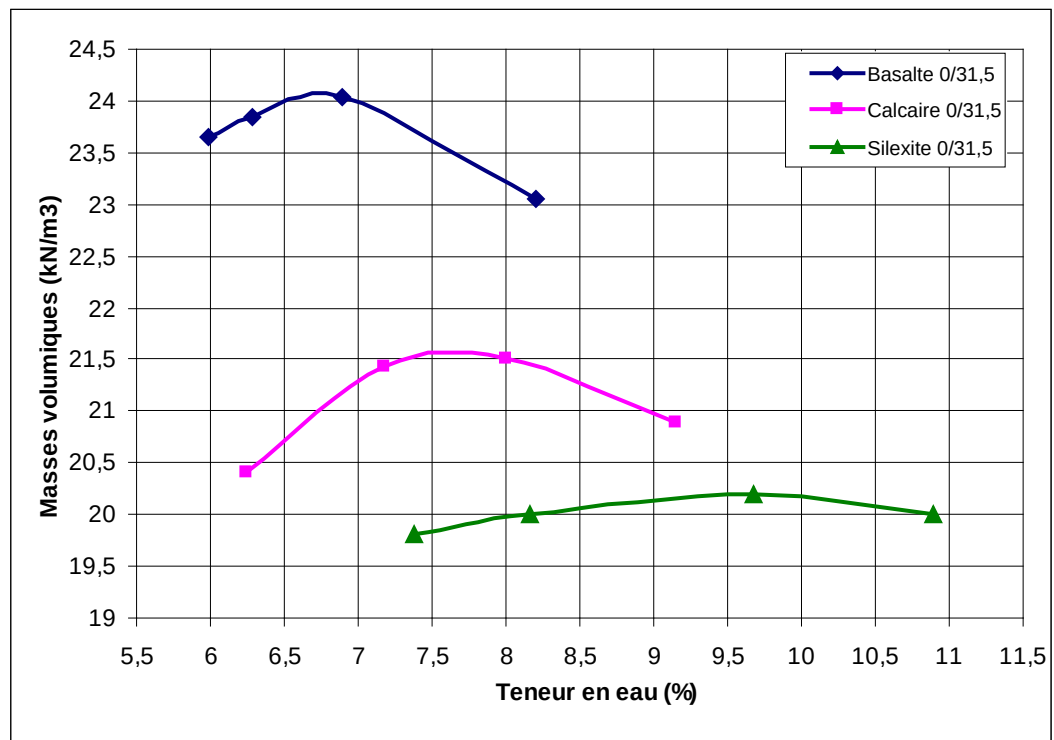


Fig. 25. - Courbes Proctor des différents types de granulat.

	Basalte	Calcaire	Silexite
$\gamma_{d \max}$ (kN/m³)	24,04	21,6	20,21
W_{opt} (%)	6,8	7,65	9,5
γ_s (kN/m³)	27,25	24,44	24
Porosité n (%)	11,84	12	15,64

Tableau 8. - Caractéristiques physiques des différents types de granulats

3.2.- L'essai CBR

Il sert à caractériser la portance du matériau c'est à dire la charge qu'il peut supporter sans se rompre, mais également à mesurer l'aptitude d'une chaussée à une perméabilité amenée par une forte immersion en cas de fortes pluies. Le CBR est un nombre sans dimension exprimant en pourcentage le rapport entre les pressions produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le matériau étudié d'une part et dans un matériau de référence (13,6 kN) d'autre part.

Par définition cet indice est pris égal à la plus grande des deux valeurs suivantes :

- $ICBR_{2,5} = 100F_{2,5}/13,6$
- $ICBR_5 = 100F_5/20,5$
- $ICBR = \max(ICBR_{2,5}; ICBR_5)$

$F_{2,5}$ = Force à 2,5 mm d'enfoncement,

F_5 = Force à 5 mm d'enfoncement.

