



MATERIAUX ET GEOTECHNIQUE

E1: Matériaux du génie civil

Prof. Ahmed Barakat
FST Béni-Mellal

1. Introduction

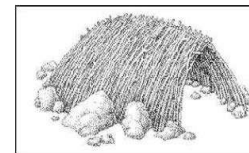
- Depuis toujours l'Homme utilise les matériaux naturels du sous-sol, les roches, pour ses industries et ses constructions.
- Les premiers outils préhistoriques, galets aménagés, datent d'environ 2Ma. Depuis, l'humanité n'a cessé d'extraire les diverses matières minérales dont elle a besoin pour vivre et se développer.

Plan du cours

1. Introduction
2. Généralités sur les matériaux
3. Propriétés des matériaux de construction
4. Classification des matériaux de construction
 - Pierres naturelles – Granulats
 - Liants et bétons
 - Formulation du béton
 - Fonte et aciers
 - Bitumes
 - Matériaux routiers
 - Béton armé
5. Généralités sur la durabilité des matériaux de construction
6. Quelques exemples de dégradation

1. Introduction

Se loger/abriter = un des besoins fondamentaux des êtres



1. Introduction

Matériaux	1ere usage	T prod.
brique en boue et argile	8000 av. JC	
obj. en céramique, briques et terre cuite	6000 av. J.C.	
mortier pour les joints de briques en bitume	5000 av. J.C.	
murs en briques couverts d'un enduit de gypse	5000 av. J.C.	180°C
encadrements des portes en bois, poutre en bois	5000 av. J.C.	
agrégats et fibres pour l'armature	5000 av. J.C.	
travaux en cuivre et bronze	4000 av. J.C.	
objets en verre	3000 av. J.C.	
mortier de chaux et chaux hydraulique	1000 av. J.C.	800 – 1000°C
béton à base de chaux hydraulique, ciments pouzzolaniques	100 av. J.C.	1100°C

1. Introduction



Ironbridge
premier pont en fer, 1779



Hoover Dam
premier barrage en béton, 1936

1. Introduction

Matériaux	1ere usage	T prod.
Ironbridge, UK	1779	
ciment hydraulique, Edison lighthouse	1793	1300°C
béton à base de ciment Portland (Joseph Aspdin)	1824	1450°C
Béton armé (Monier)	1848	
Tour Eiffel	1889	
First reinforced concrete bridge	1889	
ciment alumineux	1914	1600°C
béton précontraint	1929	
béton haute performance	1980s.	
béton ultra haute performance	2000	

2. Généralités sur les matériaux

Matériau :

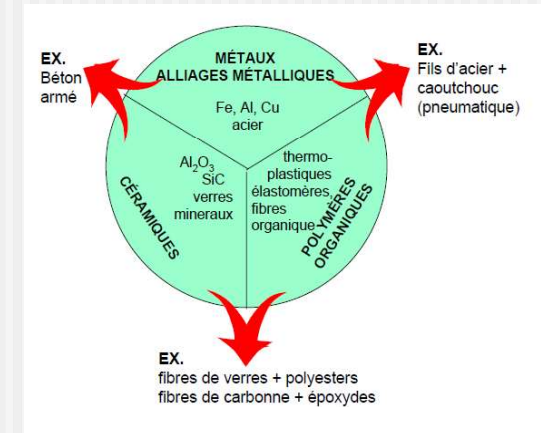
- Matières premières, à l'état brut, que l'on utilise pour fabriquer des objets divers ;
- Origine naturelle (granulats, caoutchouc, soie, bois, ...) ou artificielle (fabriquée par l'homme, cas de acier , béton, verre ...)

2. Généralités sur les matériaux

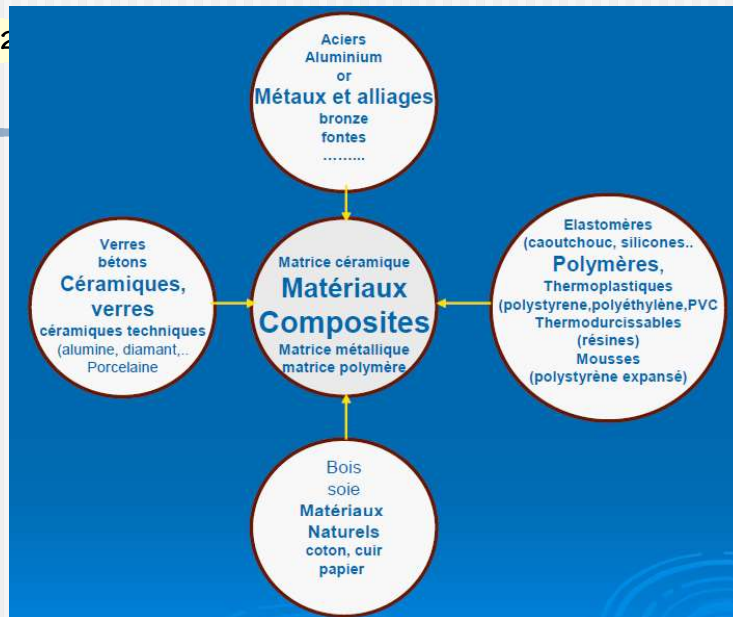
En sciences des matériaux, les matériaux solides classés en trois catégories :

- Métaux, céramiques, polymères en fct de la nature de la liaison
- Matériaux naturels ;
- Matériaux composites

2. Généralités sur les matériaux



2



2. Généralités sur les matériaux

Matériaux de construction :

- Ensemble de matériaux utilisés dans le domaine de construction.
- Sont de nature :
 - minéral
 - métallique
 - plastique
 - composite

Matériaux métalliques



Matériaux organiques



Galets



Sable

Matériaux minéraux



Matériaux composites

2. Généralités sur les matériaux

Dans le domaine de la construction, les matx classés selon leur usage en :

➤ matx de protection ayant la propriété d'enrober et de protéger les matx de construction principaux:

- ✓ Enduits
- ✓ Peintures
- ✓ Bitumes, etc

2. Généralités sur les matériaux

• Dans le domaine de la construction, les matx classés selon leur usage en :

➤ matx de structure ayant la propriété de résister contre des forces importantes et d'assurer la stabilité de l'ouvrage:

- ✓ Pierres
- ✓ Terres cuites
- ✓ Bois
- ✓ Béton
- ✓ Acier, etc.

