

INTRODUCTION

La géotechnique routière est définie comme étant une science qui étudie d'une part les sols sur lesquels reposent les chaussées et d'autre part les matériaux qui constituent les différentes couches de ces chaussées, sans autant oublier la fiabilité des ouvrages construits. Elle représente 95% de la réussite d'un projet de Génie-civil.

Les principaux problèmes auxquels s'intéresse la géotechnique routière sont les suivants :

Problèmes de terrassement

- Réutilisation des déblais en remblai
- Distinction entre sols meubles et sols rocheux
- Stabilisation des remblais sur zones compressibles
- Pente des talus de déblais et de remblais
- Localisation des nappes et venues d'eau
- Mise en œuvre des remblais
- Erosion des talus
- Emprunts sélectionnés pour remblai
- Nature et portance des sols de la plate-forme

Problèmes de chaussées

- Localisation des emprunts et de carrières
- Nature des matériaux utilisables en corps de chaussée
- Techniques de stabilisation
- Dimensionnement du corps de chaussée (Epaisseur)
- Constitution des couches de la chaussée
- Mise en œuvre des couches du corps de la chaussée

Problèmes d'ouvrages d'art

- Stabilité des buses et dalots
- Recherche des matériaux pour blocs techniques
- Fondation de ponts

Type de fondation
Niveau de fondation
Taux de travail
Tassement
Affouillement

- Matériaux pour bétons hydrauliques

Pour atteindre cet objectif, les essais géotechniques sont un début de solution à la qualité des problèmes énumérés ci-dessus.

Vous trouverez dans cet ouvrage un certain nombre de modes opératoires des essais géotechniques les plus courants. Pour des essais demandant un appareillage sophistiqué et coûteux, les entrepreneurs pourront les sous-traiter auprès des laboratoires de référence.

Rappels des principales notations et définitions

γ_s	Poids spécifique des grains solides = $\frac{W_s}{V_s}$
γ_h	Poids spécifique du sol humide (densité humide) = $\frac{W}{V}$
γ_d	Poids spécifique du sol sec (densité sèche) = $\frac{W_s}{V}$
γ_w	Poids spécifique de l'eau
w	Teneur en eau = $\frac{V_w}{W_s} \times 100$
Wnat	Teneur en eau naturelle des sols en place
Sr	Degré de saturation
Wl	Limite de liquidité
Wp	Limite de plasticité
Ip	Indice de plasticité = Wl – Wp
Ic	Indice de consistance = $\frac{W_l - W_{nat}}{I_p}$
Ci	Coefficient d'uniformité = $\frac{D_{60}}{D_{10}}$ où D60 et D10 représentent les dimensions (mailles carrés) des éléments à 60% et 10% de tamisat
Cc	Coefficient de coulure = $\frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$
V	Volume total du sol (solide + liquide + air)
Va	Volume des vides remplis d'air
Vs	Volume de solides
Vw	Volume des vides remplis d'eau
Vv	Volume des vides (air + eau)
e	Indice des vides = $\frac{V_v}{V_s}$
n	Porosité = $\frac{V_v}{V}$
Es	Equivalent de sable : Esv (à vue) Esp (à piston)
ΔH	L'affaissement
Fn	Finesse de mouture
A	Coefficient d'aplatissement
MDE	Micro Deval
E	Etalement
Mf	Module de finesse
CPA	Coefficient de Polissage Accéléré
C	Compacité
f	Fines

LES ESSAIS GEOTECHNIQUES

A- LES SOLS

1- Essais d'identification et de classification

- Analyse granulométrique
- Poids spécifique
- Teneur en eau
- Limites d'Atterberg
- Sédimentométrie
- Essai au bleu de méthylène
- Équivalent de sable
- Dosage du sol au Ca CO₃
- Mise en évidence de matières organiques

2- Essais mécaniques

- Proctor
- Essai de portance CBR
- Essai de dométrie
- Essai de perméabilité

3- Essais in situ

- Essai au pénétromètre dynamique
- Essai au pénétromètre statistique
- Essai de densité in situ
- Essai au carottier
- Essai de plaque
- Tassomètre
- Inclinomètre

B- LES GRANULATS

- Analyse granulométrique
- Mesures des masses volumiques, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux.
- Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables
- Détermination de l'indice de continuité
- Détermination de la masse volumique absolue des fines
- Mesures du coefficient d'aplatissement
- Détermination de l'épaisseur moyenne des gravillons
- Détermination du coefficient d'écoulement des gravillons
- Détermination du coefficient d'écoulement des sables
- Détermination de l'indice des vides Rigden
- Détermination de l'homogénéité des granulats ($d \geq 4\text{mm}$)
- Essai d'usure Micro – Deval
- Essai Los – Angeles
- Essai de fragmentation dynamique
- Mesure du coefficient de polissage accéléré des gravillons
- Mesure du coefficient de friabilité des sables
- Mesure de la rugosité d'une surface à l'aide du pendule de frottement
- Mise en évidence de matières organiques par colorimétrie
- Détermination de la propreté superficielle
- Essai au bleu de méthylène
- Résistance à la désagrégation – méthode par cristallisation des sulfates
- Détermination de la propreté des sables : équivalent de sable à 10% de fines
- Equivalent de sable
- Détermination de la teneur en soufre total
- Mesure de la teneur en chlore – méthode par dissolution
- Réactivité potentielle de type alcali-silice

C- LES BETONS

- Essai d'affaissement (Slump – test)
- Essai d'étalement (Flow – test)
- Essai de dureté au choc par le scléromètre
- Essai de retrait et de gonflement
- Finesse de mouture
- Essai de fissuration.

D- LES PRODUITS NOIRS

1- Bitumes purs

- La pénétration
- Densité relative à 25°C mesurée au pycnomètre
- Perte de masse au chauffage (163°C pendant 5h à l'étuve)
- Pourcentage de pénétration restant après perte de masse au chauffage.
- Point d'éclair (vase ouvert)
- Ductilité à 25°C
- Solubilité dans le tétrachloroéthylène
- Point de ramollissement B1
- Teneur en paraffine.

2- Bitumes fluidifiés ou cut - back

- Pseudo – viscosité
- Densité relative à 25°C au pycnomètre
- Pénétration à 25°C, 100g, 5s de résidu à 360°C de la distillation
- Point d'éclair (vase clos)

3- Emulsions

- teneur en eau
- Pseudo – viscosité
- Indice de rupture
- Essai d'homogénéité
- Essai de stabilité au stockage

- Essai d'adhésivité
- Détermination de la charge des particules.

A- Autres essais sur la composition

- Essai Marshall
- Essai Duriez
- Essai Vialit
- Détermination de la teneur en bitume d'un enrobé “méthode Kumagawa”.

LES SOLS

Un sol est un complexe de trois éléments : grains solides, de l'eau, de l'air (ou du gaz).

L'ensemble des grains solides forme le squelette du sol. Lorsque l'eau remplit les vides, il n'y a pas d'air et l'on dit que le sol est saturé. Dans le cas contraire l'eau se dépose par attraction capillaire en un film plus ou moins épais autour des grains solides.

L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE

1- But de l'essai

Cet essai nous permet d'identifier des sols, les classer et même également les nommer

2- Domaine d'application

Classification des sols, étude des matériaux de construction

3- Appareillage

- balance et différents poids
- tamis en mm (20-16-12,5-10-8-6,3-5,4-3,5-1-0,2-0,08)
- vibreur de tamis

4- Durée de l'essai après le prélèvement : 03 jours

5- Mode opératoire

- On place l'échantillon à étudier à l'étuve à 105°C pendant 24h (au moins 3kg)
- Prélever 2kg de matériau
- Imbibir cette quantité dans l'eau pendant 24h
- On le repasse à l'étuve pendant 24h après avoir lavé le matériau pour éliminer les fines.
- On sort le matériau que l'on verse sur les tamis disposés comme dans l'appareillage et on secoue à la main ou au vibreur de tamis, il y aura un passage selon le diamètre des tamis.
- On enlève chaque tamis et on pèse le refus, au fur et à mesure en faisant un cumul sur le tamis suivant.

6- Calculs

On détermine :

$$(PC) : \text{passing cumulé} = \frac{\text{Re}fus}{\text{Poidstotal}} \times 100 \quad (\text{en \%})$$

$$\text{et le passant} = 100 - (PC) \quad (\text{en \%})$$

Et sur un papier semi-log on place en abscisse les dimensions des tamis et en ordonnée le % des passants et on trace la courbe.

$d_{60} / d_{10} > 2 \Rightarrow$ granulométrie étalée suivant les critères de.... ?

POIDS SPECIFIQUE

1- But de l'essai

La détermination du poids spécifique des grains solides consiste à mesurer le volume propre des grains à l'exclusion des vides à calculer le rapport entre leurs points et leur volume.

2- Domaine d'application

Il est réservé aux sols dont les plus gros grains sont au maximum de la dimension de sable fin et présentant une cohésion déjà importante.

3- Appareillage

- Une balance hydrostatique équipée d'un panier de pesée immergée
 - * Sol fin portée 200 g à 0,01g près
 - * Sol moyen portée 1000g à 0,1g près
 - * Sol graveleux portée 5000kg à 1g près
- Un récipient de préférence de capacité adaptée à la portée de la balance
 - * 2l pour les sols fins
 - * 15l pour les sols moyens
 - * 25l pour les sols graveleux.
- Un bain marie, pour la préparation de la paraffine de préférence électrique régulée à $80\% \pm 5^\circ$ (pour éviter la surchauffe de la paraffine)
- De la paraffine, des pinceaux, du petit matériel courant de laboratoire
- Une étuve réglable à 105°C (ou 60°C pour sols, gypseux ou organiques)

N.B : Le récipient d'eau étant rempli aux trois quarts environ, le placer sous le plateau de balance destiné à la pesée immergée. Le remplir d'eau, immerger le panier et le suspendre au plateau de balance. Vérifier que le panier ne touche ni le fond, ni les parois latérales du récipient, faire la tare du panier immergé T.

4- Durée de l'essai

5- Mode opératoire

- On prélevera par taille un échantillon de poids minimum suivant
 - * sols fins 100g
 - * sols moyens 1000g
 - * sols graveleux 2500g
- Lors de la taille on évitera dans la mesure du possible de laisser des angles saillants ; les coupes devront être nettes et franches, les parties susceptibles de se détacher en cours de manipulation seront éliminées.
- Immédiatement après la taille l'échantillon sera pesé sur la balance appropriée et le poids noté P_1 .
- L'échantillon est ensuite enduit de paraffine préalablement fondu au bain-marie ; l'échantillon est plongé dans la paraffine liquide en l'agitant pour décrocher les bulles d'air qui pourraient y adhérer. Cette opération doit être exécuté assez rapidement pour éviter la pénétration de la paraffine dans l'échantillon surtout si celui-ci est "ouvert". Après solidification de la paraffine, on vérifie que des bulles d'air ne soient pas restées incluses. Dans ce cas, elles sont crevées et les trous ainsi créés dans la pellicule de paraffine, rebouchés à l'aide d'un pinceau. Ensuite, une deuxième couche de paraffine est déposée par un nouveau trempage.
- L'échantillon paraffiné est pesé, soit P_2 son poids.
- Procéder ensuite à la pesée déjaugée, l'échantillon étant pesé dans le panier et totalement immergé.
- Noter la température de l'eau du bain
- Après avoir déparaffiné l'échantillon procéder à la mesure de sa teneur en eau par séchage à l'étuve.

6- Calculs

Calcul du poids spécifique (ou masse volumique) apparent humide

Nous avons les données suivantes :

γ_p : Densité de la paraffine (en principe $0,9\text{g/cm}^3$)

P_1 : Poids humide de l'échantillon

P_2 : Poids échantillon paraffiné

P_3 : Pesé immergé

γ_w : Densité de l'eau à la température de l'essai

Le volume (V_e) de l'échantillon sera :

$$V_e = \frac{(P_2 - P_3)}{\gamma_w} - \frac{(P_2 - P_1)}{\gamma_p}$$

Le poids spécifique du sol sera (humide)

$$\gamma_h = \frac{P_1}{V_e}$$

La masse volumique apparente s'exprime par le même calcul seules les unités changent
poids forces pour le poids spécifique et masse volumique

Calcul du poids spécifique apparente sec (γ_d)

Il est donné par la formule

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + \frac{w\%}{100}}$$

Dans laquelle W% est la teneur en eau de l'échantillon

LA TENEUR EN EAU

But de l'essai

Détermination de la quantité d'eau contenue dans un sol.

Domaine d'application

Travaux de terrassement de compactage

Appareillage

- Etuve sèche
- Des récipients
- Balances
 - * balance sensible à 0,01g près pour les sols fins
 - * balance sensible à 0,1g près pour les sols sableux
 - * balance sensible au gramme près pour les sols grossiers

Durée de l'essai 15 à 16 heures.

Mode opératoire

N.B : l'essai doit se faire sur deux prises pour en fin prendre la moyenne.

- Prendre un récipient propre, sec et taré, y placer un échantillon de sol humide d'un poids minimum de :
 - 30g pour les sols fins
 - 300g pour les sols moyens
 - 3000g pour les sols grossiers
- On les place à l'étuve après 15 heures on prend le poids. En principe entre les deux pesées, de la différence est inférieure à 0,1%

Calculs

Soit M le poids humide de l'échantillon et m le poids sec de l'échantillon

La teneur en eau

$$W = \frac{m}{M} \times 100 \quad (\text{en \%})$$

LES ESSAIS PROCTOR

1- But de l'essai

C'est l'un des essais les plus utilisés en géotechnique routière. Il a pour but de déterminer au laboratoire les conditions de compactage d'un sol donné en fonction de la teneur en eau et l'énergie de compactage. A une énergie de compactage donnée, il s'agit de déterminer la teneur en eau optimale (W_{opt}) et la densité maximale (γ_d max) Proctor correspondantes.

2- Domaine d'application

Contrôle de la mise en œuvre des matériaux de remblai

3- Appareillage

- Quelques bacs de contenance 25kg environ
- 02 tamis de 20mm et 5mm respectivement
- pelle à main, truelles, meurs métalliques, spatules, balayettes, pinceaux
- quelques bacs de contenance 10kg et 5kg environ pour la préparation du matériau à compacter.
- Eprouvettes graduées de 250cm³ et 500cm³ environ pour la mesure de la qualité d'eau d'humidification
- Des cristalliers (10 à 12) de contenance 500cm³ environ pour les prises de teneur en eau
- Une balance de portée maximale au moins égale à 30kg précise à 5g
- Une balance de précision d'une portée maximale de 300g au moins (précision de 0,1g)
- Une étuve ventilée réglable
- Une burette à huile pour le graissage des parois du moule
- Un malaxeur automatique (si possible)
- 02 disques de papier filtre correspondant aux côtés des deux types de moules
- couteau, maillet, burin, marteau

4- Durée de l'essai : 04 jours

Mode opératoire

N.B : L'essai s'effectue sur un matériau ne contenant que des éléments inférieurs à 20mm

Il existe deux sortes d'essais Proctor :

Proctor modifié pour les sols fins

Proctor normal pour les sols fins uniquement

Essais Géotechnique

Caractéristiques essentielles pour les deux types de compactage :

Granulométrie du sol	Moule à employer	Dimensions du moule	Nbre de coupe/couche
Sol passant au tamis de 5mm	Moule Proctor	$h = 11,5\text{cm}$ $\varnothing = 10,2\text{cm}$	25
Sol passant au tamis de 20mm	Moule CBR	$h = 11,5\text{cm}$ $\varnothing = 15\text{cm}$	55

Essai Proctor normal	Essai Proctor modifié
Poids de la dame 2,490kg	Poids de la dame 4,538kg
Hauteur de la chute 305mm	Hauteur de la chute 457mm
Nombre de couches 3	Nombre de couches 5
Pour les remblais	Finir avec ce Proctor pour les 50 dernier cm

L'échantillon nécessaire est ensuite prélevé par quartage ou de la préférence au moyen d'un échantillonneur.