Le matériau est compacté à la teneur en eau optimale suivant les procédures de l'essai Proctor modifié : 3 moules CBR qui seront compactés respectivement à raison de 55, 25, et 10 coups par couche (5 couches par moule). Après immersion des moules pendant 4 jours, on détermine son poids et sa densité humide. On poinçonne ensuite le moule avec un piston de 4,9cm de diamètre à une vitesse de 1,27mm/min. On trace la courbe indices CBR/Compacités. Le CBR à 95% de l'OPM se mesure à un enfoncement de 2,5mm ou 5mm sur la courbe de 25 coups (c'est-à-dire à une compacité de 95%).

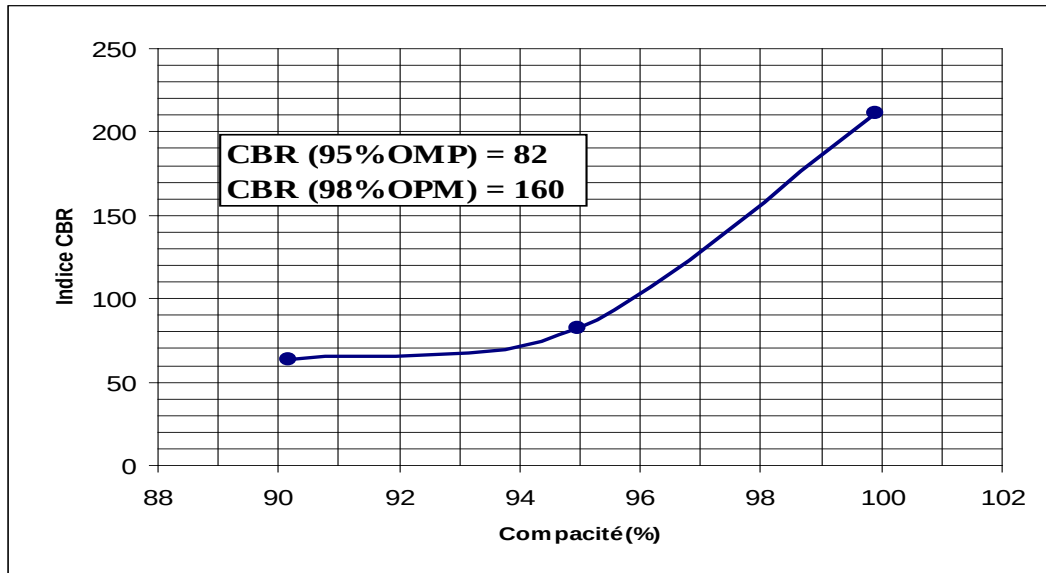


Fig. 26. - Etude CBR après 96 heures d'imbibition du Basalte 0/31,5