3. Propriétés des matériaux de construction

Connaissance des propriétés des matériaux => prévoir leur capacité à résister sous des conditions diverses.

Choix du matériau le plus adapté aux applications envisagées

critères de choix des matériaux doivent tenir compte des facteurs suivants :

- fonctions principales de la construction : modes de mise en charge, des températures et des conditions générales d'utilisation.
- comportements intrinsèques du matériau : résistance à la rupture, à l'usure, à la corrosion, conductibilité ...
- prix du revient des diverses solutions possibles

3. Propriétés des matériaux de construction

Fonctions des matx de Construction :

- ✓ Mécanique :
 - stabilité pour ne pas s'effondrer :
 - rigidité
 - résistance en compression
 - résistance en tension
 - durabilité :
 - fluage
 - relaxation

3. Propriétés des matériaux de construction

Connaissance des propriétés des matériaux ==> prévoir leur capacité à résister sous des conditions diverses.

Chaque matériaux possède des propriétés :

- Propriétés physiques: dimension, densité, masse volumique, porosité, l'humidité, ...,
- Propriétés mécaniques: résistance en compression, en traction, en torsion, ...

3. Propriétés des matériaux de construction

Fonctions des matx de Construction :

- ✓ Echanges avec l'extérieur :
 - éviter la pénétration de pluie, de neige, de vent :
 - étanchéité
 - thermiques : isolation thermique
 - phoniques
 - optiques

3. Propriétés des matériaux de construction

Chaque matériaux possède des propriétés :

- Propriétés chimiques: résistance à la corrosion, aux acides...
- Propriétés physico-chimiques: absorption, perméabilité, retrait, le gonflement, ...
- Propriétés thermiques: dilatation, résistance, comportement au feu, ...

3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Quelques caractéristiques et propriétés physiques sont:

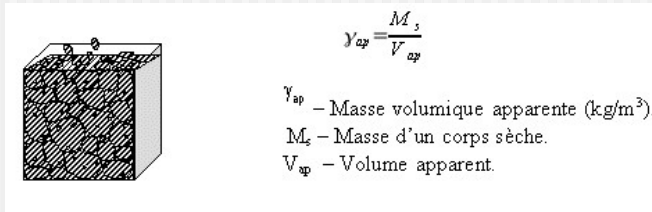
- Propriétés liées à la masse et au volume:
Masse spécifique
Masse volumique
Porosité, densité
- Propriétés liées à l'eau:
Humidité
Perméabilité
Degré d'absorption d'eau
Variation de dimension en fonction de la teneur en eau
- Propriétés thermiques:
Résistance et comportement au feu
Chaleur spécifique
Coefficient d'expansion thermique

3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Masse volumique apparente

b) Pour les matériaux incohérents (sable ou gravier), on utilise un récipient standard (de volume connu).



La masse volumique est fortement influencée par la granulométrie, la forme des grains, le degré de tassement et la teneur en eau.

3. Propriétés des matériaux de construction

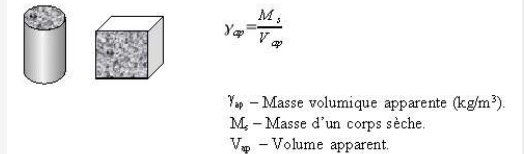
Propriétés physiques

Masse volumique apparente

Est la masse d'un corps par unité de volume apparent, après passage à l'étuve à 105 ± 5 ° C, notée γ_{ap} et exprimée en (g/cm³, kg/m³, T/m³).

Sa détermination se fait selon la dimension et la dispersion des matériaux de construction :

a) Pour les matériaux solides (roches naturelles, le béton, le bois, ...), on fait des échantillons de forme géométrique (cubique, cylindrique, ..).



3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Masse volumique apparente

c) Pour les matériaux de construction qui n'ont pas de forme géométrique (forme de patate), on les enrobe de paraffine pour les protéger de la pénétration de l'eau, ensuite on les pèse dans l'eau.

3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Masse volumique apparente

- MS: Masse sèche d'échantillon (g)
 MS+P: Masse sèche d'échantillon après avoir enrober une paraffine (g).
 M(S+P)L: Masse sèche d'échantillon après avoir enrobé de paraffine et pesé dans l'eau (g).
 gP: Masse de la paraffine ayant enrobé l'échantillon.
 γ_p : Masse volumique absolue de paraffine.

$$\gamma_o = \frac{M_s}{\frac{(M_{S+P} - M_{(S+P)L}) \cdot \frac{g_p}{\gamma_p}}{1}}$$

$M_{S+P} - M_{(S+P)L}$ - est la poussée d'Archimède.

$\frac{(M_{S+P} - M_{(S+P)L})}{1}$ - volume apparent d'échantillon absorbée par la paraffine.

$\frac{g_p}{\gamma_p}$ - volume de paraffine.