Deux cas peuvent se présenter :

- On utilise le moule CBR : on prendra une quantité du matériau correspondant largement au remplissage de 6 moules : prévoir 40kg de matériau.
- On utilise le moule Proctor : on prendra une quantité de matériau correspondant

LES LIMITES DALLERBERG

1- But de l'essai

Identification et classification des sols

2- Domaine d'application

Travaux de terrassement – de compactage

3- Appareillage

- Appareil de casagrande
- Balance de 5kg (précision 1g)
- Etuve ventilé
- Planche à roulets
- Capsules en verre
- Spatules
- Mortier et pilon en porcelaine

4- Durée de l'essai : 03 jours

5- Mode opératoire

N.B : Cet essai est réalisé sur la partie granulométrique appelée mortier inférieur à 0,4mm

- On malaxe rigoureusement la totalité de l'échantillon afin de bien homogénéiser
- On remplit la coupelle au tiers
- On trace le milieu de l'échantillon à l'aide d'un outil à rainurer et l'essai comme immédiatement
- La coupelle fixée à l'appareil est soumise à une série de chocs réguliers jusqu'à ce que les deux lèvres se ferment (le nombre de coups de fermeture doit être compris entre 15 et 35)
- Pour confirmer le nombre de chocs, il faut recommencer immédiatement l'essai, si les deux essais successifs ne diffèrent pas plus d'un choc, on prélève à l'aide d'une spatule deux échantillon de chaque côté des lèvres et on détermine la teneur en eau.

6- Calculs

W_L : la limite de liquidité est la teneur en eau correspondant à la fermeture à 25 coups.

Détermination de la limite de plasticité W_p

Pour déterminer W_p , on prend une partie du mélange et on essaye de faire des petits rouleaux sur une plaquette jusqu'à obtenir un diamètre de 3mm .

Essais Géotechnique

Après on soulève le rouleau à 1 ou 2cm au dessus du plancher, quand il se fissure et rompt. On prélève sur chaque morceau des échantillons pour déterminer la teneur en eau qui sera la valeur de W_p

Et il en vient l'indice de plasticité

$$IP = W_L - W_P$$

Classification grossière de casagrande

Sable		
?		
Argile		

Largement au remplissage de 6 moules : prévoir 20kg de matériau

- On sèche le matériau à l'air libre ou à l'étuve à 60°C maximum
- Le matériau est ensuite pulvérisé. Cette opération se fait en écrasant les mottes terreuses à l'aide d'un petit maillet ou d'un rouleau avec précaution de façon à ne pas briser les graviers.
- On malaxe soigneusement le matériau pour l'homogénéiser, ce malaxage est effectué à la main dans un bac en veillant à ne pas perdre de fines, ou dans un malaxeur automatique.
- Pour le moule proctor (on prépare 6 échantillons de 2,5kg) et si on utilise moule CBR (on prépare 6 échantillons de 5,5kg)
- Peser l'ensemble à 5g près
- Démouler l'éprouvette, la casser, l'homogénéiser sommairement et prélever rapidement 2 échantillons pour la teneur en eau (En principe 2x150g pour les sols fins et au moins 2x500g pour les sols graveleux)
- Peser rapidement ces échantillons placés dans les cristallisoirs tarés (à 0,1g près)
- Placer ces échantillons à 105°C à l'étuve jusqu'à dessiccation totale
- On fera la même chose pour chaque point en augmentant la teneur en eau de 2% à 2% (le proctor se réalisera sur 5 points)

On constatera que lors de la détermination du 5^e point l'augmentation du poids du sol humide est bien inférieure à la différence de quantité d'eau ajoutée pour les deux derniers compactages.

7- Calculs

* Calcul de la teneur en eau W% : On calcule le poids du sol ainsi que le poids d'eau qu'il contient

$$W\% = \frac{\text{Poids eau}}{\text{Poids, sol sec}} \times 100$$

Les teneurs en eau seront arrondies à la première décimale. On prend en fin la teneur en eau moyenne de l'éprouvette compactée. La moyenne des teneurs en eau des deux prises d'essais prélevés.

* Calcul de la densité humide γ_h : connaissant le poids humide de l'échantillon compacté, la densité humide sera.

$$\gamma_h = \frac{\text{Poids du sol humide compacté}}{\text{Volume du moule}} \times 100 \quad (\text{en T/m}^3)$$

Connaissant W et γ_h on en déduit aisément la densité sèche

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{100 + W} \quad (\text{en T/m}^3)$$

N.B : Les résultats de γ_h et γ_d s'exprimeront en T / m³ et sont arrondies à la deuxième décimale.

Sur un graphique millimétré sont figurés les points représentatifs.

- En abscisse la teneur en eau W
- En ordonnée la densité sèche γ_d

On trace ensuite la courbe la plus probable qui passe par ces points expérimentaux. La teneur en eau optimale et la densité sèche maximale sont respectivement l'abscisse et l'ordonnée du point à la tangente horizontale.

ESSAI CBR

1 But de l'essai

Détermination de la portance du sol donné, il s'agit en fait de comparer la portance du sol que l'on est entrain de tester à la portance d'un sol standard de l'état de Californie aux Etats Unis.

2- Domaine d'application

Géotechnique routière – dimensionnement de chaussées

3- Appareillage

- 3 moules standard CBR
- Disques d'espacement de 151mm de diamètre et 25,5mm d'épaisseur
- 1 dame Proctor modifié constituée par un mouton de 4,530kg et la hauteur de chute de 457mm actionnée manuellement ou mécaniquement.
- Des disques de surcharge annulaire en plomb de 2,265kg en deux parties de diamètre extérieur de 150mm de diamètre inférieur de 27mm.
- 1 appareil de mesure de gonflement comprenant un trépied pouvant s'adapter sur la face supérieure de moule comparateur à 0,01mm et de 25mm de course ; un disque plat et perforé de diamètre légèrement inférieur à celui du moule et muni en son centre une tige à touche réglable.
- 1 piston cylindrique ayant une section de 19,6cm² et approximativement 200mm de long.
- 1 presse hydraulique de 60kn pouvant assurer une vitesse de poinçonnement de 1,27 mm / minute.
- Des anneaux de 30kn et 60kn.
- Des bacs de contenance de 35kg environ
- Pelle à main, truelles, mains métalliques, pinceau
- Eprouvette graduées de 250cm³ et 500cm³ par la mesure de la quantité d'eau d'humidification.
- Les lares pour pèse de teneur en eau
- 1 balance de portée maximale de 30kg précise à 5g
- 1 balance de précision d'une portée maximale de 2kg précise à 0,01g
- 1 étuve ventilée réglable à 105°C et 60°C
- des disques de papier filtre correspondant aux côtés moule CBR
- Couteau maillet, burin, marteau, plane à araser.

- 1 chronomètre.
- 1 cadencemètre (indicateur de cadence)

Durée de l'essai : 07 jours

Mode opératoire

a) *Préparation des échantillons*

L'essai sera réalisé à la teneur en eau optimale déterminée par l'essai Proctor modifié. De ce fait il conviendra de préparer le matériau de la même manière que pour l'essai Proctor à savoir :

- Le matériau sera séché à l'air ou à l'étuve à 60°C maximum ; on se contentera d'un desséchage partiel suffisant sans être excessif.
- Suffisant pour se déplacer nettement côté sec de la courbe proctor et pour permettre lors du tamisage des éléments supérieur à 20mm une séparation de ces élément sans entraînement des particules fines.
- Sans être excessif pour ne pas éliminer l'eau absorbée qui ne serait pas un peu reconstituée lors de l'opération de mouillage.
- Après avoir éliminer par tamisage les éléments supérieurs à 20mm, le matériau sera pulvérisé ; on écrase les mottes de terre en veillant à ne pas briser les graviers.
- On devra réaliser 3 moulages à 3 énergies de compactage différentes, il faut donc prévoir au moins 3 x 5,5kg de matériau écrété à 20mm.

La connaissance de la teneur en eau du matériau en cours de préparation est nécessaire.
Ensuite par calcul on déterminera la quantité d'eau

Proctor modifié

Soit P un poids de matériau en cours de préparation à une teneur en eau W_1

Soit E la quantité d'eau à jouter au matériau pour atteindre la teneur en eau W_2 (teneur en eau optimale Proctor modifié)

$$E = \frac{P \times (100 + W_2)}{100 + W_1} - P$$

En mettant P en facteur il en vient :

$$E = P \left(\frac{100 + W_2}{100 + W_1} - 1 \right)$$

- Ce matériau sera mouillé en malaxant soigneusement pour homogénéisation, il sera ensuite conservé jusqu'au lendemain dans des sacs étanches pour assurer une bonne humidification. L'opération de compactage n'ayant lieu que le lendemain il est possible

Essais Géotechnique

de vérifier avec précision la teneur en eau. L'essai ne sera réalisé que si le matériau est effectivement à la bonne teneur en eau avec une précision de $\pm 0,2\%$

- Si le matériau est légèrement trop humide, on devra le laisser aérer en l'homogénéisant soigneusement.
- Si cette ultime correction consiste en un léger apport d'eau, avec peu d'expérience, le risque d'erreur n'étant pas grand, on pourra commencer sans retard l'essai une dernière vérification de la teneur en eau pouvant être effectuée à posteriori.
- Par contre si cette ultime correction consiste à laisser sécher le matériau, même légèrement vérifié la teneur en eau avec précision.

b) Compactage et imbibition

- On prépare d'abord le moule, il faut veiller à ce qu'il soit propre et en bon état. On pèse le tout à 5g près, puis on place le disque d'espacement.
- On introduit ensuite le matériau selon le processus de l'essai Proctor modifié en 5 couches successives d'égales épaisseurs qui seront chacune compactée avec la même dame Proctor modifié selon les énergies de compactage différentes qui sont en général 10, 25 et 55 coups par couche. Le but étant d'obtenir 3 moulages ayant compacité nettement différentes (ces compacités étant en principe et de façon très approximative respectivement de l'ordre de 90%, 95% et 100% de la densité sèche maximale du proctor modifié).
- Une fois le compactage terminé, la hausse, dernière couche doit dépasser le moule d'environ 1 cm. On arase soigneusement puis on enlève le fond que l'on veut fixer sur la face supérieure du moule après avoir placé un papier filtre à la surface de l'échantillon, on retournera le moule, on retirera le disque d'espacement puis après avoir également placé un papier filtre sur cette face, on pèse le tout à 5 g près.
- Si le sol doit être essayé sans imbibition on procède immédiatement au poinçonnement. Sinon on place le disque perforé de gonflement à la surface de l'échantillon puis on dispose une charge annulaire sur le disque. Cette charge ne doit jamais être inférieure à 4,530kg. Elle sera constituée par deux disques annulaires de 2,265kg. Le moule ainsi chargé est placé sur des cales dans un bac à saturation rempli d'eau de telle façon que l'eau arrive librement par dessous et par dessus l'échantillon
- Ensuite on place le trépied porte comparateur en s'assurant que les pieds portent bien sur les bords du moule. On fixe le comparateur au trépied. On règle la hauteur de la tige du

Essais Géotechnique

plateau de gonflement de façon que le palpeur du comparateur vienne reposer sur l'extrémité de cette tige. On note alors la lecture du comparateur (lecture initiale).

- On laisse le moule à imbibition normale pendant 04 jours dans l'eau.
- Le délai écoulé, on note le gonflement lu au comparateur et on sert la dizaine de minutes puis après avoir enlevé les surcharge et le plateau de gonflement on le porte sous la presse de poinçonnement.
- Dans le cas d'une imbibition complète on laisse le moule à imbiber dans l'eau le temps nécessaire pour qu'il n'y ait plus de gonflement du sol. Ce temps étant parfois supérieur à quatre jours, on admettra qu'il y a plus de gonflement quant deux lectures espacées de 24h montreront une variation inférieure à trois centièmes de millimètres.

c) Poinçonnement

- Le moule est placé sur le plateau de la presse et centré de telle façon que le piston de poinçonnement soit bien dans le prolongement de l'axe du moule.
- La tête du piston est amenée en contact avec la surface de l'échantillon en faisant monter le plateau de la presse. On remet alors les surcharges annulaires. La mise en place du piston de poinçonnement est achevée en manœuvrant lentement le volant de la presse jusqu'au moment où l'aiguille du comparateur de l'anneau dynamométrique commence à bouger. A ce moment le piston est bien en contact avec la surface de l'échantillon.
- On fixe alors un comparateur au 1/100 de millimètre derrière le cadran de l'indicateur, de cadence – comparateur qui coulisse le long d'une tige verticale solidaire du bâti de la presse est fixé de telle façon que la pointe du palpeur du comparateur vienne reposer sur le bord du moule. Le comparateur est amené à zéro, puis l'indicateur de la cadence mis en marche.
- L'opérateur se met alors au volant de la presse et commence le poinçonnement au moment où le rayon repère de l'indicateur de cadence viennent se superposer à l'aiguille du comparateur, il manœuvre lentement le volant de façon à maintenir en coïncidence l'aiguille du comparateur et le rayon repère. En procédant de cette façon de poinçonnement s'effectue avec la vitesse constante normalisée (soit 1,27mm / minute)
- Au cours de l'essai on note les pressions lues sur l'anneau dynamométrique qui correspondent aux enfoncements suivants : 0,2 – 0,4 – 0,6 – 0,8 – 1 – 1,5 – 2 – 2,5 – 3 – 3,5 – 4 – 4,5 – 5 – 5,5 – 6 – 7 – 8 – 9 et 10 mm.

On arrête alors l'essai quand on atteint ce dernier enfoncement.

d) Calculs

A- Caractéristiques physiques

A-1 Détermination de la densité humide (γ_h) de la teneur en eau (W%) et de la densité sèche (γ_d) après compactage et avant imbibition.

$$\gamma_h = \frac{\text{Poids humide compacté}}{\text{Volume du moulage}}$$

$$W\% = 100 \frac{\text{Poids eau}}{\text{Poids sol sec}}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{100 W\%}$$

A-2 Détermination de la compacité du moulage par rapport à la densité sèche maximale (référence Proctor modifié)

$$C\% = 100 \times \frac{\gamma_d}{\gamma_{d \text{ max}}}$$

A-3 Détermination de la teneur en eau (W en %) après 4 jours d'imbibition.

Les échantillons servant à déterminer cette teneur en eau sont prélevés en fin d'essai. Après poinçonnage lors du démoulage on effectue deux prises au-dessous de la surface de chaque côté de l'emprunt de poinçonnage (*)

Remarque (*)

Comme pour l'essai Proctor, ----- en eau, doivent être de l'ordre de 150g pour les sols fins et d'au moins 500g pour les sols graveleux.