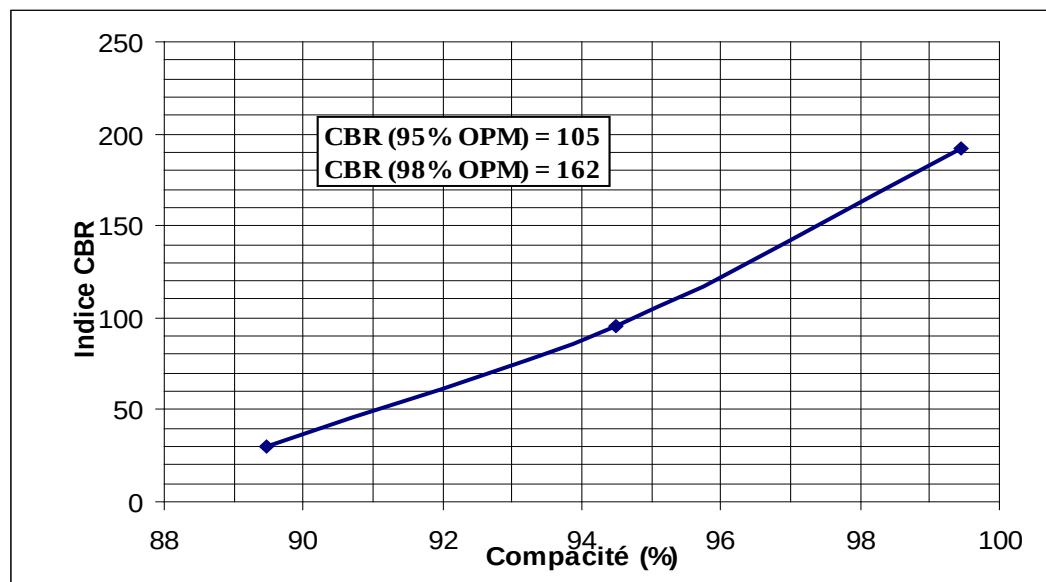


Fig. 27. - Etude CBR après 96 heures d'imbibition du Silexite 0/31,5

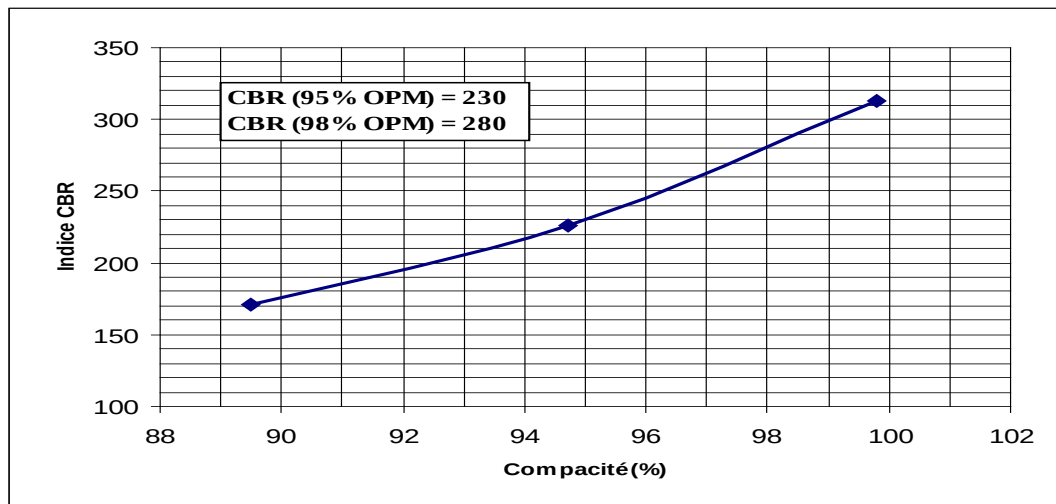


Fig. 28. - Etude CBR après poinçonnement immédiat du Calcaire 0/31,5

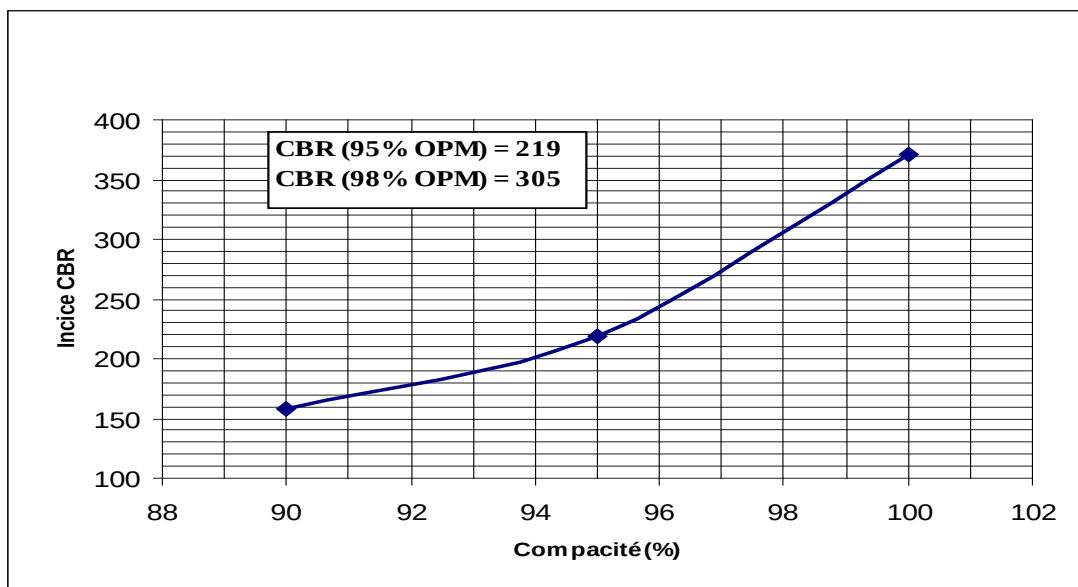


Fig. 29. - Etude CBR après 96 heures d'imbibition du Calcaire 0/31,5

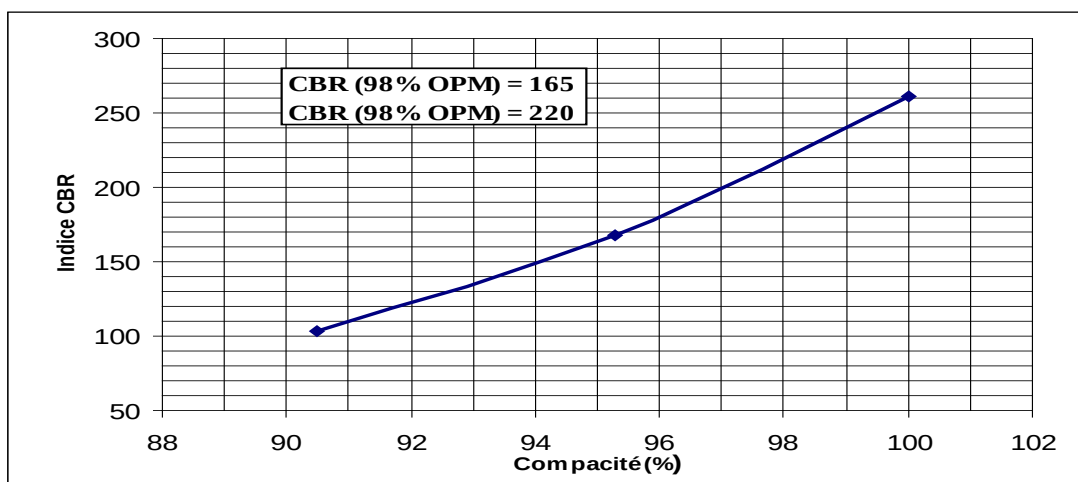


Fig. 30. - Etude CBR après 8 jours d'imbibition du Calcaire 0/31,5

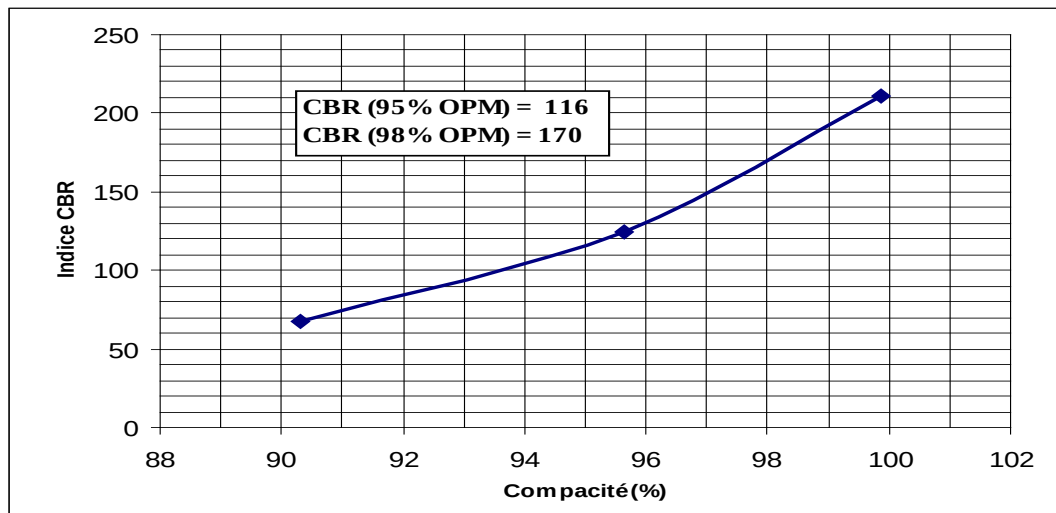


Fig. 30. - Etude CBR après 16 jours d'imbibition du Calcaire 0/31,5

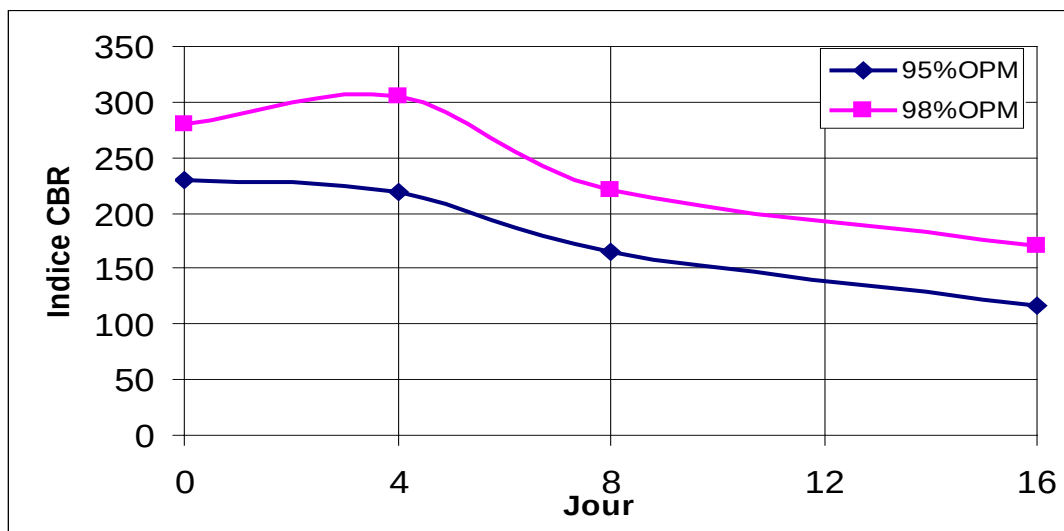