3. Propriétés des matériaux de construction

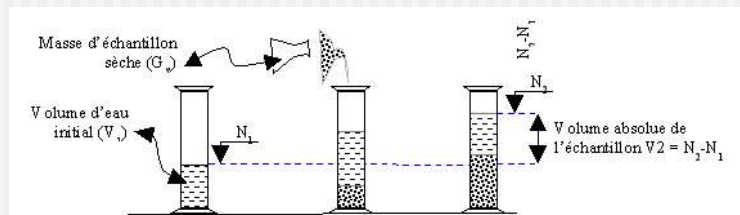
Propriétés physiques

Masse volumique absolue

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (pores à l'intérieur des grains exclus), après passage à l'étuve à 105 ° C, notée γ et exprimée en (g/cm³, kg/m³ ou T/m³).

Les matériaux poreux sont concassés et broyés pour avoir des grains de taille inférieure à 0,2 mm, et ce afin d'éliminer les pores et vides.

Puis, on verse l'échantillon dans un récipient contenant de l'eau pour déterminer la masse volumique absolue.



3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Masse volumique apparente

Principe d'Archimède :

Énoncé:

Tout corps plongé dans un fluide reçoit de la part de ce fluide une force (poussée) verticale, vers le haut dont l'intensité est égale au poids du volume de fluide déplacé (ce volume est donc égal au volume immergé du corps).

Formules:

$$F_A = \rho_{\text{fluide}} \cdot V_i \cdot g$$

$$F_A = G - G_{\text{app}}$$

Légende des symboles et leur [unité SI]:

- F_A → poussée (ou force) d'Archimède en [N]
 ρ_{fluide} → masse volumique du fluide en [kg/m³]
 V_i → volume immergé du corps en [m³]
 g → gravité en [N/kg] (ou accélération de la pesanteur en [m/s²])
 G → poids du corps en [N]
 G_{app} → poids apparent du corps en [N]

3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Masse volumique absolue

- 1) On remplit le volumétre d'eau (N1),
- 2) On verse l'échantillon sec dans le volumétre et le niveau de l'eau va augmenter (N2).

La différence entre le niveau N1 et N2 est le volume absolu de l'échantillon. La masse volumique absolue peut se calculer:

$$\gamma = \frac{M_s}{N_2 - N_1}$$

Si les grains ne sont pas poreux, la masse spécifique absolue et apparente sont identiques

$$\gamma_{\text{granulats usuels}} = 2,60 \text{ à } 2,70 \text{ (en moyenne } 2,68)$$

À la place de la masse volumique, on utilise aussi les dénominations de poids spécifique, de poids volumique ou de densité apparente

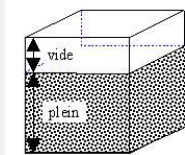
3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Porosité et la compacité

Porosité :

La porosité est le rapport du volume vide au volume total.



Volume quelconque

Elle est définie aussi comme le volume de vide par unité de volume apparent.

$$p = \frac{V_v}{V}$$

3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Porosité et la compacité

Quand on connaît la masse volumique apparente γ_{ap} et la masse spécifique γ_0 d'un matériau, il est facile de calculer sa compacité et porosité.

$$c = \frac{\text{volume de plein}}{\text{volume total}} = \frac{V_{\text{absolu}}}{V_{\text{apparent}}} = \frac{V_{\text{absolu}}}{V_{\text{apparent}}} \cdot \frac{M}{M} = \frac{M/V_{\text{apparent}}}{M/V_{\text{absolu}}}$$

d'où $c = \frac{\gamma_{ap}}{\gamma}$ ou, exprimée en %,

$$c \% = 100 \frac{\gamma_{ap}}{\gamma}$$

$$p \% = 100 \left(1 - \frac{\gamma_{ap}}{\gamma}\right)$$

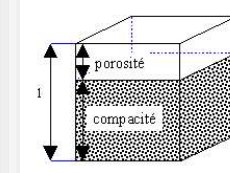
3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Porosité et la compacité

Compacité:

Est le rapport du volume des pleins au volume total.



Volume unitaire

$$C = \frac{V - V_v}{V} = 1 - \frac{V_v}{V}$$

La porosité et la compacité sont liées par la relation : $p+c=1$

Elles sont souvent exprimées en %.

3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Humidité

Teneur en eau réelle des matériaux.

Notée W et s'exprime en %.

Déterminée en utilisant la formule:

$$W = \frac{G_k - G_s}{G_s} \cdot 100\%$$

G_s : masse sèche d'échantillon (après passage à l'étuve).

G_n : masse humide d'échantillon.

Le degré de l'humidité dépend surtout de l'atmosphère où ils sont stockés, du vent, de la température, et de la porosité du matériau.

3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Absorption de l'eau

Est la capacité de conserver des matériaux quand ils sont immergés au sein de l'eau à T° de 20,5 °C et à la P atm.

L'eau pénètre dans les vides interstitiels du matériau; donc plus la porosité est importante, plus l'absorption de l'eau est grande mais reste inférieure à la porosité.

On peut déterminer le degré d'absorption de deux manières:

3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Absorption de l'eau

a) L'absorption calculée suivant la masse du volume apparent d'échantillon, notée H_v (%).

$$H_v = \frac{G_{ab} - G_s}{V_0} \cdot \%$$

G_{ab} : est la masse absorbante.

G_s : est la masse sèche d'échantillon.

V_0 : est le volume apparent du matériau.

b) L'absorption calculée suivant la masse de l'échantillon, notée H_p (%).

$$H_p = \frac{G_{ab} - G_s}{G_s} \cdot \%$$

G_{ab} : masse absorbante.

G_s : masse sèche d'échantillon.

3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Degré de Saturation (Teneur en eau)

Un des plus importants facteurs influençant la résistance des matériaux est le degré de saturation, parce que l'eau absorbée diminue la résistance des matériaux.

Lorsque tous les vides d'un corps sont remplis d'eau, le corps est dit saturé.