A-4 Gonflement linéaire (Δl)

Le gonflement linéaire (Δl)

Essais Géotechnique

Est la différence de la lecture du comparateur entre le début et la fin de l'imbibition. On détermine le gonflement linéaire relatif en pourcentage de la hauteur (l) de l'échantillon.

$$G = 100 \times \frac{\Delta l}{l}$$

(avec pour cet essai l = 127 mm)

B- Indice portant CBR

Lors du poinçonnement de l'échantillon on note les pressions correspondant aux enfoncements à 0,2 – 0,4 – 0,6 – 0,8 – 1 – 1,5 – 2 – 2,5 – 3 – 3,5 – 4 – 4,5 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9 et 10 mm.

On trace alors une feuille de papier millimétrée la courbe de pression en fonction des enfoncements et en porte en abscisse les enfoncements et en ordonnées les pressions.

La courbe ne doit pas présenter d'inflexions à l'origine. Si les premiers points montrent cette anomalie, on rectifie la courbe en traçant la tangente à l'arc construit avec les autres points. Cela conduit à une correction d'origine pour les déformations : la tangente coupant l'abscisse en un O qui sera prise comme nouvelle origine pour le calcul de l'indice portant.

* L'indice portant CBR est le rapport exprimé en % de la pression obtenue sur l'échantillon à la pression obtenue sur le matériau de référence pour un même enfoncement.

* Pour le calcul on relève sur la courbe tracée les contraintes qui correspondent à 2,5 et 5,0 mm d'enfoncement du piston soit.

* Pour le matériau de référence les contraintes obtenues pour ces mêmes enfoncements sont respectivement :

à 2,5 mm 70 barsou $70 \cdot 10^5$ Pascal.

À 5 mm 105 bars ou $105 \cdot 10^5$ Pascal

Ce qui revient à calculer l'indice portant de la manière suivante :

$$\text{CBR \% à 2,5 mm} \quad \frac{P(2,5)}{0,7}$$
$$\text{CBR \% à 5 mm} \quad \frac{P(5)}{1,05}$$

L'indice CBR est égal à la plus grande de ces deux valeurs.

BREF RESUME

ESSAIS IN SITU

ESSAI A LA PLAQUE

1- But de l'essai

L'essai consiste à mesurer à l'aide d'un appareillage défini. Le déplacement vertical du point de la surface du sol situé à l'aplomb du centre de gravité d'une plaque rigide chargé. Ce déplacement est appelé défexion (W).

2- Domaine d'application

Cet essai est destiné à la mesure de la déformabilité des plate-formes de terrassement constituées par des matériaux dont les plus gros éléments ne dépassent pas 200 mm.

3- Appareillage

3.1 Appareillage spécifique

a- Dispositif de mise en charge de la plaque

Ce dispositif comprend :

- Un massif de réaction, constitué par un véhicule testable permettant un chargement de 7000 daN (\approx 7 tonnes) sur la plaque. Les points d'appui de ce massif sur le sol doivent se situer à une distance $>$ à 2 m du point où se fait la mesure.
- Un dispositif de mise en charge hydraulique constitué par un groupe moto-pompe actionnant un vérin. Ce dispositif doit permettre de réaliser les cycles de chargement tels qu'ils sont définis.
- Une plaque de 600 mm de diamètre. Les dimensions, forme et matière de cette plaque doivent conformes à celles indiquées. Une liaison à couche doit être prévue entre la plaque et la tige de commande du vérin.

b- Dispositif de mesure

*** Dispositif de mesure de la déflexion**

Il est constitué d'une poutre Benkelman équipé d'un capteur de déplacement (type comparateur potentiométrique) de 10 mm de course. Ce capteur est relié à un enregistreur XY de type courant et commande le déplacement du stylet de l'enregistreur en fonction de la déflexion du sol. Un tel capteur permet également un contrôle visuel de la déflexion en lisant directement sur le cadran gradué en 1/100 mm l'indicateur donnée par l'aiguille l'extrémité du fléau de la poutre Benkelman prend appui sur une tige coulissant à l'intérieur de la plaque. Un gardage précis de la tige dans la plaque doit être assuré.

*** Dispositif de mesure des charges**

Il comporte d'une part, un peson à jauge 0 – 10 000 daN relié à l'enregistreur XY qui commande le déplacement du stylet en fonction de la charge appliquée et, d'autre part, un manomètre intercalé dans le circuit hydraulique (ou essentiellement un anneau dynamométrique sur la tige du vérin) qui permet un contrôle visuel de la charge appliquée sur la plaque afin de respecter, en particulier, les vitesses de montée en charge.

3.2 Appareillage d'usage courant

- Véhicule couvert auto-moteur, charge utile \approx 800 kg
- Règle en acier, mètre et décamètre à
- Chronomètre
- Tunnel en tôle d'aluminium destiné à la protection de la poutre Benkelman (soleil, pluie ou vent)
- Craie, pinceaux et peinture
- Récipients de sable et de plâtre, bidon d'eau
- Pelle, pioche, truelle, spatule, basse à poils doux.
- Boîtes hermétiques pour prélèvement d'échantillons.

4- Durée de l'essai

5- Mode opératoire

- A l'aide d'une règle en acier, débarrasser l'emplacement de la plaque que tout le matériau foisonné ; terminer avec une brosse doucement.
- Régulariser la surface ainsi apprêtée en y répandant une couche aussi mince que possible d'un sable propre 0/1 mm légèrement humide
- Exécuter au centre de la couche d'interposition, à l'aide d'une spatule, une petite cuvette circulaire de 2 cm de rayon, dont le rôle est d'éviter que la pige de mesure ne soit au contact de la couche d'interposition, mais qu'elle reprise bien sur le sol.
- Si l'on craint que le matériau flue sous la pige lors de l'application de la charge, provoquant ainsi une fausse lecture de la défexion, on rigidifiera la surface de la cuvette en y déposant, à la spatule, une mince couche de plâtre. On devra attendre la prise de celui-ci avant de poursuivre l'essai (5mm). Cette précaution pourra également envisagée pour les matériaux comportant une faible proportion d'éléments 0/5 mm. Dans ce cas, la pige pourrait en effet, durant la charge, glisser de l'élément sur lequel elle repose et tomber dans un vide.
- Parfaire ensuite la mise en place de la plaque sur le sol, en lui faisant subir deux ou trois rotations alternatives de 30° environ.
- Après la mise en place de la plaque, installer la poutre Benkelman, en s'assurant que ses points d'appui sur le sol sont situés à une distance au moins égale à 2,5 m de ceux du massif de réaction. Installer, si nécessaire, le tunnel de protection de la poutre Benkelman.
- Placer ensuite le peson électronique entre la face d'appui du vérin de la plaque.
- Réaliser les branchements électriques entre le capteur, le peson électronique et l'enregistreur XY
- Terminer la mise en place de la plaque en lui appliquant, durant une dizaine de secondes, une charge de 850 daN correspondant à une pression moyenne sous la plaque de 0,3 bar. Relâcher cette charge et amener le stylet de l'enregistreur XY au point 0 du système de coordonnées
- Positionner la feuille d'essai sur la table de l'enregistreur. Les dispositions relatives à la position initiale de référence étant établies
- Un premier opérateur met en action le dispositif de chargement de la plaque de façon à obtenir les cycles de chargement et déchargement définis ci-après.

Essais Géotechnique

- Un deuxième opérateur s'assure du bon déroulement de l'enregistrement de la courbe charges-déformations.

L'essai est alors conduit de la manière suivante :

Premier cycle de chargement

- Charger la plaque à la vitesse de 80 daN/s environ jusqu'à obtenir une pression moyenne sous la plaque de 2,5 bars, ce qui correspond à une charge totale de 7065 daN. Lorsque cette pression est atteinte, attendre la stabilisation de la déflexion.
- On considère que la stabilisation est atteinte lorsque les variations de la déflexion sont inférieures à 0,02 mm / mm

Supprimer alors la charge sous la plaque en 2 et 3 secondes environ

Second cycle de chargement

- De la même manière que pour le premier cycle, charger la plaque à la vitesse de 80 daN/s jusqu'à obtenir une pression moyenne sous la plaque de 2 bars, ce qui correspond à une charge totale de 5650 daN

Lorsque la stabilisation de la déflexion est atteinte, l'essai proprement dit est terminé ; procéder aux manœuvres de déchargement, relevage de la plaque rangement du matériel et passer au point de mesure suivant.

Mesuré alors sur la feuille d'essai les valeurs des déflexions obtenues après stabilisation, soient

W_1 (mm), déflexion de la suite du premier chargement

W_2 (mm), déflexion de la suite du second chargement

Précautions à prendre

- Durant l'attente de la stabilisation, maintenir la charge sous la plaque aussi constante que possible.
- L'opérateur chargé de réaliser les cycles de chargement doit noter à la fin de chaque cycle, les valeurs de la charge appliquée et de la déflexion correspondante indiquées par le manomètre ou l'anneau dynamométrique et le comparateur potentiométrique ; cette précaution permet de contrôler le bon fonctionnement de la chaîne de mesure.
- Si par incident de manœuvre, la valeur de la charge appliquée pour l'un ou l'autre des deux cycles de chargement est légèrement supérieure à celle indiquée précédemment,

conserver cette valeur mais la valeur du module correspondant devra être recalculée d'après la formule générale indiquée.

- Noter également sur la feuille d'essai tout détail ou incident pouvant influencer les résultats numériques ou graphiques, tels que : averse durant l'essai, passage d'un engin lourd à proximité du point d'essai, vent, soleil etc. En particulier, noter le temps de la stabilisation de la déflexion si celui-ci est supérieur à 2 mm.
- A la fin de l'essai, il est conseillé dans le cas des sols sensibles à l'eau de prélever environ 1500g de matériau au point d'essai, afin de déterminer sa teneur en eau et éventuellement les limites d'Atterberg, en vue de l'interprétation des résultats numériques.

6- Calculs

A partir des résultats mesurer sur la feuille d'essai, on calcule les modules de déformations relatifs à chacun des deux cycles de chargement d'après la formule générale donnant la déflexion totale à la surface d'un massif indéfini, homogène et élastique soumis à une charge sur une plaque circulaire rigide :

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

Dans laquelle

W : Déflexion du massif au centre de la plaque, en mm

E_v : Module de déformation à la plaque, en bois

Q : Pression moyenne sous la plaque, en bois

a : Rayon de la plaque, en mm

δ : Coefficient Pression considéré égal à 0,25

Compte tenu des valeurs, de la pression moyenne retenues, du diamètre de la plaque et en assimilant l'expression $(1 - \delta^2)$ à 1, les modules de déformation au premier et au second chargement se calculent d'après les formules ci-après :

$$E_{v1} = \frac{1125}{W_1} \quad \text{Et} \quad E_{v2} = \frac{900}{W_2}$$

Essais Géotechnique

On calcule ensuite K.

$$K = \frac{Ev_2}{Ev_1}$$

* Compactage du sol d'autant meilleur que K est proche de 1

En générale on admet que si ce rapport est inférieur à 1,25, le compactage au sol est satisfaisant.

Au delà (dessus) de 1,25, il faut recomacter si la teneur en eau le permet ou alors si cette dernière est trop élevée, il est préférable de purger.

Le rapport $\frac{EV2}{EV1}$ permet d'apprécier la qualité du compacte.

$\frac{EV2}{EV1} < 2 \Rightarrow$ bon compacte

$\frac{EV2}{EV1} < 1,2 \Rightarrow$ très bon compacte.

LES GRANULATS

Le granulat est un ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 80 mm destinés notamment à la confection des mortiers, des bétons, de couche de fondation, de base et de roulement des chaussées et des voies ferrées.

MESURE DU COEFFICIENT D'APLATISSEMENT

1- But de l'essai

La détermination du coefficient d'aplatissement d'un échantillon de granulats dont les dimensions sont comprises entre 4 et 40 mm.

2- Domaine d'aplatissement

Le présent coefficient s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle, utilisés dans le domaine des travaux publics.

3- Appareillage

- Les tamis 40 – 31,5 – 25 – 20 – 16 – 12,5 – 10 – 8 – 6,3 – 5 et 4 mm
- Les grilles 20 – 16 – 12,5 – 10 – 8 – 6,3 – 5 – 4 – 3,15 – et 2,5 – mm
- Diviseurs à couloirs avec bacs et pelles adéquates
- Un diviseur à ouvertures réglables
- Plateau en tôle pouvant entrer sous le grand des diviseurs
- Balance
- Pelles et truelles

4- Durée de l'essai : 02 jours

5- Mode opératoire

- L'échantillon est sur un tamis de 4 mm, sa masse Mo est mesurée au gramme près
- Faire un tamisage sur tamis à mailles carrées
- Faire un tamisage sur grille à fentes, chaque classe granulaire obtenue par l'opération précédente sur une grille dont l'écartement E entre les barres est défini par le tableau de correspondance ci-dessous

Essais Géotechnique

Classe granulaire δ/D	Ecartement E
31,5	20
25	16
20	12,5
16	10
12,5	8
10	6,3
8	5
6,3	4
5	3,15
4	2,5

- Le tamisage sur grille se fera manuellement
- Peser au gramme près le passant sur la grille correspondante à chaque granulaire d/D

6- Calculs

Les résultats sont portés sur des feuilles d'essai

Mg : masse de chaque granulaire d / D, en gramme

M = ΣM_g (Ce chiffre peut être légèrement inférieur à Mo mais ne doit pas s'en écraser de plus de 2%)

Me : masse des éléments de chaque granulaire d / D passant sur la grille correspondante.

$$\frac{Me}{Mg} \times 100 = \text{coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire}$$

Le coefficient d'aplatissement global A est donné par

$$A = \frac{\Sigma Me}{M} \times 100$$

MICRO - DEVAL

1- But de l'essai

L'essai Micro Deval permet de mesurer la résistance à l'usure des roches. Cette résistance à l'usure pour certaines roches n'est pas la même à sec ou en présence d'eau.

2- Domaines d'application

Le présent essai s'applique aux granulats utilisés dans les travaux publics.

3- Appareillage

- Un jeu de tamis de 1,6 – 4 – 6,3 – 10 et 14 mm, le diamètre des moutures ne devant pas être inférieur à 200 mm
- Matériel pour effectuer l'échantillonnage du matériau et une analyse granulométrique par tamisage
- L'appareil Micro – Deva
- La charge abscisse (constituée des billes sphériques de $(10 \pm 0,5)$ mm de diamètre en acier INOX Z30 C13 ($\varnothing = 9,5$ mm))
- Un dispositif doit permettre d'arrêter automatiquement le moteur après deux heures d'essai correspondant à 12 000 rotations
- Des bacs.