Fig. 31. - Evolution du CBR du Calcaire en fonction de la durée d'imbibition

L'Indice Portant CBR à 95%OPM du Calcaire (219) est largement supérieur à celui du Silexite (105) et du Basalte (82). En se basant sur cet essai on a tendance à penser, à tort, que le Calcaire a les meilleures performances mécaniques que le Basalte. Ceci est dû au fait que malgré la dureté du squelette, le Basalte est un matériau sans cohésion, tirant sa stabilité du seul frottement interne, donc sujet à l'attrition. Cependant le CBR à 98% de l'OPM peut atteindre 160 chez le Basalte, 162 chez le Silexite, et plus de 300 chez le Calcaire, ce qui démontre clairement les exigences de compacité des matériaux non liés. On doit avoir au moins 98% de compacité in situ.

Cependant il a été observé à 98% de compacité que l'Indice Portant CBR du Calcaire après 96h d'immersion (305) est supérieur à l'Indice Portant après poinçonnement immédiat (280). Ce comportement peut laisser penser que la présence d'eau a contribué à l'hydratation de la chaux entraînant une cimentation plus forte. C'est pourquoi il a été effectué des essais sur des échantillons immergés pour des durées de 8 à 16 jours pour mieux comprendre l'effet de l'eau. Le constat est que l'accroissement de la portance n'est pas un phénomène continu. Au-delà de 96 heures d'imbibition, la portance du matériau diminue.