Le degré de saturation est le rapport du volume de vide rempli d'eau au volume total de vide.

Il joue un grand rôle dans les phénomènes de destruction des matériaux poreux par le gel. En se transformant en gel, l'eau augmente de 9% en volume environ.

3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Degré de Saturation (Teneur en eau)

La saturation dans les échantillons de matériaux est réalisée par l'immersion des échantillons dans l'eau bouillante et à la saturation en pression d'air.

Pour déterminer le degré de saturation en pression d'air, on a la démarche suivante:

- Immerger les échantillons dans l'eau.
- Donner la pression de base de 20 mm Hg jusqu'au moment où on peut éliminer toutes les bulles d'air.
- Ensuite on fait baisser la pression de base de 20 mm Hg. À ce moment là, presque tout le vide est rempli d'eau et par conséquent on dit que les échantillons sont saturés.

$$10 \text{ mm Hg} = 1,333 \text{ kPa}$$

$$760 \text{ mmHg} = 1.0 \text{ atm} = 101.3 \text{ kPa} = 1013 \text{ mbar}$$

3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Degré de Saturation (Teneur en eau)

Le degré de saturation peut se calculer par la formule suivante:

$$BH = \frac{G_{sat} - G_s}{V_0} \cdot \%$$

BH : degré de saturation (%)

G_{sat} : masse d'échantillon au moment de saturation.

G_s : masse sèche d'échantillon.

V_0 : volume apparent du matériau.

3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Degré de Saturation (Teneur en eau)

Cependant, on ne peut pas remplir entièrement les vides de l'échantillon d'eau, c'est pourquoi il est obligatoire de présenter cette valeur en un "coefficient de saturation", noté C_{sat} et exprimé en %.

Ce coefficient est calculé avec la formule :

$$C_{sat} = \frac{BH}{\gamma} \cdot \%$$

p : degré de porosité.

BH : degré de saturation.

Pour connaître la diminution de la résistance de matériaux en présence d'eau, on utilise l'indice molle:

$$K_m = \frac{R_{BH}}{R_k} \cdot \%$$

K_m : indice molle

R_{BH} : résistance d'échantillon au moment de saturation.

R_k : résistance d'échantillon sec.

3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés physiques

Degré de Saturation (Teneur en eau)

A la place de la saturation, on utilise aussi la teneur en eau d'un matériau. Elle est le poids d'eau W contenu dans le matériau par unité de poids de ce matériau sec.

3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés mécaniques

La déformation:

Est une des propriétés essentielles pour des matériaux de construction. Selon la caractérisation des déformations, on les divise en trois sortes:

- 1) Déformation élastique,
- 2) Déformation plastique,
- 3) Déformation visqueuse.

La résistance:

Est la capacité des matériaux contre les actions des forces externes (les charges) étant définie en contrainte maximale quand l'échantillon est détruit.

3. Propriétés des matériaux de construction

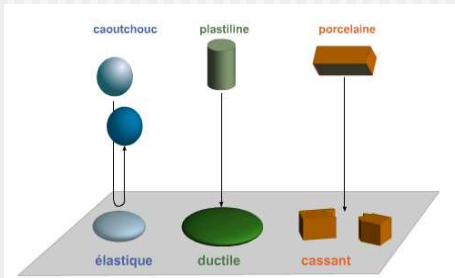
Propriétés mécaniques

Déformation

Est une des propriétés essentielles pour des matériaux de construction.

Est le changement de forme ou le déplacement d'un solide sous l'influence de contrainte.

Selon la caractérisation des déformations, on les divise en trois sortes.



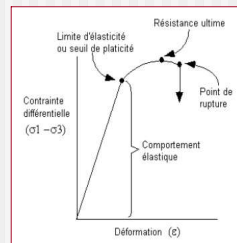
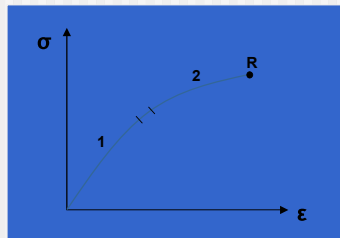
3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés mécaniques

Déformation

Un corps solide soumis à un essai triaxial montre les résultats suivants :

- Segment 1 de la courbe dont la déformation est peu importante, correspond au domaine d'élasticité ;
- Segment 2 à pente relativement faible, correspond au domaine de plasticité c.à.d. la déformation est irréversible (permanente) (= déformation ductile).
- La courbe se termine par le point de rupture (= déformation cassante).



3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés mécaniques

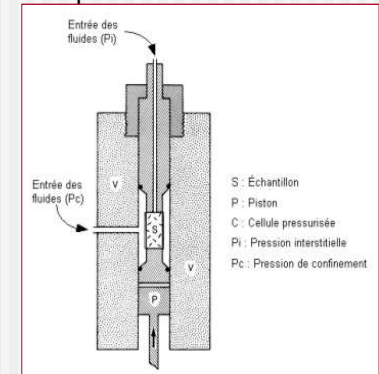
Déformation

Un corps solide soumis à un essai triaxial montre les résultats suivants :

Le terme "triaxial" signifie que les trois contraintes principales, σ_1 , σ_2 et σ_3 , sont variables et peuvent être contrôlées pendant l'essai.

En général, la contrainte axiale, parallèle à l'axe long de l'échantillon, correspond à σ_1 (en compression).

Une pression de confinement (P_c) sera générée tout autour de l'échantillon ($\sigma_2 = \sigma_3$) par un fluide sous pression.