4- Durée de l'essai : 02 jours

5- Mode opératoire

- La masse de l'échantillon envoyée au laboratoire sera de 2000g

N.B : La granularité du matériau (de l'échantillon) est choisi parmi les trois classes granulaires 4 / 6,3 – 6,3 / 10 – 10 / 14

- Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à obtention de la masse constante
- Tamiser à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie.
- Pour commencer l'essai, préciser 200 g de l'échantillon
- La charge à utiliser sera fonction de la classe granulaire

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
4 / 6,3	2000 ± 5
6,3 / 10	4000 ± 5
10 / 14	5000 ± 5

Essais Géotechnique

- Pour effectuer un essai en présence d'eau, on ajoutera 2,5 l replacé le couvercle
- Mettre les cylindres en rotation à une vitesse de (100 ± 5) trs / mn pendant 2h ou 12 000 tours
- Après essai, recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac en prenant soin d'éviter les pertes de granulat
- Laver soigneusement à la pissette l'intérieur du cylindre en recueillant l'eau et les parties minérales entraînées.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm ; la charge abrasive sera retenue sur un tamis de 8 mm
- Laver l'ensemble sans un jet d'eau et retirer la charge abrasive (à l'aide d'un aimant par exemple). Procéder en plusieurs fois pour faciliter l'opération
- Sécher le refus à 1,6 mm à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante
- Peser ce refus au gramme près, soit m' le résultat de la pesée

6- Calculs

Le coefficient Micro – Deval est par définition le rapport

$$100 \times \frac{m}{500}$$

Où $m = 500 - m'$ est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm on a donc

Le coefficient micro – de val

$$\text{MDE} = 100 \times \frac{500 - m'}{500}$$

ESSAI LOS ANGELES

1- But de l'essai

L'essai Los Angeles permet de déterminer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats

2- Domaine d'application

Cet essai s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans les travaux de Génie-Civil.

3- Appareillage

- Un jeu de tamis de dimension convenable, leur diamètre ne devra pas être inférieur à 250 mm
- Matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau et une analyse granulométrique par tamisage
- Une machine Los Angeles comprenant
 - * Des charges de boulets (constituées de boules sphériques pesant entre 420 et 445 g en acier Z 30C ($\varnothing = 47 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$))
 - * Un moteur d'au moins 0,75kw assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière comprise entre 30 et 33 tours / mm
 - * Un bac destiné à recueillir les matériaux après essai
 - * Un compte tour de type relatif arrêtant automatiquement le moteur au nombre de tours voulu.

4- Durée de l'essai : 02 jours

5- Mode opératoire

- La quantité envoyée au laboratoire sera au moins égale à 15000g
- Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie en commençant par le tamis le plus grand
- Laver le matériau tamisé et le sécher à 105°C jusqu'à l'obtention de la masse constante.
- La charge utilisée sera fonction de la classe granulaire

Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets
4 / 6,3	7
6,3 / 10	9
10 / 14	11
10 / 25	11
16 / 31,5	12
25 / 50	12

- Replacer le couvercle
- Faire effectuer à la machine 500 rotations sauf pour la classe 25 / 50 où l'on effectue 1000 rotations à une machine régulière comprise entre 30 et 33 tours / mm
- Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au dessus de ce bac sur le tamis de 1,6 mm, le matériau étant pris plusieurs fois afin de faciliter l'opération
- Laver le refus au tamis de 1,6 mm. Egoutter et sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constant
- Peser le refus une fois séché. Soit m' le résultat de la pesée

6- Calculs

Le coefficient Los Angeles est par définition, le rapport

$$100 \times \frac{M}{5000}$$

Où $m = 5000 - m'$ est la masse sèche de la fraction du matériau passant après au tamis de 1,6 mm en gramme

$$LA = \frac{100 (5000 - m')}{5000}$$

Le résultat sera arrondi à l'unité.

ESSAI DE FRAGMENTATION DYNAMIQUE

1- But de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produit en soumettant le matériau aux chocs d'une masse normalisée

2- Domaine d'application

Cet essai s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle (à l'exclusion des granulats légers) utilisés dans les travaux publics.

3- Appareillage

- Un jeu de tamis de 1,6 – 4 – 10 et 14 mm
- Le matériau nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau et une analyse granulométrique par tamisage
- Un appareil comportant
 - * Une moule cylindrique en acier x C38
 - * une masse de 14 kg $\pm 0,02\text{kg}$ en acier x c38
 - * Un support en béton de 25 kg environ muni de deux poignées et de deux goujons filetés, sur lequel doit être fixé le socle de l'appareil.

4- Durée de l'essai : 02 jours

5- Mode opératoire

- La quantité envoyée au laboratoire sera au moins égale à 1000g.
- Tamiser l'échantillon à sec sur chacun de deux tamis de la classe granulaire choisie en commençant par le tamis le plus grand
- Prélever $350\text{g} \pm 1\text{g}$ de l'échantillon
- Introduire l'échantillon pour essai dans le moule, en le répartissant uniformément
- Donner le nombre de corps de masse indiquée dans le tableau ci-dessous selon la classe granulaire.

Classe granulaire (mm)	Nombre de coups de masse
4 / 6,3	16
6,3 / 10	22
10 / 14	28

- Recueillir et tamiser le granulat après essai sur le tamis de 1,6 mm
- Peser le refus au gramme près, soit m' la masse de ce refus.

6- Calculs

Le coefficient de fragmentation dynamique est obtenu par le rapport

$$F_D = 100 \times \frac{m}{350}$$

Où $m = 350 \text{ m'}$: m est la masse sèche en grammes de la fraction de l'échantillon pour essai passant, après l'essai au tamis 1,6 mm

$$F_D = \frac{100 (350 - m')}{350}$$

Arrondir le résultat à l'unité la plus proche.

DETERMINATION DES IMPURETES

Ex : Poids humide 3100g (P_1) / Poids initial sec 3051g (P_2) / Poids sec après étuve 2815g (P_3)

$$W\% = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100$$

$$Imp = \frac{P_2 - P_3}{P_2} \times 100$$

ESSAI DE PROPRETE DES GRANULATS

Date	Provenance	Classe granulaire	(W1) Poids sec avant	(W2) Poids sec après	Passant à 0,5 mm	% < 0,5 mm
		6/10	3393g	3382g	11	0,3%
		10/14	3939g	3927g	12	0,3%

$$\% \text{ propriété} = \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} \times 100$$

EQUIVALENT DE SABLE

1- But de l'essai

Cet essai qui s'effectue sur la fraction de sol ou de granulat passant, au tamis à mailles carrés de 5 mm, est réalisé pour déterminer le degré de pollution d'un sol ou d'un sable.

2- Domaine d'application

Cet essai s'applique dans des nombreux domaines, notamment

- Le choix et contrôle des sols utilisables en stabilisation mécanique
- Contrôle des sols utilisés en stabilisation chimique
- Choix et contrôle des granulats pour les enrobés hydrocarbonés

3- Appareillage

- 1 tamis de 5 mm d'ouverture de mailles avec fond
- 1 échantillon de 5 mm d'ouverture
- 1 spatule et cuillère
- 1 entonnoir à large ouverture pour faire passer l'échantillon dans l'éprouvette cylindrique
- 6 récipients de pesée en alliage léger pouvant recevoir environ 200 cm³
- 1 balance précise au gramme, de portée au moins égale à 250g
- 1 chronomètre gradué en °C
- 1 régllet de 500 mm, gradué en mm
- 1 goupillon à pal doux pour le nettoyage des éprouvettes
- des bacs pour tamisage
- des éprouvettes cylindriques
- 1 tube laveur
- 1 tube caoutchouc
- 1 piston lare
- 1 machine d'agitation

Sable	100
Sable propre pour béton	> 80
Grave pour couche de base	> 35 à 40
Grave pour couche de fondation	>30 à 35
Sable argileux	< 35
Argile	0

4- Durée de l'essai : 02 jours

5- Mode opératoire

- On verse dans une cylindrique jusqu'au trait repère inférieur, une solution lavante.
 - Introduire dans l'éprouvette une masse sèche de $120g \pm 1g$ de matériau à l'aide de l'entonnoir
 - Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main par déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon
 - Laisser reposer 10mm
 - Boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc
 - Fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation
 - Faire subir à l'éprouvette 90 cycles ± 1 cycle en $30s \pm 1s$
 - Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais
 - Oter le bouchon de caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavante.
 - * En descendant le tube laveur dans l'éprouvette
 - Rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavante
 - Puis enfoncez le tube jusqu'au fond de l'éprouvette
 - Puis laver le sable pour faire remonter les éléments argileux tout en maintenant l'éprouvette en position verticale
 - * L'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur
 - * Relever le tube laveur de façon à ce que le niveau du liquide se maintienne à hauteur de trait repère.
 - * Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.
 - Laisser reposer sans perturbation pendant $20\text{ mn} \pm 10\text{s}$
- Au bout de 20 mn
- Mesurer à l'aide du réglent la hauteur h_1 au niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette
 - Mesurer également, si possible, la hauteur h_2 du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette.
 - * Les hauteurs h_1 et h_2 sont arrondies au millimètre le plus voisin
 - * Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appui sur l'éprouvette

Essais Géotechnique

- * Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston. Introduire le régllet dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston.
- * Lire la hauteur du sédiment h_2 au niveau de la face supérieure du manchon. Arrondir la hauteur h_2 au millimètre le plus voisin. Noter la température du contenu de l'éprouvette au degré le plus voisin
- Refaire les mêmes opérations

6- Calculs

L'équivalent de sable d'une prise d'essai d'un échantillon est par définition mesuré au piston et donné par la formule :

$$E_S = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

L'équivalent de sable visuel est, dans les mêmes conditions, donné par la formule :

$$E_{SV} = \frac{h'_2}{h_1} \times 100$$

On a toujours $E_S < E_{SV}$

Les résultats sont donnés avec une décimale

La détermination portant sur deux prises d'essais par échantillon, l'équivalent de sable E_S ou E_{SV} d'un échantillon est la moyenne des équivalents de sable déterminés sur les deux prises d'essais

La valeur de la moyenne est arrondie à l'entier le plus voisin.

DETERMINATION DU MODULE DE FINESSE

C'est le centième de la somme des refus (exprimés en % de poids aux taux de modules (23)

(26) (29) (32) (35) (38) (41) (44) (47) (50)

0,16 0,35 0,63 1,25 2,5 5 10 20 40 50

(Les numéros d'ordre des modules, croissent de 3 à 3 à partir de 23, les dimensions doublent d'un tamis à l'autre).

Le module de finesse sera : $\frac{98+90+70+35+10+2}{100} = 3,05$

On retrouve bien entendu cette même valeur en portant des tamisât, dont les pourcentages figurent directement sur les graphiques. $\frac{6x100-(2+10+30+65+90+98)}{100} = 3,05$

Essais Géotechnique

C'est un nombre sensiblement égal à celui qui mesure la surface comprise entre la courbe granulométrique et la parallèle d'ordonnée 100 à l'axe des abscisses.

=> Il apparaît ainsi nettement que le module de finesse sera d'autant plus petit que le granulat sera plus riche en éléments fins.

LES BETONS

Le béton hydraulique est un mélange intime

- * De gravillons
- * De sable
- * De ciment
- * et de l'eau

Les composantes du mélange doivent satisfaire aux spécifications définies dans le CCTP.

ESSAI D'AFFAISSEMENT (SLUMP – TEST)

1- But de l'essai

Cet essai nous permet d'apprécier la maniabilité du béton (granulat < 25 mm).

Cette maniabilité dépend surtout :

- * De la quantité d'eau. Davantage d'eau entraîne béton plus maniable

De la provenance des granulats : toutes choses égales par ailleurs, les granulats roulés donnent des bétons plus maniables que les concassés.

2- Domaine d'application

Plusieurs ouvrages d'Art.

3- Appareillage

- Le cône d'Abraams
- Soignées de préhension, au 2/3 de la hauteur
- Plaque de base
- Dispositif de fixation
- Pratique de mesure, avec règle graduée
- Tige de piquage, acier doux, Ø 16 mm, l = 60 cm, avec extrémité hémisphérique
- Eventuellement, entonnoir pour introduire le béton.

4- Durée de l'essai : 01 jour

5- Mode opératoire

- huiler légèrement le moule, et humecter la plaque de base. Fixer le cône sur la plaque.
- Remplir le cône de béton
 - * 4 couches de hauteurs sensiblement égales ;
 - * chaque couche piquée (traversée) de 25 coups de tige
 - * arroser la dernière couche avec la tige de piquage
 - * ??
- Démouler (soulever sans lenteur excessive, et sans brutalité)
- Laisser le mouvement d'affaissement se stabiliser (1 minute environ)
 - * mesurer la nouvelle hauteur h_2 , au point le plus haut du béton.

6- Calculs

L'affaissement noté ΔH sera

$$\Delta H = h_2 - h_1$$

* Faire au moins 3 prélèvements consécutifs ; on arrondira au centimètre le plus proche la moyenne des résultats

Cet essai présente de grandes qualités.

- Simple ; matériel réduit et peu onéreux ; grande compétence technique non indispensable
- Fidèle
- Parfois très commode : commande téléphonique de béton prêt à l'emploi
- Excellent moyen de contrôle
- Idéal pour les « gâchées d'eau »

ESSAI D'ETALEMENT (FLOW – TEST)

1- But de l'essai

Cet essai nous permet d'apprécier la maniabilité du béton (granulats d > 25mm)

2- Domaine d'application

Plusieurs ouvrages d'Art

3- Appareillage

- Tronc de cône analogue au cône d'Abrams, mais sans plaque de base
- Tige de piquage, comme pour l'essai d'affaissement
- Table à secousse
- Plaque circulaire en acier, $\varnothing = 75$ cm
- Une manivelle imprime des chutes verticales (hauteur de chute : 12,5 mm)
- Socle inertie importante (béton,...)

4- Mode opératoire

- Humecter la table ; y placer le cône
- Remplir le cône de béton : comme pour le cône d'Abrams, mais en 2 couches seulement.
Nettoyer la surface libre de la table ;
- Oter le moule
- Imprimer (rotation régulière) 15 secousses en 15 secondes
- Il s'est produit un étalement : mesurer le nouveau diamètre D faire 3 mesures

5- Durée de l'essai : 01 jour

6- Calculs

Après trois mesures on obtient D₁ D₂ et D₃ et on détermine la moyenne

$$D = \frac{D_1 + D_2 + D_3}{3}$$

Et on déduit le pourcentage d'étalement

$$\dot{\epsilon}\% = \frac{D - d}{d} \times 100 = \frac{D - 25}{25} \times 100$$

LES PRODUITS NOIRS

Ce sont les liants hydrocarbonés, on distingue

- Les bitumes purs (*)
- Les bitumes fluidifiés (*)
- Les bitumes fluxés
- Les bitumes fluxés mixte
- Les bitume – goudron
- Les goudrons
- Les émulsions de bitumes (*)

(*) Les liants les plus utilisés au Cameroun

BITUMES PURS

Ce sont des produits obtenus par raffinage de bruts de pétrole et ne comportant aucun ajout. Ils ne peuvent être mis en œuvre qu'à chaud à des températures supérieures à 130°C. On distingue les bitumes 20/30 ; 40/50 ; 60/70 ; 80/100 ; et 180/220. Mais les plus utilisés dans les travaux routiers au Cameroun sont 40/50 ; 60/70 ; et 80/100.

LA PENETRATION A 25°C

1- But de l'essai

La pénétrabilité à l'aiguille d'un produit bitumineux est donnée par la profondeur exprimée en dixièmes de millimètre, à laquelle une aiguille type, chargée, pénètre dans la prise d'essai, dans les conditions normalisées. Cet essai de déterminer la classe du bitume.