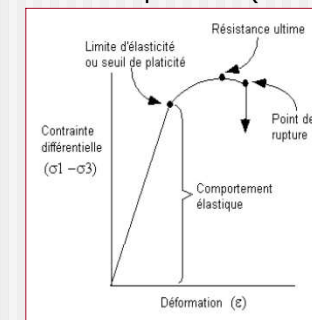
3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés mécaniques

Résistance

Est la capacité des matériaux contre les actions des forces externes (les charges) étant définie en contrainte maximale quand l'échantillon est détruit.

Plus la valeur de la déformation est grande avant le point R, plus la roche est dite compétente (Résistante).



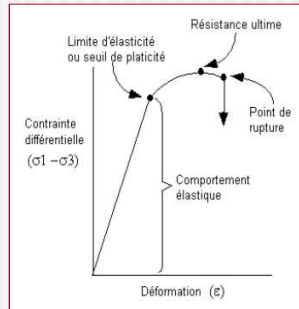
3. Propriétés des matériaux de construction

Propriétés mécaniques

Résistance

Est la capacité des matériaux contre les actions des forces externes (les charges) étant définie en contrainte maximale quand l'échantillon est détruit.

Plus la valeur de la déformation est grande avant le point R, plus la roche est dite compétente (Résistante).



4.1. Granulats



4.1. Granulats

Impossible d'imaginer une société moderne avec ses activités de construction, de bâtiments pour l'habitat, l'industrie ou les services publics, de génie civil, de travaux publics et d'aménagement de l'environnement sans le recours aux matériaux de construction et aux granulats.

Les granulats représentent quantitativement la plus importante des matières premières utilisée dans un pays avec l'air et l'eau.

Trouver des gisements et produire des granulats s'avère donc être un impératif de développement de la société.

4.1. Granulats

Définition

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sables, graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons.

C'est l'ensemble des grains compris entre 0,02 et 125 mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage.

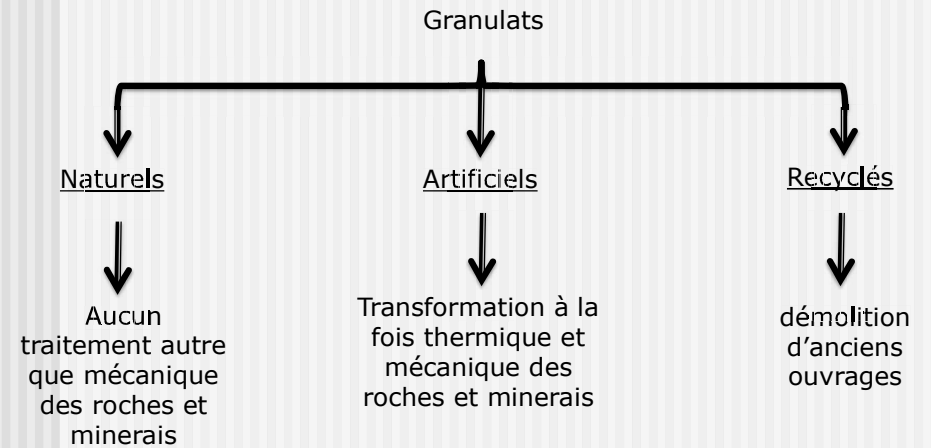
Ces matériaux sont parfois encore appelés « agrégats ».

Exemple :

sables, gravillons/graviers, granulats artificiels, grains de polystyrène, déchets de métallurgie, ...

4.1. Granulats

Origine



4.1. Granulats

Utilisation

Les granulats sont utilisés pour la réalisation des : *filtres sanitaires, filtres, drains, bétons, remblais routiers, ...*

Les deux principales utilisations des granulats sont les bétons et la viabilité, à savoir des couches de roulement des routes et autoroutes, des aéroports et des voies de chemin de fer.

4.1. Granulats

Exemples de Consommation moyenne de granulats par nature d'ouvrage



1 m³ de béton : 2 t de granulats



Un pavillon : 100 à 300 t



Un lycée ou un hôpital : 20 000 à 40 000 t



1 km de voies ferrées : 10 000 t



1 km d'autoroute : environ 30 000 t

4.1. Granulats

Utilisation

Les granulats doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage.

Par conséquent, des essais au laboratoire sont effectués pour mesurer des paramètres caractéristiques des matériaux.

Les essais effectués portent sur des quantités réduites de matériaux (échantillons).

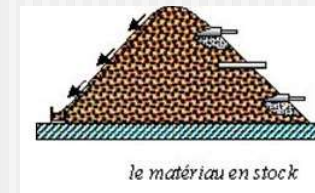
En général, le prélèvement d'échantillons se fait sur le chantier, la carrière ou l'usine

4.1. Granulats

Prélèvement des échantillons

Prélèvement sur tas normaux :

- à la main, à l'aide d'une planche ou d'une plaque métallique.
- au moyen d'une sonde, ouverture 4~6 cm, longueur 60~100 cm, extrémité taillée en sifflet.



4.1. Granulats

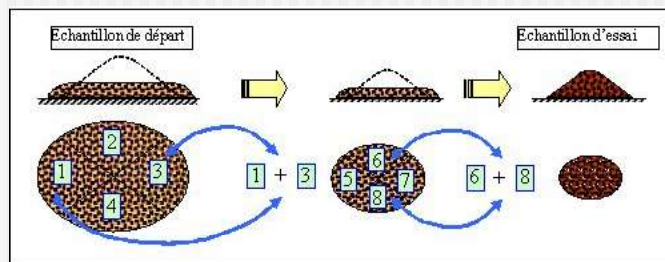
Prélèvement des échantillons

Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire) :

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur.

L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105 °C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60 °C dans le cas contraire.

→ Quartage :



4.1. Granulats

Prélèvement des échantillons

→Echantillonneur :

Permet de diviser facilement en deux parties représentatives la totalité d'un échantillon initial, chaque moitié étant recueillie dans un bac de manière séparée.

La répétition de cette opération permet d'obtenir l'échantillon nécessaire, après 3 ou 4 opérations identiques.



Echantillonneur pour gravier

4.1. Granulats

Prélèvement des échantillons

→ Echantillonneur :

Le procédé peut être résumé par la figure ci-dessous. Il permet de sélectionner une masse (m) à partir d'un prélèvement de masse 3m.

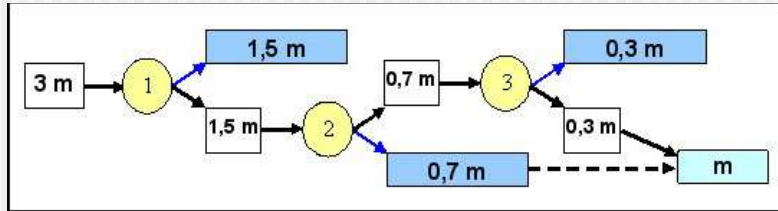
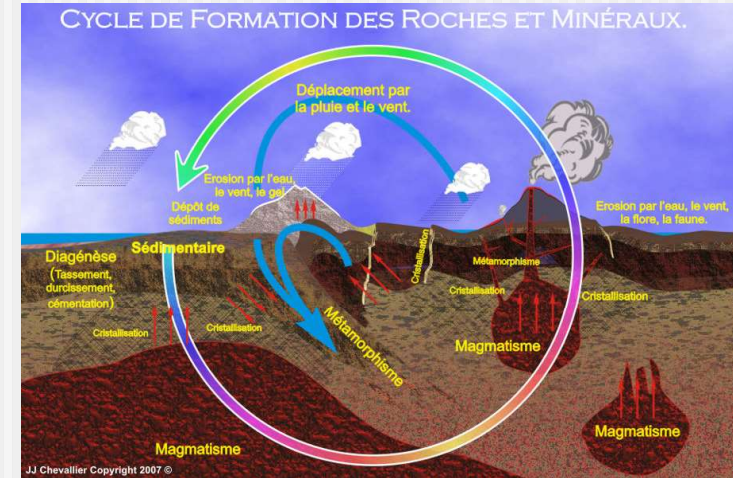


Schéma d'une opération de répartition des matériaux en utilisant de l'échantillonneur

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon la nature minéralogique :



4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon la nature minéralogique :

- Roches magmatiques : - granulats de bonne qualité : exemple le granit, le quartz.
- Roches sédimentaires : - non recommandé pour le béton : le calcaire.
- Roches métamorphiques : - non recommandé pour le béton : le schiste; - bons granulats : le gneiss.

4.1. Granulats

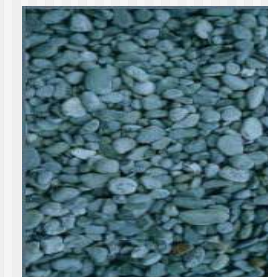
Classification des granulats

→ Selon la forme :

Elle est soit naturelle, soit artificielle.

Forme naturelle, généralement roulée, provient des mers, dunes, rivières, carrières, ...

Forme artificielle issue du concassage de roches dures (roches mères).



Roulés



Anguleux

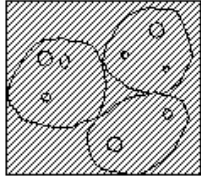
4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

→ **Masse volumique apparente**

Est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains et le constituant (volume apparent).



Volume hachuré = Volume du récipient

La densité apparente à l'état compacté ou non compacté est le rapport de la masse apparente du matériau à T° donnée à la masse d'un égal volume d'eau à même T°.

4.1. Granulats

→ **Masse volumique apparente**

a- Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la masse de l'unité de volume apparent occupé par un granulat sec, c'est-à-dire du Volume constitué par la matière solide et le vide qu'elle contient.

b- Appareillage



Un récipient cubique ou cylindrique de volume connu



Une règle métallique à araser



Une main écope pour le remplissage



Une balance de portée 5kg, précision 1g

4.1. Granulats

→ **Masse volumique apparente**

c- Exécution de l'essai

- Peser un récipient vide de volume connu V_T et noter M_1
- Verser dans le récipient le matériau par couches successives, en le répartissant sur toute la surface et sans tassement
- Araser avec soin à l'aide de la règle métallique
- Peser la masse M_2 du récipient rempli
- Calculer

$$\rho_{app} = \frac{M_2 - M_1}{V_T}$$



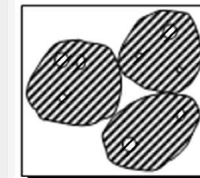
4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

→ **Masse volumique absolue**

Est la masse d'un mètre cube de ce matériau déduction faite des vides entre particules, et non ceux compris dans les particules



Volume hachuré = volume absolu (avec pores)

La densité absolue est le rapport de la masse absolue à la masse d'un égal volume d'eau distillée (à une température donnée).

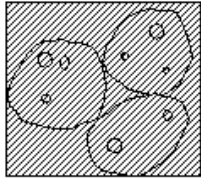
4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

→ **Masse volumique réelle**

Est la masse d'un mètre cube du matériau, déduction faite de tous les vides (vides entre et à l'intérieur des grains).



Volume hachuré = Volume réel (sans pores)

La densité absolue est le rapport de la masse réelle à la masse d'un égal volume d'eau distillée (à une température donnée).