2- Domaine d'application

Entre dans la composition des bétons bitumineux

3- Appareillage

- Un gobelet cylindrique à fond plat, en métal, en porcelaine ou en verre pour les pénétrabilités ≤ 200 , utiliser le gobelet dont les dimensions intérieures sont :

Diamètre : 55 mm

Profondeur : 35 mm

Essais Géotechnique

- Pour les pénétrabilités ≥ 200 , utiliser le gobelet dont les dimensions intérieures sont :

Diamètre : 55 mm

Profondeur : 57 mm

4- Durée de l'essai : 02 jours

5- Mode opératoire

6- Calculus

Effectuer trois déterminations

La pénétration est la moyenne des résultats des trois déterminations répondant aux conditions du tableau ci-dessous, arrondie à l'unité la plus proche : chaque unité correspondant à 0,1 mm

Pénétration	0 - 12	13 - 70	71 - 125	126 - 180	181 - 225	> 225
Différence entre les valeurs extrêmes	2	3	4	5	6	3% de la valeur la plus faible

Si la différence entre les résultats extrêmes excèdent les valeurs indiquées au tableau ci-dessus, recommencé l'essai en utilisant un 2^e échantillon. Si les valeurs du tableau sont à nouveau dépassées, recommencer l'essai jusqu'à ce que ces valeurs soient satisfaites.

POINT DE RAMOLLISSLEMENT B.A

1- But de l'essai

Le but est de déterminer le point de ramollissement qui est la température à laquelle un produit bitumineux atteint un certain degré de ramollissement dans des conditions normalisées.

2- Domaine d'application

Entre dans la composition des enrobés (vérification du point de ramollissement des produits bitumineux par la méthode “Bille et Anneau”

3- Appareillage

- Bille en acier dont le diamètre est de 9,53 mm et la masse de $3,5g \pm 0,05g$
- Anneau conique en laiton
- Support d’anneaux
- Récipient pour bâise-vase cylindrique en verre
- Thermomètre

4- Durée de l'essai : 02 jours

5- Mode opératoire

- On utilise une plaque de verre sur laquelle on met un produit (glycérine vaseline, etc....) qui empêchera l’anneau + bitume à s’adhérer à la plaque
- On ramollit le bitume comme dans l’essai de pénétration, on remplit l’anneau, on le laisse à la température ambiante pendant 30 mns, il durcit.
- On prend une lame à araser pour enlever le surplus sur l’anneau
- On porte les deux sur un dispositif dans un verre.
- On passe le thermomètre dans le verre au milieu de la plaque immobile
- On remplit le bol d’eau
- On porte tout le dispositif dans le frigo et le ressort, verser de l’eau jusqu’à attendre $5^{\circ}C$
- On le porte sur un dispositif de chauffage électrique
- Quand la T° atteint $5^{\circ}C$ et après 5 seconde on note la T° .

N.B. : Quand les deux billes ne tombent pas au même moment, il est souhaitable de refaire l’essai.

EQUIVALENT DE SABLE (TRES SIMPLIFIE)

On prend 120 g de matériau qu'on tamise au tamis Ø 5 mm. (Faire 3 essais)

	<u>N°1</u>	<u>N°2</u>	<u>N°3</u>
➤ Mise du matériau au temps (t_0)	8h25	8h30	8h35
➤ Agitation et lavage au temps (t_1)	8h35	8h40	8h45
$t_1 = t_0 + 10 \text{ mms}$			
➤ Début de floculation au temps (t_2)	8h37	8h42	8h47
$t_2 = t_1 + 20 \text{ mns}$			
➤ Mesure au temps $t_3 = t_2 + 20\text{mns}$	8h57	9h02	09h07
* hauteur totale (H_0)	10,3	10,2	10,3
* hauteur de sable à vue (H_1)	9,8	9,8	10
* hauteur de sable à piston (H_2)	9,2	9,1	9,2
Equivalent de sable (ES visuel) = $\frac{H_1}{H_0} \times 100$	95,2	96,0	97,0
(ES piston) = $\frac{H_2}{H_0} \times 100$	89,3	90,1	89,3
<u>Moyenne ES visuel : 96%</u>			
<u>Moyenne ES piston : 89,5%</u>			

PERTE DE MASSE AU CHAUFFAGE

(163°C PENDANT 5H A L'ETUVE)

1- But de l'essai

L'essai a pour but de déterminer la perte de masse d'un échantillon de bitume pur à des conditions définies de temps et de température.

2- Domaine d'application

Entre dans la composition des enrobés.

3- Appareillage

- Se munir des mêmes godets standard utilisés pour l'essai de pénétration, ces godets sont de forme cylindrique et fond plat. Leurs dimensions intérieures sont les suivantes :

$$\varnothing = 55 \text{ mm} ; \text{ hauteur } 35 \text{ mm}$$

$$\varnothing = 55 \text{ mm} ; \text{ hauteur } 57 \text{ mm}$$

- Une étuve réglable de 0°C à 200°C
- Une montre ou un chronomètre

4- Durée de l'essai : 02 jours

5- Mode opératoire

- L'échantillon de bitume à essayer sera fondu à une température de $100^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$
- Agiter l'échantillon afin qu'il soit homogène et chasser les bulles d'air
- Charger deux ou trois godets de préalablement tarés (P_0)
- Laisser refroidir à la température ambiante et peser (P_1)
- Régler l'étuve à 163°C
- Introduire les godets chargés dans l'étuve ; leur séjour dans l'étuve sera de 5 heures
- Après 5 heures, sortir les godets et les laisser refroidir à la température ambiante, puis peser (P_2)

Le pourcentage de perte de masse au chauffage est exprimé comme suit :

$$\boxed{\frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_0} \times 100} \quad (\text{en \%})$$

DENSITE RELATIVE A 25°C

1- But de l'essai :

La présente norme a pour objet la détermination de la densité relative des produits bitumineux

2- Domaine d'application

Composition des enrobés

3- Appareillage

- Balance analytique ou hydrostatique
- Moule cubique de laiton préalablement amalgamé d'environ 12 mm de côté
- Plaque de laiton amalgamé
- Pour les réactifs (Eau distillée, Mercure)

4- Durée de l'essai : 1 jour

5- Mode opératoire

Précaution de sécurité

N.B : Lors de la préparation de l'échantillon, on utilise du mercure : du fait de sa toxicité, il faut observer complètement les règles ci-après.

- Stocker le mercure dans une cruche fermée placé dans un endroit frais
- Eviter toutes projections de mercure
- Eliminer les vapeurs de mercure en travaillant sous une hotte assurant une bonne ventilation
- Conserver les plaques et autres éléments en liaison amalgamé à une température ne dépassant pas la température ambiante normale
 - On pèse le pycnomètre (a)
 - On remplit pycno d'eau distillée (si vous n'avez pas d'eau distillée, on peut chauffer l'eau et la refroidir à 25°C et on pèse) (b)
 - On calcule la perte d'eau (a-b)
 - On pèse pycno + eau (c)
 - On met une quantité de bitume dans le pycno et on laisse dans l'eau à 25°C
 - On détermine le poids du matériau (c - a)
 - On pèse pycno + eau + bitume
 - On détermine le poids de l'eau placée (d-c)

6- Calculs

La densité relative à 25°C sera

$$\frac{C - a}{(b - a) - (d - c)}$$

Recommendations

Pour la détermination des densités relatives, il est important :

- a) Que la T° du contenu du pycnomètre soit bien $25^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ pendant les pesées du pycnomètre complètement rempli.
- b) De prendre des précautions pour prévoir l'expansion et le débordement du contenu pouvant être provoqué par la chaleur de la main pendant l'essuyage de la surface du pycnomètre
- c) Eviter complètement la formation de bulles d'air dans le pycnomètre au cours du remplissage.
- d) D'effectuer rapidement les pesées après le remplissage et les effectuer à 1 mg près. Un certain nombre d'essais de remplissage et de pesées peuvent être nécessaires pour obtenir le degré de précision voulue.
- e) Il est commode de chauffer le pycnomètre à une étuve à 100°C au plus jusqu'à ce que tout le produit puisse être retiré. Essuyer ensuite avec un chiffon doux du papier – filtre. Lorsqu'il est refroidi, le pycnomètre est finalement rincé avec un saluant approprié et enfin essuyé soigneusement.

La densité relative est un nombre sans dimension qui s'exprime avec trois décimales.

BITUME FLUIDIFIES OU CUT – BACK : Ce sont des bitumes purs auquel on a incorporé de produit légers provenant de la distillation du pétrole. On distingue les cut – back 0/1 ; 10/15 ; 150/250 ; 400/600 et 800/1400 mais les plus utilisés au Cameroun sont : 0/1 ; 10/15 et 400/600. On les utilise à des températures de 100°C à 110°C .

PSEUDO – VISCOSITE

1- But de l'essai

L'échantillon est chauffé dans des conditions normalisées. Une prise d'essai est versée dans l'appareil et maintenue à la température voulue. La durée d'écoulement de 50 ml indique conventionnellement la valeur de la Pseudo – Viscosité du bitume fluidifié ou du bitume fluxé.

2- Domaine d'application

Essai entrant dans la préparation des enduits superficiels

3- Appareillage

- 1 viscosimètre
- 1 bain d'eau
- Thermomètre
- Eproutte
- Chronomètre précis à 0,2s près.

4- Durée de l'essai : 1 jour

5- Mode opératoire

- Passage au tamis de 0,80g ; orifice 4 mm ; température 25°C
- Recueillir 50 ml d'émulsion dans le viscosimètre BRT ou STV
- On étalonne le viscosimètre (temps d'écoulement de 200 ml d'eau à la température de 25°C)
- On réalise deux essais enfin de prendre la moyenne.
- Le temps d'écoulement de 200 ml d'eau est compris entre 47s et 53s. Soit t_1 ce temps
- Prendre 200 ml d'échantillon dans la cuve du viscosimètre jusqu'au pointeau
- Prendre ce temps d'écoulement soit t_2 (avec $t_2 > t_1$)

6- Calculs

Le pseudo – viscosité est conventionnellement égale à la valeur obtenue, arrondie à la seconde la plus proche.

$$\text{Le degré Engluer} = \frac{T_1}{T_2} \times 100$$

EMULSION DE BITUME : L'émulsion de bitume est une dispersion stable de bitume dans l'eau sous forme de globules de bitume appelés micelles. En définitif émulsion = 50 ou 69% de bitume pur + agent émulsif + eau.

DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU

1- But de l'essai

Détermination de la quantité d'eau dans l'émulsion

2- Domaine d'application

La présence norme a pour objet de décrire une méthode de détermination de la teneur en eau des émulsions de bitume par entraînement à l'aide d'un solvant.

3- Appareillage

- Un récipient de distillation
- Un dispositif de chauffage
- Un réfrigérant droit
- Un tube de recette de 25 ml
- Un réactif : le toluène pur

4- Durée de l'essai : 02 jours

5- Mode opératoire

- La quantité d'échantillon prélevé est à peu près 2 l placés dans un récipient à polyéthylène à large col à bouchon vissé, préalablement rincé à l'aide de la phase dispersante utilisée pour l'émulsification
- L'échantillon doit être filtré sur un tamis de 630 mm d'ouverture de mailles puis homogénéisé soigneusement par agitation
- peser 40 g environ d'émulsion dans un ballon à 0,1g près
- ajouter 70 à 80 ml de toluène et peu de poudre de tôle sec ou de pince ponce contenue dans une boîte très étanche
- agiter légèrement et assembler les différents éléments
- faire circuler l'eau froide dans le réfrigérant
- chauffer le récipient de distillation en réglant l'ébullition de manière à éviter l'engorgement ou réfrigérant. Poursuivre la distillation jusqu'à ce que le volume d'eau recueillie dans le tube de recette reste contenu et qu'il y ait plus d'eau visible en aucun

Essais Géotechnique

point de l'appareil. Si des gouttelettes d'eau restent dans le réfrigérant, augmenter momentanément la vitesse de distillation.

- Arrêter le chauffage. Laisser le tube de recette et son contenu refroidir à la température ambiante.
- Lire le volume de l'eau rassemblée au fond du tube de recette, à la division de l'échelle la plus voisine de l'interface eau - solvant
- Il arrive que de fines gouttelettes d'eau s'adhèrent aux parois du tube de recette ou restent en suspension dans le solvant. Dans ce cas, on se servira d'une baguette à brasser ou d'une tige en laiton de 2 mm de diamètre environ ou de tout autre dispositif approprié pour favoriser la séparation de l'eau et du toluène.

6- Calculs

Exprimer la teneur en eau de l'échantillon en pourcentage, en masse, au moyen de la formule suivant :

$$\frac{\text{Volume d'eau (en mm) dans le tube de recette}}{\text{Masse (en g) dans la prise d'essai}} \times 100$$

Remarque :

Les matières volatiles solubles dans l'eau, entraînées dans le tube de recette, sont comptées comme eau.

EXTRACTION DU BITUME

Poids cartouche + Enrobé = 612,6 g

Poids cartouche = 52,3 g

Poids enrobés = 560,3g

Poids agrégats = 541,2 g

On détermine poids de liant + eau = 560,3 g – 541,2 g = 19,1g

Il en vient la teneur en liant $\frac{19,1 \times 100}{541,2} = 3,5\%$

INDICE DE RUPTURE DES EMULSIONS

DE BITUME

1- But de l'essai

Cet essai permet d'évaluer la rupture d'une émulsion cationique ou anionique vis à vis de fines minérales de référence.

2- Domaine d'application

La méthode consiste à introduire régulièrement, suivant un mode opératoire conventionnel, la quantité de fines de référence qui provoque la rupture de 100 g d'émulsion.

3- Appareillage

- une capsule émaillée de 20 cm de diamètre intérieur, 10 cm de hauteur
- une spatule en nickel de 20 cm de longueur
- un bain thermostatique équipé d'une pompe
- une balance sensible au décigramme

4- Mode opératoire

- L'échantillon d'émulsion est prélevé suivant les prescriptions du mode opératoire RLE, AC1 – 1965. Il est soigneusement homogénéisé par agitation
- L'échantillon de fines de référence est prélevé dans un stock préalablement homogénéisé
- Conserver dans un bain thermostatique, réglé à la température de 25°C, 1 litre d'émulsion à tester et 1 kg de fines de référence dans des récipients bouchés hermétiquement pendant 1 heure environ.

5- Durée de l'essai : 02 jours

- Déterminer à 0,1 g près le poids P_1 de la capsule émaillée, contenant la spatule de nickel
- Peser à 0,1 g près dans la capsule environ 100 grammes de l'émulsion à tester ; Soit P_2 le poids à 0,1 g près de l'ensemble capsule + spatule + émulsion
- Le poids d'émulsion ajoutée est égale à : $E = P_2 - P_1$
- Placer la capsule émaillée dans le bain intermédiaire dont l'eau est maintenue également à 25°C
- Remplir la trémie contenant environ 250 g de fines de référence sur son support.
- Ouvrir la trappe de la trémie ; les fines tombent alors régulièrement dans la capsule simultanément mélangé intimement de façon régulière (1 tour/seconde) l'émulsion et les fines au moyen de la spatule.