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

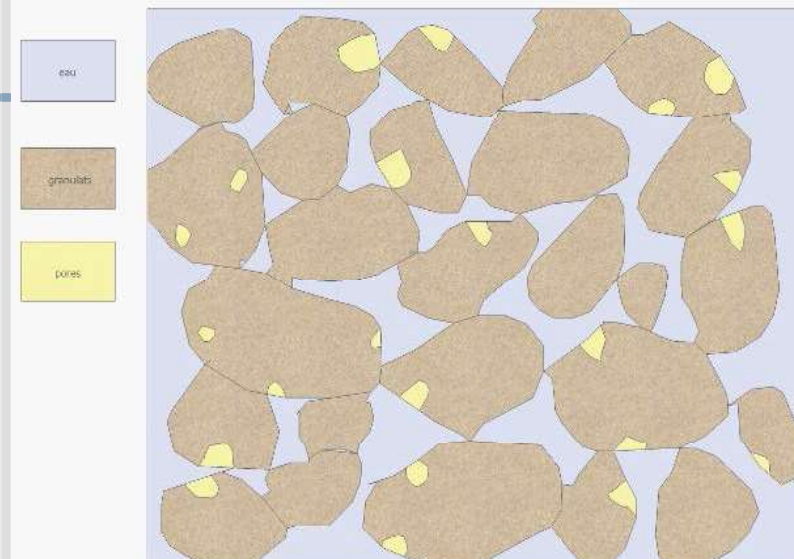
→ **Masses volumiques absolue et réelle**

a- Principe de l'essai

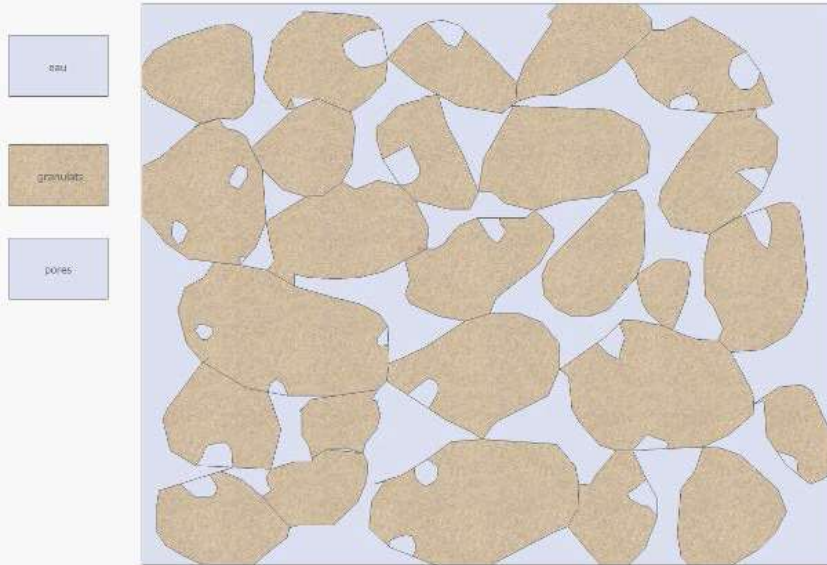
1- granulat mis dans un récipient étanche; granulats préalablement séchés de manière prolongée



2- après remplissage avec de l'eau, on remarque que les pores des granulats contiennent encore du vide



3- après 24 heures (ou après mise sous vides), la quasi totalité des pores sont maintenant remplis d'eau



4- après séchage superficiel; l'eau restante dans les pores est l'eau absorbée



5- après séchage prolongé à l'étuve, les pores sont de nouveau remplis d'air



4.1. Granulats

→ **Masses volumiques absolue et réelle**

b- Préparation d'une prise d'essai

- Les granulats doivent être échantillonnés conformément à ce qui a été décrit dans l'essai de l'analyse granulométrique.
- la méthode du panier en treillis utilisée pour les granulats passant au tamis de 63 mm et refusés au tamis de 31,5 mm;
- La méthode au pycnomètre pour les granulats passant au tamis de 31,5 mm et refusés au tamis de 0,063 mm..

4.1. Granulats

→ **Masses volumiques absolue et réelle**

b- Appareillage



Panier en treillis



Balance

Récipient étanche

- Sécher doucement la surface des granulats et les transférer sur un autre chiffon sec, doux et absorbant, quand le premier chiffon n'absorbe plus d'eau.
- Bien étaler les granulats sur ce chiffon en une couche mono-granulaire et les laisser exposés à l'air libre mais à l'abri des rayons du soleil ou de toute autre source de chaleur jusqu'à ce que les films d'eau visibles aient disparu, les granulats gardant toutefois un aspect humide. Peser les granulats (M1).
- Transférer les granulats sur un plateau et le placer dans l'étuve à une température de $(110 \pm 5)^\circ \text{C}$ jusqu'à masse constante (M4).

d- Calcul et expression des résultats

Calculer les masses volumiques réelles (ρ_a , ρ_{rd} et ρ_{ssd} , selon le cas), en mégagrammes par mètre cube, conformément aux équations suivantes

- Masse volumique absolue $\rho_a = M4/M4-(M2-M3)$

c- Mode opératoire de l'essai

- Placer la prise d'essai préparée dans le panier en treillis et immerger le tout dans le récipient rempli d'eau à une température de $(22 \pm 3)^\circ \text{C}$, la hauteur de l'eau au dessus du panier étant de 50 mm au moins.
- Dès le début de l'immersion, éliminer l'air occlus de la prise d'essai préparée en la soulevant à environ 25 mm au dessus du fond du récipient et en la laissant retomber à 25 reprises, une par seconde, environ.
- Laisser le panier contenant les granulats complètement immergé pendant cette opération pendant une période de $(24 \pm 0,5)$ h.
- Secouer le panier et son contenu, et les peser (M2) dans une eau à une température de $(22 \pm 3)^\circ \text{C}$. Enregistrer la température de l'eau lorsque la masse (M2) a été déterminée.
NB/ Si la pesée de la prise d'essai implique son transfert dans un récipient différent, secouer le panier contenant la prise d'essai 25 fois dans le nouveau récipient, comme décrit plus haut, avant de le peser (M2).
- Sortir le panier et son contenu de l'eau et les laisser s'égoutter pendant quelques minutes.
- Verser doucement les granulats du panier sur un chiffon sec. Remettre le panier vide dans l'eau, le secouer 25 fois et le peser dans l'eau (M3).