Essais Géotechnique

- Refermer la trappe lorsque le mm »lange durent pâteux et que se forme un caillot isolé et non adhérant à la capsule, caractéristique de la rupture de l'émulsion.
- Peser de nouveau la capsule avec la spatule de nickel à 0,1 g près, après l'avoir essuyée : Soit P_3
- Le poids de fines ajouté est égal à : $P = P_3 - P_2$

6- Calculs

L'indice de rupture de l'émulsion est calculé de la façon suivante :

$$I = \frac{P}{E} \times 100$$

Où E est le poids de l'émulsion et P le poids de fine de référence introduite

N.B : L'une de rupture (I) sera la moyenne des résultats des 3 essais. Chacun ne doit pas différer de plus de 3% de la valeur moyenne calculer

ESSAI DE STABILITE AU STOCKAGE

1- But de l'essai

Cet essai a pour but de définir le mode opératoire pour la détermination de la décantation d'une émulsion de bitume en vue de la caractérisation de sa stabilité au stockage.

Définition :

La stabilité au stockage est définie comme étant l'épaisseur de la couche superficielle de la solution aqueuse qui se forme lorsque l'émulsion est laissée au repos pendant 24 h cette épaisseur s'exprime en pourcentage par rapport à la plus petite dimension du récipient qui contient l'émulsion.

Principe :

L'essai consiste à mesurer l'épaisseur de la couche décantée au moyen d'une électrode de immergée dans l'émulsion et reliée à un pôle positif et négatif d'un générateur de courant continu (l'autre pôle étant relié au récipient métallique contenant l'émulsion). Après passage du courant, il se produit dépôt de bitume sur l'électrode par électrophorèse. La distance qui sépare ce dépôt de la surface de l'émulsion est égale à l'épaisseur de la couche de solution aqueuse décantée.

2- Domaine d'application

Il s'applique aux émulsions anioniques et cationiques de toutes catégories qu'il s'agisse d'une émulsion dite "à stockage limité" ou d'une émulsion dite "stockable"

3- Appareillage

- Electrode cylindrique de cuivre de diamètre 12 mm environ montée sur un support isolant sur laquelle est gravée d'un trait de repère à 60 mm environ de son extrémité.
- Un bouchon en aluminium ou en métal inoxydable de contenance de 500 à 1000 ml et de diamètre intérieur D de 80 à 100 mm
- Un générateur de courant continu ou redressé de force électromotrice comprise entre 6 et 12 V
- Un verre de montre de diamètre supérieur à celui de bêcher.

4- Durée de l'essai

5- Mode opératoire

- L'essai se fera avec un échantillon prélevé à la sortie de l'engin de dispersion et filtré sur un tamis en acier inoxydable d'ouverture de maille 630 m, puis homogénéisé soigneusement par agitation.
- L'essai est effectué à la température de 250°C environ
- L'émulsion a environ 250°C est introduite dans le bêcher métallique jusqu'aux $\frac{3}{4}$ de sa hauteur et laissée au repos pendant 24 h après que le bêcher ait été recouvert d'un verre de montre
- L'électrode est ensuite immergée avec précaution dans l'émulsion jusqu'au trait de repère
- Dans le cas d'une émulsion cationique, relier l'électrode au pôle négatif et le bêcher au pôle positif au générateur. Fermer le circuit pendant au moins 10s. Dans le cas d'une émulsion anionique, inverser les polarités et opérer comme indiqué précédemment.
- Ouvrir ensuite le circuit et retirer l'électrode avec précaution. Déterminer la distance en mm qui sépare le trait de repère de l'électrode du niveau supérieur du dépôt de bitume.

6- Calculs

La stabilité au stockage de l'émulsion de bitume est donnée par la formule

$$\frac{D}{D - d} \times 100$$

D'où d est la distance en mm qui sépare le trait de repère de l'électrode du niveau supérieure du dépôt du bitume

D est le diamètre intérieur en mm du bêcher.

DETERMINATION DU SIGNE DE LA CHARGE DES PARTICULES D'UNE EMULSION

1- But de l'essai

Cet essai a pour but de déterminer le signe de la charge des particules d'une émulsion de bitume.

2- Domaine d'application

Il s'applique aux émulsions de bitume quel que soit leur catégorie

3- Appareillage

- Générateur de courant continu de 12V ou source de courant redressé, muni d'un milliampèremètre et d'une résistance variable
- Plaques d'acier inoxydable 100 mm x 25 mm environ, isolées l'une de l'autre et maintenues fermement parallèles à 12 mm environ l'une de l'autre.
- Bêcher de 150 à 250 ml
- Tamis en acier inoxydable d'ouverture de maille 630 mm
- Chronomètre

4- Durée de l'essai :

5- Mode opératoire

- L'échantillon est filtré sur un tamis en acier inoxydable d'ouverture de mailles 630 mm puis homogénéisé soigneusement par agitation
- Verser l'échantillon (émulsion) ainsi préparée dans un bêcher jusqu'à une hauteur de 25 mm environ.
- Raccorder les électrodes précédemment nettoyées avec un solvant et séchés, au générateur de courant et les placer dans le bêcher
- Régler l'intensité du courant à 8 m A au moins au moyen de la résistance
- Déclencher le chronomètre
- Lorsque l'intensité du courant diminue jusqu'à 2 m A, interrompre l'arrivée du courant et laver les électrodes à l'eau courante. Si l'intensité du courant a tendance à être constante ou diminue très lentement, maintenir le courant pendant 30 mns.
- Examiner les dépôts de bitume sur les électrodes. Une émulsion cationique laisse un dépôt relativement important sur la cathode. Dans le cas d'une émulsion anionique, ce dépôt se produit sur l'anode.

BREF RESUME

AUTRE ESSAIS DE LABO DU NOIR

- **ADHESIVITE A LA PLAQUE VIALIT**
- **ESSAI DURIEZ**
- **ESSAI MARSHALL**
- **DETERMINATION DE LA TENEUR EN BITUME
D'UN ENROBE "METHODE KUMAGAWA"**

BREF RESUME

ADHESIVITE A LA PLAQUE VIALIT

1- But de l'essai

Cet essai nous permet de déterminer l'adhésion du liant sur le granulat répandu

2- Domaine d'application

On l'applique dans le cadre des enduits superficiels, uniquement avec un cut – back 400/600

3- Mode opératoire

- Les granulats sont repartis en 2 lots
 - 1^{er} lot 100 grains de granulats secs
 - 2^e lot 100 grains de granulats humides
- Les granulats utilisés 6/10 ou 10/14 sur le chantier
- La plaque est à l'étuve pendant 24 h à la température de mise en œuvre.
- Les granulats sont séchés à 100°C
- Le liant est mis à l'étuve 30 mns avant l'opération
- On sort la plaque et on pèse 40g de cut-back qu'on verse sur la plaque (occupation de la plaque par le produit à 99% voir même 100%)
- On établi les 100 grains de granulats sur la plaque
- On renverse la plaque et on la pose sur un socle du tombeur de boule
- On laisse la boule tomber 3 fois pendant 30s on compte le nombre de granulats détachés.
 - A- granulats détachés, tâches par le cut-back
 - B- granulats détachés non tâchés par le cut-back
 - C- nombre collé à la plaque

6- Calculs

Adhésivité active (valeurs acceptées)

$$\frac{C}{100} \geq 80\%$$

Et avec les granulats humides on fera la même chose

Adhésivité passive acceptable $\geq 90\%$

ADHESIVITE TWIT

- On la réalise uniquement sur les fractions 2/5 ou 4/6
- On prend 100g de granulat, 5 g de cut-back, le cut-back est à la température de mise en œuvre et le granulat sèche.
- On malaxe le mélange pour l'homogénéiser
- On laisse à la T° ambiante pendant 30mns
- Une fois le mélange ayant passé 30 mns, on le transvase dans un bêcher et on y met l'eau distillée à 60°C jusqu'à immersion complète
- On place le tout à l'étuve à 60°C pendant 24 heures
- Après 24 h on estime le % de granulats désenrobés et la note sera sur 10. C'est ce qu'on appelle essai d'un film de liant en présence d'eau.

Valeurs acceptables.

ESSAI DE FORME

On prend un granulat 10/14

Poids initial sec du matériau 350g.

Poids de bonnes pierres 266g.

Poids des plaquettes 84g.

$$\text{Coefficient de forme F} = \frac{\text{Poids plaquette}}{\text{Poids initial sec}} \times 100$$

$$= \frac{84}{350} \times 100 = 24\%$$

BREF RESUME

ESSAI DURIEZ

1- But de l'essai

L'essai Duriez a pour but de déterminer pour un compactage donné, la résistance à la compression d'une éprouvette d'enrobé de poids et de secteur déterminés.

Il permet également de définir la tenue à l'eau de l'enrober par le rapport des résistances à la compression avec ou sans immersion de l'éprouvette.

2- Domaine d'application

Applicable à tous les enrobés à base de bitume

3- Appareillage

- Une presse capable de maintenir une charge de 180kN pendant 5 mns.
- Au moins 12 moules normaux de $80 \pm 0,1$ mm de diamètre intérieur et 195 mm de hauteur munis d'une plaque de base et d'une pastille supérieure d'épaisseur 27,5 mm pour l'enrobé < 14 mm
- Au moins 10 moules dilatés de $120 \pm 0,1$ mm de diamètre intérieur et 275 mm de hauteur munis d'une plaque de base et d'une pastille supérieure d'épaisseur 27,5 mm pour l'enrobé ≥ 14 mm.
- Une série de plaques en carton très rigides de 3 mm d'épaisseur pour interposer entre l'éprouvette et la presse, ayant selon le diamètre de l'éprouvette les dimensions 100 x 100 mm ou 150 x 150 mm

Appareillage d'usage courant

- 1 balance à 0,5 g (portée 5 kgs)
- 1 balance hydrostatique à $\pm 0,2$ g (portée 5kgs)
- 1 étuve à gamme de température de 50 à 250°C $\pm 1^\circ\text{C}$
- 1 entonnoir métallique
- 2 mains métalliques pour la manutention des mélanges
- 1 malaxeur mécanique équipé de 2 cuves
- 1 couteau de vitrier pour le nettoyage des pales du malaxeur
- 1 pied a coulisse au 1/10^e mm
- 1 armoire thermostatique à température réglable (en principe 18°C $\pm 0,5$)

Essais Géotechnique

- 1 presse de compression à vitesse constante de 1 mm /s pour l'essai si possible équipé d'un enregistreur permettant de mesurer l'effort (en cours d'essai)
- de la paraffine
- 1 récipient métallique (1 litre) pour le liant
- 1 thermomètre métallique de 50 à 250°C ± 1°C pour le contrôle de la température du liant
- des paires des gants de cuir 5 doigts avec manchette de 400 mm
- Oléate de soude glycériné
- Une cloche à vide à double entré, équipé d'une pompe à vide à moteur

4- Durée de l'essai

5- Mode opératoire

5.1 Préparation du matériau

- Chacun des granulats entrant dans la composition de l'enrobé est prélevé à partir des lots parfaitement homogénéisés

La quantité prélevée doit permettre de confectionner une gâchée qui correspond, selon le type à 10 ou 12 éprouvettes pesées au gramme près

Au moment du malaxage, les températures des granulats du bitume, et des matériaux sont définies comme suit :

40/50	160°C
60/70	150°C
80/100	140°C

On le réalise sur deux types des granulats

* granulats ≤ 14 mm BB(0/10 ; 0/12,5 ; 0/14)

* granulats compris entre 14 et 31⁵ Gk (0/20 et 0/31⁵)

Pour le BB on parle de Duriez normal

Les GB Duriez distillé

Tous les granulats prélevés et pesés y compris les fines sont versés doucement dans la cuve du malaxeur de préférence, sinon dans un récipient de capacité analogue.

L'ensemble devra séjourner 12 h minimum à la température de malaxage définie plus haut

Les différents matériaux : cuves de malaxeur, moules de compactage doivent être portés à la même température, ce qui nécessite un séjour de 3h minimum à l'étuve

On prépare également dans un récipient métallique la quantité de bitume nécessaire à l'enrobage de la gâchée, plus une marge de sécurité de 50g d'environ. Le chauffage du bitume s'effectue en deux phases.

- a) Le ramollissement à l'étuve à la température de malaxage pendant une demi – heure environ
- b) Mise en température sur une plaque chauffante pour éviter tout risque de sur chauffe et afin de permettre une homogénéisation de la température, l'opérateur agite constamment la masse de bitume à l'aide et thermomètre métallique.

Lorsque la température du bitume est de 10°C en dessous de la température acquise, il est conseillé de diminuer le chauffage, afin de ne pas dépasser cette température.

5.2 Malaxage

La cuve contenant les granulats est centrée sur le malaxeur mécanique réglé sur une vitesse moyenne (environ 32 tours / mm).

On actionne le malaxeur “à blanc” quelques tours afin de mélanger les différents granulats.

On creuse un trou dans les granulats et on verse le bitume dans ce trou.

On mesure la quantité de liant nécessaire par différence de pesée du récipient contenant le liant

On additionne le malaxeur à petite vitesse pendant 1 mm puis à grande – vitesse. La durée de malaxage totale n'est pas imposée, elle est appréciée visuellement par l'opérateur jusqu'à homogénéisation correcte :

Elle est généralement inférieure à 3 mns

Après malaxage les palettes du malaxeur sont grattées à l'aide d'un couteau de vitrier

Tout l'enrobé doit être alors remélangé au moyen d'une main métallique qui servira aux prélèvements

5.3 Remplissage des moules

En fin de malaxage, les moules d'essais sont sortis un par un de l'étuve pour remplissage.

Avant chaque pesée l'opérateur devra mélanger à l'aide de sa pelle la gâchée afin d'éviter toute ségrégation. On pèse alors des prélèvements de :

1 kg ± 1 g dans le cas de l'essai normal

3,5kgs ± 1 g dans le cas de l'essai dilaté

cette précision est nécessaire en effet, la hauteur des éprouvettes étant identiques une différence de poids entre des éprouvettes entraîne des différences de compacité.

Ce prélèvement est introduit en une seule fois dans le moule très légèrement graissé au moyen d'un pinceau enduit d'oléate de soude glycérine.

Les moules pleins sont ensuite introductifs dans une étuve réglée à la température du malaxage et doivent y séjourner une demi-heure.

5.3 Confection des éprouvettes

Une fois les moules sortis de l'étuve un à un. La pastille supérieure est placée sur la surface de l'enrobé. Les moules sont alors déposés sur le plateau porte moule de la presse (montée et le positionnement se fait automatiquement)

Les pressions appliquées sont :

Duriez normal	60kN
Duriez dilaté	180kN

La pression est maintenue pendant 5 mm, ensuite le plateau revient automatiquement à sa position initiale. On enlève la pastille supérieure après compactage

Les éprouvettes sont démoulées après complet refroidissement.

Durée minimale : 4 h et placées sur une surface plane à température ambiante, afin d'éviter toute déformation.

N.B : (Il est nécessaire que la confection des éprouvettes soit assurée par deux opérateurs afin de procéder le plus rapidement possible aux manipulations et d'éviter toute baisse de température).

5.5 Essais préliminaires

Après démoulage, les éprouvettes soigneusement numérotées sont pesés à 0,5 g près on procède ensuite aux mesures géométriques pour contrôler la fabrication des éprouvettes.

Elles sont mesurées au moyen d'un pied à coulisse au 1/10^e mm à raison de 6 mesures pour la hauteur ; ces mesures devant être reparties sur la périphérie de l'éprouvette.

On calcule ensuite la masse volumique apparente (Mva) à partir des mesures géométriques.

N.B : Les résultats des masses volumiques apparentes doivent être très voisins (la différence ne doit pas excéder $\pm 0,02$ par rapport à la moyenne. Si une différente plus importante apparaît, il est préférable de rejeter soit l'éprouvette soit la série complète.

Afin d'effectuer les calculs ultérieurs, on détermine la masse volumique apparente au moyen de la balance hydrostatique sur deux éprouvettes prélevées au hasard.

5.6 Maturation des éprouvettes

La pesée dans l'eau se fait après paraffinage de l'éprouvette. La paraffine étant à 70°C. On doit vérifier la densité de la paraffine.

Durant les premières 24h, après la fabrication des éprouvettes, celles-ci sont conservées à l'air à température ambiante sur une surface plane.

5.7 Distribution des éprouvettes

On prendra

3 éprouvettes seront conservées à l'air à 18°C pendant 7 jours

3 éprouvettes seront conservées à l'eau à 18°C pendant 7 jours

2 éprouvettes pour la mesure de la masse volumique apparente encore appelée densité hydrostatique

5.8 Conservation des éprouvettes

Ces éprouvettes étant conservées comme expliqué plus haut

Les éprouvettes à conserver à l'eau feront l'objet d'un traitement de dégazage, 24 h après leur confection. Ces éprouvettes sont introduites dans une cloche à vide qui doit être absolument hermétique

Après deux heures, on ouvre la cloche et on sort les éprouvettes que l'on essuie légèrement en les roulants sur un chiffon humide avant de les peser à 0,5 g près

Après la pesée des éprouvettes, on les introduit dans un bain thermostatique réglé à 18 ± 0,5°C. Cette conservation dure 7 jours.

5.9 Essai de compression simple

Après 7 jours de conservation à 18°C ± 0,5 (à sec ou à l'eau) les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression.

Elles sont sorties une à une à l'armoire de conservation. Les éprouvettes sont placées entre les plateaux de la presse en interposant des disques de carton (pour remédier à tout défaut de parallélisme des surfaces d'application de l'effort)

On applique la charge à la vitesse de 1 mm/s jusqu'au moment où se produit la rupture.

Un index mort entraîné par l'aiguille du manomètre permet de repérer la valeur maximum où de l'anneau de la charge appliquée. La résistance à la compression selon cet essai DURIEZ est obtenue en divisant cette charge, l'effort à la rupture exprimée en kg par la surface de l'éprouvette soit 50 cm² dans le cas de l'essai DURIEZ NORMAL et 113 cm² dans le cas de l'essai DURIEZ DILATE.

6- Calculs

- Résistance à la compression simple à l'air ou à l'eau
- Masse volumique apparente par mesures géométriques
- Masse volumique apparente à la balance hydrostatique
- Masse volumique réelle des granulats
- Masse volumique réelle de l'enrobé
- Compacité de l'éprouvette
- Pourcentage des vides résiduels
- Masse volumique apparente des granulats dans l'éprouvette en négligeant l'air et les vides
- Pourcentage des vides occupés par l'air et le bitume
- Pourcentage des vides comblés par le bitume
- Pourcentage d'imbibition

Formules

1- Résistance à la compression simple à l'air ou à l'eau

$$Rc \text{ ou } R'c \text{ (kg/cm}^2\text{)} = \frac{\text{Charge en kg}}{\text{Surface de l'éprouvette (cm}^2\text{)}}$$

On détermine le rapport

$$\frac{R'c}{Rc}$$

2- Masse volumique apparente par mesure géométriques

$$Mva \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Poids de l'éprouvette}}{\text{Volume de l'éprouvette}}$$

Calculée par mesures géométriques

3- Masse volumique apparente à la balance hydrostatique

$$Mva \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Poids de l'éprouvette}}{\text{Volume de l'éprouvette}}$$

(après pesées hydrostatique)

4- Masse volumique réelle des granulats

$$Mva \text{ (g/cm}^3) = \frac{100}{\frac{P1}{MVRg1} + \frac{P2}{MVRg2} + \frac{P3}{MVRg3}}$$

Où P1, P2 et P3 sont les pourcentages en poids des différents granulats
 MVR_{g1}, MVR_{g2} et MVR_{g3} les masses volumiques réelles correspondantes.

5- Masse volumique réelle de l'enrobé

$$Mva \text{ (g/cm}^3) = \frac{100 + P1}{\frac{100}{MVRg} + \frac{P1}{MVR1}}$$

Où P1 est le pourcentage en poids du bitume et MVR1 la masse volumique réelle du bitume

6- Compacité de l'éprouvette

$$C (\%) = \frac{MV1}{MV_R} \times 100$$

7- Pourcentage de vides résiduels

$$Vr (\%) = 100 - C$$

Où C est la compacité de l'éprouvette

8- Masse volumique apparente de granulat dans l'éprouvette en négligeant l'air et les vides

$$MVAg \text{ (g/cm}^3) = MV_A \left(P1 - \frac{P1}{100} + 1 \right)$$

Où P1 est le pourcentage en poids du bitume.

9- Pourcentage des vides occupés par l'air et le bitume

$$V (\%) = \frac{MVRg - MVAg}{MVRg} \times 100$$

10- Pourcentage des vides comblés par le bitume

$$V1 (\%) = \frac{V - V_r}{V} \times 100$$

11- Pourcentage d'imbibition

$$\% \text{ imb} = \frac{P_3}{P_1} \times 100$$

Où P_1 est le poids avant immersion

P_2 est le poids après immersion

$P_3 = P_2 - P_1$: Poids d'eau absorbée pour l'éprouvette après 7 jours d'immersion

BREF RESUME

ESSAI MARSHALL

ESSAI MARSHALL

1- But de l'essai

L'essai Marshall a pour but de déterminer pour une énergie de compactage donnés, la "stabilité" et le "fluage" Marshall d'une éprouvette de dimensions déterminées.

2- Domaine d'application

Il est applicable à tous les enrobé à chaud ne comportant pas de granulats de dimension supérieure à 25mm.

3- Appareillage

3.1 Appareillage spécifique

- Des moules de compactage comportant chacun une base, un corps de moule, une hausse. Le corps de moule doit avoir 101,6mm de diamètre intérieur et 76 mm de hauteur.
- Des pistons extracteurs de diamètre légèrement inférieur au diamètre intérieur du moule
- Une dame de compactage manuel comportant un marteau pesant 1,536 kg qui coulisse dans une lige de guidage et tombe en chute libre de 457mm sur la base
- Un bloc support de moule en chêne de dimensions 300 x 300 x 150 mm muni de deux boulons de calage pour moule.
- Un moule d'essai de stabilité, composé de deux mâchoires est fixé sur une base comportant deux tiges de guidage pour centrer parfaitement la mâchoire supérieure

3.2 Appareillage d'usage courant

- Une presse d'écrasement d'une capacité d'au moins 60KN pouvant assurer une vitesse de rapprochement constante des plateaux de 0,846 mm/s
- Une étuve pour la mise en température des granulats ayant une gamme de température de 50 à 200°C ± 1°C

Essais Géotechnique

- Un malaxeur mécanique
- Une balance hydrostatique de portée 2 Kg avec une précision de $\pm 0,1\text{g}$
- Une balance précise à $0,5\text{g}$ pour la pesée des granulats ayant et du bitume
- Un bain thermique réglable à $60 \pm 0,5^\circ\text{C}$ pouvant contenir au moins 4 éprouvettes, munies d'un thermomètre de contrôle
- Un thermomètre métallique gradué de 0 à 200°C pour le contrôle de la température du liant
- Un pied à coulisse au 1/50
- Un chronomètre
- Un récipient métallique de 1 litre pour le liant
- Un réchaud à gaz (avec plaque chauffante)
- Des gants d'amiante pour la manipulation des matériels chauds
- Des mains métalliques pour la manutention des granulats et de l'enrobé
- Une spatule en acier inoxydable à manche de bois (longueur de lame 200mm) et un couteau de vitrier pour le nettoyage des pâles du malaxeur.
- Glycérine ou paraffine (ayant une masse volumique réelle $0,85 - 0,90$)
- Des disques en papier filtré de 100 mm de diamètre ou en papier siliconé

4- Durée de l'essai

5- Mode opératoire

5.1- Préparation des prises d'essai

Prélever chaque fraction de granulats entrant dans la composition de l'enrobé, à partir de lots de granulats préalablement séchés et parfaitement homogénéisés. La quantité prélevée doit permettre de confectionner une gâchée de 6 à 10 kg de granulats selon l'étude.

Préparer également un récipient métallique la quantité du liant nécessaire à l'enrobage de cette gâchée (plus 50g environ pour sécurité).

Au moment du mélange pour les enrobés à chaud à buse de bitume pur, les températures des granulats du bitume et les matériels sont définis comme suit :

Enrobé à base de bitume 40/50 160°C

Enrobé à base de bitume 60/70 150°C

Enrobé à base de bitume 80/100 140°C

Essais Géotechnique

Placer tous les granulats prélevés y compris le filer dans une cuve de malaxeur de préférence, sinon dans un récipient de capacité analogue. L'ensemble devra séjourner au moins 4 heures dans une étuve à la température de malaxage définie ci-dessous.

Les différents matériels, comme la cuve de malaxeur moules, de compactage, piston devront être également à la même température (2 heures minimum à l'étuve).

Le chauffage du liant doit être effectué en deux phases.

* Ramollissement à l'étuve à la température de malaxage pendant 30 mns environ.

* Mise en température sur la plaque chauffante (réchaud) ; pour éviter tout risque de surchauffage enfin de permettre une homogénéisation. Agiter constamment le bitume (lorsque la température du liant est à 10°C au dessus de la température définitive réduire le chauffage, afin de ce pas dépasser cette température.

5.2- Malaxage

Si les granulats n'ont pas été chauffés directement dans la cuve du malaxeur, les verser doucement (pour éviter une perte éventuelle de filer) dans la cuve de malaxeur à la même température. Cette cuve est centrée sur le malaxeur.

Actionner le malaxeur d'abord à blanc avec quelques tours pour mélanger les différents granulats.

Verser la quantité nécessaire de liant qui ne doit s'écarte de plus de 0,10% de la quantité théorique. La durée du malaxage n'est pas imposée. On doit l'apprécier visuellement jusqu'à l'homogénéisation correcte. Elle est généralement de l'ordre de la minute. Après le malaxage gratter la palette à l'aide du couteau de vitrier et mélanger tout d'abord l'enrobé au moyen d'une main métallique qui servira aux prélèvements.

5.3- Remplissage des moules

En fin de malaxage, sortir de l'étuve les moules de compactage dans l'ordre 1-2 – 3 – 4 – 5 (qui sera de remplissage et de démoulage) et les graisser.

Avant chaque pesée, mélanger la gâchée à l'aide d'une pelle afin d'éviter toute ségrégation.

Peser la quantité de mélange correspondant à une éprouvette, quantité qui aura été déterminée à partir de l'éprouvette témoin.

Introduire cette quantité d'enrobé dans la moule en une seule fois après avoir déposé au fond de ce moule un disque en papier filtre ou siliconé, remplir successivement les 4 autres moules.

Pour assurer un bon état de surface latérale de l'éprouvette et pour éviter une disparition trop grande des résultats, introduire une spatule (chauffée à la température de malaxage) le long de la

Essais Géotechnique

paroi du moule et effectuer environ trente fois un mouvement de haut en bas en décrivant trois fois le tour, sur toutes la hauteur de l'enrobé foisonné.

Assurer le surfacage supérieur à l'aide du piston extracteur chaud en faisant pivoter celui-ci trois ou quatre fois au contact de l'enrobé

5.4 Confection de l'éprouvette témoin

La confection de l'éprouvette témoin a pour but de déterminer la quantité d'enrobé nécessaire pour confectionner des éprouvettes ayant une hauteur de 63,5mm hauteur pour laquelle il n'est pas nécessaire de corriger la valeur de stabilité.

En effet connaissant la hauteur d'une éprouvette d'un poids donné, on déduit*****

Cette éprouvette est confectionnée à partir d'une gâchée de 1200g de granulats (les granulats et liants étant soumis aux conditions décrites. Cette éprouvette pouvant être fabriquée à partir d'un mélange malaxé manuellement, à l'aide d'une cuillerée préalablement chauffée à la température du mélange. Ce mélange ne devra pas être effectué sur une plaque chauffante (réchaud) afin d'éviter le risque de surchauffe.

Compacteur cette éprouvette dans les même, conditions que les éprouvettes d'essais, puis la mesurer à l'aide d'un pied à coulisse. Effectuer au moins 6 mesures de la hauteur en les répartissant sur le pourtour de l'éprouvette. Seule la moyenne de ces 6 mesures sera retenue.

5.5 Confection des éprouvettes d'essais

En général 5 éprouvettes sont confectionnées par teneur en liant.

3 sont destinées à la détermination de la stabilité Marshall

2 à la mesure de densité hydrostatique

* Fixer la moule contenant l'enrobé sur le socle en bois

* Mettre un disque de papier filtre sur la surface de l'enrobé en 55s

* Laisser tomber 50 coups de marteau de la dame sur l'enrobé en 55s environ, la dame étant maintenue perpendiculaire au moule.

* Retourner le moule rapidement après avoir dévissé la hausse, afin de présenter la face inférieure de l'éprouvette au compactage et laisser tomber à nouveau 50 fois le marteau dans le même temps.

La durée du compactage des deux faces de l'éprouvette de doit pas excéder 3mrs afin d'éviter le risque de refroidissement.

* Placer ensuite le moule pendant 15mns sous un jet d'eau froide, maintenu de façon qu'il ne moule pas l'enrobé puis le laisser une heure à la température ambiante avant démolage.

Essais Géotechnique

* Effectuer le démoulage en mettant une légère pression sur le piston extracteur, placé au contact de l'enrobé

* Compackter les éprouvettes dans l'ordre de remplissage 1- 2 – 3 -4- et 5.

L'éprouvette n° 1 est immédiatement compactée après remplissage des moules 2-3-4 et 5 sont placées après remplissage dans l'étude de la température de fabrication.

5.6 Mesures préliminaires

Après démoulage, placer les éprouvettes sur une surface plane et retourner plusieurs fois afin d'éliminer l'humidité de surface qui se produit lors du refroidissement, puis les numérotter.

Peser ensuite les éprouvettes au décigramme près puis les mesurer au moyen d'un pied à coulisse à raison d'au moins 6 mesures pour la hauteur et 3 mesures pour le diamètre. Les mesures sont reparties sur le pourtour de l'éprouvette.

Calculer la masse volumique apparente obtenue à partir des mesures géométriques et retenir 2 éprouvettes ayant les valeurs les plus proches de la valeur moyenne pour les mesures de densité hydrostatique.

A noter qu'une éprouvette ne doit s'écarte de plus de 2/100 par rapport à cette valeur moyenne ; sinon la fabrication ne serait pas constante et il sera préférable de la rejeter.

Pour chaque éprouvette la moyenne des mesures de hauteur doit être comprise entre 62mm et 65mm avec une tolérance pour chaque mesure $\pm 1,5$ mm par rapport à la moyenne.

5.7 Essais de stabilité et de fluage Marshall

Les éprouvettes, conservée à la température ambiante sont soumise à l'eau de compression le lendemain soit un temps d'attente variant de 18 à 24 heures.

Une demi-heure avant l'essai, immergé les éprouvettes dans un bain thermostatique à 60°C $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Ce temps d'immersion est impératif.

Il est donc nécessaire d'échelonner les mises à l'immersion compte tenu de la durée de l'essai ; les éprouvettes seront donc immergées toutes les 5mns dans l'ordre 1-2-3 ainsi que les moules d'essai dont on aura vérifié auparavant le bon état de fonctionnement.

Au moment de l'essai, retirer le moule de l'eau, enlever la mâchoire supérieure, graisser les tiges de guidage au moyen de graisse aux silicones. Introduire l'éprouvette dans la mâchoire inférieure, replacer la mâchoire supérieure et porter l'ensemble immédiatement entre les plateaux de la presse dont la vitesse aura été réglée à 0,846 mm/s. Amener le piston en contact avec la mâchoire supérieure.

Essais Géotechnique

Prendre les lectures initiales sur les tiges de guidage (à droite et à gauche) à l'aide d'un fleximètre, pour déterminer le fluage ; puis déclencher le mécanisme d'avancement de la presse.

La stabilité Marshall est l'effort maximale enregistrée, corrigée éventuellement en fonction de la hauteur, dès que cette valeur est atteinte, on stoppe l'avancement pour pouvoir mesurer le fluage (nouvelles mesures sur les tiges de guidage, le fluage étant la différence entre les mesures finales et initiales).

5.8 Calculs

A- La stabilité Marshall à 60°C est exprimée en kilogramme et représente la moyenne des résultats sur les trois éprouvettes.

B- Le fluage Marshall est exprimé en 1/10mm et représente la moyenne des affaissements des 3 éprouvettes.

Les autres résultats seront présentes de la façon suivante

C- Masse volumique apparente de l'éprouvette

C_1 : les mesures géométriques

C_2 : les mesures après pesées hydrostatiques (MVA)

Masse volumique réelle des granulats (MVRg)

D- Compte tenu de la masse volumique réelle de chacun d'entre eux et de leurs propositions dans le mélange des granulats. En appelant P1, P2, P3, etc. ...

Les pourcentages en poids des différents granulats et $MVRg_1$, $MVRg_2$, $MVRg_3$ etc... les masses volumiques réelles correspondantes on a :

$$MVRg = \frac{100}{\frac{P_1}{MVRg_1} + \frac{P_2}{MVRg_2} + \frac{P_3}{MVRg_3}}$$

E- Masse volumique de l'enrobé (MVR). Compte tenu de MVRg et de la masse volumique réelle de liant, ainsi que leur proposition dans l'enrobé et en appelant P1 le pourcentage en poids du liant et MVR1 sa masse volume réelle on a :

$$MVR = \frac{100 + P_1}{\frac{100}{MVRg} + \frac{P_1}{MVR1}}$$

Essais Géotechnique

F- Compacité de l'éprouvette

$$C = \frac{MV_1}{MVR} \times 100$$

G- Pourcentage des vides résiduels

$$V_r = 100 - C$$

Où C est la compacité de l'éprouvette

H- Masse volumique apparente du granulat dans l'éprouvette

$$MVAg = MVA \left[1 - \frac{P1}{100 + P1} \right]$$

I- Pourcentage des vides

I.1 occupés par l'air et les liants

$$V = \frac{MVRg - MVAg}{MVRg} \times 100$$

I.2 Comblés par le liant

$$V_L = \frac{V - V_r}{V} \times 100$$

BREF RESUME

DETERMINATION DE LA TENEUR EN BITUME D'UN ENROBE

"METHODE KUMAGAWA " DETERMINATION DE LA TENEUR EN BITUME D'UNE ENROBE "METHODE KUMAGAWA "

1- But de l'essai

L'essai a pour but de déterminer la teneur en liant et la teneur en eau d'un matériau bitumineux par une méthode indirecte, c'est à dire par différence entre le poids de matériau avant désenrobage et le poids des granulats après désenrobage. Il n'est pas applicable aux matériaux riches en fixes.

2- Domaine d'application

Il est utilisé dans la fabrication et mise en œuvre des enrobés pour la réalisation des couches de surface de chaussée en béton bitumineux. La méthode Kumagawa n'est pas applicable aux matériaux très riches en fines, comme les mastites bitumineux et les asphaltés purs, il se produit alors un colmatage de la cartouche.

3- Appareillage

3.1 Appareillage spécifique

Un extracteur Kumagawa comprend :

- * Un chauffe-ballon semmerstat
- * Un ballon en verre de un ou deux litres de capacité
- * Un décanteur Dean et Stark (avec robinet de purge dans le ras des graves-émulsion et enrobés denses à l'émulsion)
- * Un réfrigérant
- * Un manié constitué de trois tiges de cuire et d'une toile de cuire retenant de cartouches Durieux ou Schleicher et Schull
- * Un système de filtration sous pression ou sous vide et du papier filtre Seltz EKS.

3.2 Appareillage et produits d'usage courant

- Une élève
- Une balance, de portée 4kg à 0,5g près
- Une balance, de portée 800g à 0,5g près
- Une balance, de portée 160g à 0,001g près
- Un grand dessiccateur
- Un four à moufle
- Bacs d'aluminium, papier filtres, verrerie
- Solvant : toluène technique ou xylène

4- Durée de l'essai 1jour

5- Mode opératoire

- **Préparation de l'échantillon :** Pour la prise d'échantillon, se référer au prélèvement au cadre à la sortie du malaxeur et à la pelle dans un camion ou derrière un fournisseur.
- Dans le cas d'un matériau stocké, on pourra l'introduire froid par petites fractions.
Si la désagrégation est difficile, on le réchauffera à une température inférieur à 100°C (cela n'est pas valable pour les graves- émulsion et les enrobés denses à l'émulsion)
- Toutes les pesées seront effectuées à froid ; matériau seront conservés
Dans un dessiccateur entre les différentes opérations
- Sécher la cartouche, munie antérieurement d'un papier filtre, à l'étuve à 120°C jusqu'à obtention d'un poids constant, soit P1, définie à 0,05g près ;
- Introduire dans la cartouche la quantité de matériau bitumineux. Peser ont P2. Le poids d'enrobé est PE = P2- P1
- Remplir le ballon jusqu'à moitié du toluène ou du xylène, placer la Cartouche dans son panier et l'introduire dans le ballon,
- Graisser les rodages de chaque élément de l'extracteur
- Monter le décanteur Dean et Stark et le collier de serrage, adapter le réfrigérant et l'alimenter en eau.
- Brancher le Chauffe - Brion ; le simmorstat étant règle au maximum de température ; le régler en cours d'essai de telle sorte que l'enrobé soit complètement immerger dans le solvant mais que celui-ci ne déborde pas de la cartouche.
- Lorsque le solvant coule clair, arrêter (l'exécution jusqu'à égouttage total de la cartouche, puis remettre en fonctionnement. La durée de désenrobage est variable selon la nature et la quantité d'enrobé (2 à 10 heures environ)

Essais Géotechnique

- Arrêter le chauffage, lire la quantité d'eau sur le décanteur Dean et Stark à 0,1 cm³ près, soit Peau
- Laisser refroidir l'appareil et égoutter la cartouche, retirer la cartouche de l'appareil et la placer dans une étuve ventilée à 120°C jusqu'à obtention d'un poids constant ; soit P3
Le poids du granulat extrait : PG = P3-P1

NB : Penser à la correction des fines.

Une partie des fines traverse la cartouche et se retrouve dans la solution du liant. Il est nécessaire de procéder à la récupération un moyen soit d'une infiltration soit d'une calcination.

a- Filtration

- * Placer dans l'appareil de filtration d'un filtre Seltz EKS préalablement séché à 120°C à poids constant, soit P4 à 0,05g près
- * Verser la solution bitume solvant dans l'appareil à filtrer et rincer très soigneusement le ballon avec du toluène ou du xylène
- * Mettre sous pension (3kg) ou sou vide (trompe à eau) selon le matériel disponible
- * Rincer avec du toluène ou du xylène jusqu'à ce que le solvant de lavage ne soit plus coloré
- * Séché le filtre ayant retenu les fines en étuve à 120°C jusqu'à obtention D'un poids constant, soit P5, à 0,05g près

b- Balcination

- * Mesurer le volume de la solution, de liant une fiole jaugée, en l'ajustant :
Soit V volume de la solution.
- * Agiter énergiquement et prélever immédiatement 50 cm³ de solution à l'aide d'une pipette munie d'une propipette
- * Laisser évaporer le solvant sous hotte
- * Calciner dans le four à moufle à une température de 650°C ;
- * Peser les fines résiduelles dans la capsule soit P7 le poids des fines est

$$PF = \underline{P7-PC} \times V$$

50

- ❖ Effectuer la détermination sur deux prélèvements de 50cm³

c- Analyse granulométrique

- ❖ Ouvrir la cartouche, bien la brosser ainsi que le papier filtre, puis réunir les particules numérales ainsi obtenues ceux granulats extraits. Ajointer le poids P.F au poids de finis déterminé par granulométrie, selon le mode opérateur

Essais Géotechnique

- ❖ Tous les essais seront effectués en double. Si les écarts des résultats de Teneur en liant s'écartent de moins en liant s'écartent de moins de 0,4% En valeur absolue, effectuer la moyenne des essais. Si cet écart est Supérieur à 0,4% recommencé sur des presses différentes.

6- Calculs

Les résultats seront calculés de la façon suivante

PE : poids de l'enrobé

Puau : Poids de l'eau

PG : poids des granulats

PF : poids des fines

a) Teneur en liant /enrobé : $\frac{PE-(PG+Peau+Pf)}{PE} \times 100$

b) Teneur en liant /granulats : $\frac{PE-(PG+Peau+Pf)}{PG} \times 100$

c) Teneur en eau /enrobé : $\frac{Peau}{PE} \times 100$

d) Teneur en eau /granulats : $\frac{Peau}{PG+Pf} \times 100$

L'erreur sur la teneur en liant est de l'ordre de 2% en valeur relative

SPECIFICATIONS

Notons bien : Nous donnerons ici certaines valeurs juste pour avoir une idée des essais que nous allons réaliser, mais néanmoins les valeurs donnée dans la CCT-P restent les plus viables.

I – LES SOLS

1 Matériaux pour remblais courants

Dimension maximale des grains	Dmax = 40mm
Indice de plasticité	IP < 35
Pourcentage des frais	F < 30
Indice portant CBR	CBR > 15

I. 2 Matériaux pour remblais de substitution en zone marécageuse

Dimension maximale des grains	Dmax = 40mm
Indice de plasticité	IP < 20
% des passants à 10 mm	35 à 100
% des passants à 5mm	45 à 85
% des passants à 2mm	

I .4 Matériaux pour rechargement de chaussée

Dimension maximale des grains	Dmax = 31,5mm
Indice de plasticité	IP < 25
% des passants à 10 mm	65 à 100
% des passants à 5mm	45 à 85
% des passants à 2mm	30 à 38
% de frais	F < 30
densité sèche maximale	$\delta_{\text{dmax}} > 1,8 \text{t/m}^3$
Indice portant	CBR > 30

II LES GRANULATS

Coefficient d'aplatissement	$A \leq 30\%$
Absorption d'eau	$Ab < 5\%$
Fiabilité des sables	$Fs \geq 40$
Los Angeles	$LA \leq 40 (35)$
Micro Deral	$MDE \leq 35$
Homogénéité	$H \geq 90\%$
Equivalent de sable de rivière	$ES \geq 75\%$
Equivalent de sable concassé	$ES \geq 65\%$
Propreté des gravillons	$P \leq 2\%$

III LES BETONS

Béton très ferme	ΔH Affaissement	$0 < \Delta H < 3\text{cm}$
Béton ferme		$3 < \Delta H < 6\text{cm}$
Béton normal		$6 < \Delta H < 9\text{cm}$
Béton mou		$9 < \Delta H < 13\text{cm}$
Béton très mou		$\Delta H > 13\text{cm}$
Béton armé courant		$5 \text{à} 7\text{cm}$

Béton très ferme	ε Etalement	$10\% < \varepsilon < 30\%$
Béton ferme		$30\% < \varepsilon < 60\%$
Béton normal		$60\% < \varepsilon < 80\%$
Béton mou		$80\% < \varepsilon < 100\%$
Béton très mou		$\varepsilon > 30\%$

IV LES LENTS HYDROCARBONES

IV. 1 Les bitumes purs

Bitume	Pénétrabilité à 25°C	Point de Romol BA	Température de pompage	Point d'éclair supérieur à	Densité moyenne	Température d'enrobage
20/30	20 et 30	52 et 65	135	250	1,05	180
40/50	40 et 50	47 et 60	125	250	1,05	170
60/70	60 et 70	43 et 56	120	230	1,05	165
80/100	80 et 100	41 et 51	115	230	1,03	155
180/220	180 et 220	34 et 43	105	230	1,03	145

IV 2 Les bitumes fluidifiés en cut back

Essais	Bitumes fluidités ou cut back		
	400 /600	10/15	0/1
Densité	0,92-1,04	0,85-1,04	0,85-1,04
Utilisation fractionnée (résultats exprimés en % de vol metrial)			
190°C	0	-	9
225°C	>2%	11	10-27
315°C	5-12%	16-20	30-45
360°C	>15	≤32	≤47
irétralité à 25°C/100g 5s du rendu de distillation à 360°C sect° visconté à 25°C en * STV (BRTA) ou fixe 10mm	80-200 400-600	80-200 10-15	80-200 0-1

IV.3 des émulsions

IV.3. a- Les émulsions anioniques

Catégorie	Rapide				lente			surstabilisé	
Classe	EAR 50	EAR 46	EAR 60	EAL 65	EAL 55	AEL 60	AEL 65	EAS 55	EAS 60
Teneur en eau en % ≤ à	51	46	41	36	46	41	36	46	41
Pseudo-viscosité	<45	<115	15 à 230	>45	<115	15 à 230	>45	<115	15 à 230

IV.3.b- Les émulsions catroniques

catégorie	rapide			Semi-rapide			lente			surstabilisé	
Classe	ECR 60	ECR 65	ECR 69	ECM 60	ECM 65	ECM 69	ECL 55	ECL 60	ECL 65	ECS 55	ECS 60
Teneur en eau ≤ à	41	36	32	41	36	32	46	41	36	46	41
Pseudo viscosité	15 à 115	>45	>115	15 à 230	>45	<115	15 à 115	>45	<115	<115	15 à 230
Indice de rupture ICPC		<100		80 à 140				>120			Essai de ciment

Essais Géotechnique

IV.3.c- Fines siliceuses à utiliser dans les émulsions.

Densité	:	2,6
Ph	:	7,8
<u>Analyse Chimique</u>		
• Perte au feu	:	0,10%
• Silice totale (Si O ₂)	:	98,27%
• Alumine (Al ₂ O ₃)	:	0,70%
• Oxyde de titane (Ti O ₂)	:	0,20%
• Oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	:	0,21%
• Chaux (Ca O)	:	0,13%
• Magnésie (Mg O)	:	0,08%
• Potase (K ₂ O)	:	0,06%
• Soude (Na ₂ O)	:	0,02%