4.1. Granulats

→ **Masses volumiques absolue et réelle**

- Masse volumique réelle déterminée après séchage en étuve

$$\rho_{rd} = M4/M1-(M2-M3)$$

- Masse volumique réelle saturée surface sèche

$$\rho_{ssd} = M1/M1-(M2-M3)$$

- Calculer le coefficient d'absorption d'eau (en pourcentage de la masse sèche) après immersion pendant 24 h (WA24) conformément à l'équation suivante :

$$WA_{24} = 100 (M1-M4)/M4$$

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

- **d) Absorption**
- **e) Porosité et compacité**
- **f) Teneur en eau**

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

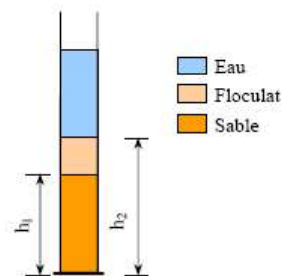
→ **Propreté des granulats**

Dans le cas des sables, le degré de propreté est fourni par essai appelé "équivalent de sable piston PS" (norme P 18-597).

Ce dernier consiste à séparer le sable des particules très fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage.

L'essai est fait uniquement sur la fraction de sable 0/2 mm. La valeur de PS doit selon les cas être supérieure à 60 ou 65.

$$PS = 100 \frac{h_1}{h_2}$$



4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

→ **Propreté des granulats**

Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des adhérences entre les granulats et la pâte.

La propreté désigne:

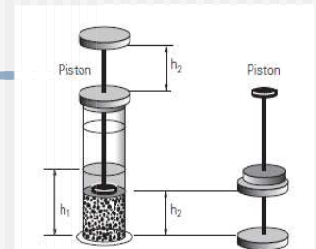
- teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains, ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains.
- impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes et les fragments de racine.

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

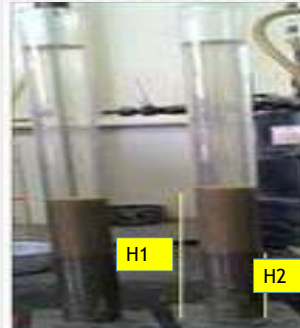
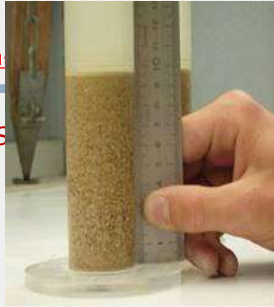
→ **Propreté des granulats**



4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques des granulats



4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

→ **Propreté des granulats (sable)**

PS	Nature et qualité du sable
< 60	"Sable argileux" risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
$60 \leq PS < 70$	"Sable légèrement argileux" de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$70 \leq PS < 80$	"Sable propre" à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$PS > 80$	"Sable très propre" l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Exemples de valeurs préconisées pour l'équivalent de sable

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

→ **Propreté des granulats (sable)**

On agite une certaine quantité de sable dans une solution lavante (disponible dans le commerce) puis on laisse reposer pendant un certain temps.

Théoriquement les limites extrêmes des valeurs PS (E.S) seraient :

- pour sable pur (pas de floculat) $h_1 = h_2 \Rightarrow E.S = 100$
- pour argile pure (pas de dépôt de sable) $h_1 = 0 \Rightarrow E.S = 0$

Le résultat final est la moyenne des deux valeurs obtenues pour les deux prises d'essais.

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

→ **Propreté des granulats (gravier)**

Le gravier est composé majoritairement de particules graveleuses mais il est rarement exempt d'éléments fins.

Suivant son utilisation, une trop grande quantité d'éléments fins dans le gravier entraîne des conséquences néfastes sur le béton ; par exemple (chute des caractéristiques mécaniques, grands risques de fissuration).

L'essai de propreté du gravier met en évidence la présence d'éléments fins dans le gravier.

La norme fixe la valeur 2% qui est le seuil de propreté acceptable du gravier, donc $p = 2\%$

Le pourcentage d'impureté est :
$$\frac{(P_1 - P_2) * 100}{P_2}$$

où P_1 le poids initial sec du matériau et P_2 son poids sec après lavage au tamis 0,5mm

4.1. Granulats

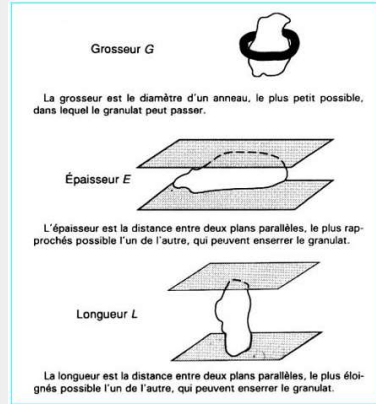
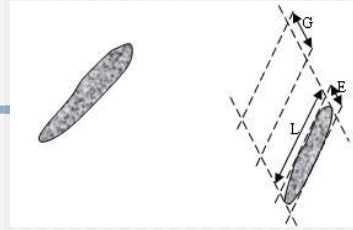
Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

→ Forme des granulats

La forme d'un granulats est défini par trois grandeurs géométriques :

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



4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Forme des granulats

- Selon leur origine, leur nature et leur mode d'élaboration, les granulats peuvent avoir des formes sphériques, cubiques, nodulaires, plates ou allongées.
- Ces caractéristiques, ainsi que l'état de surface des grains influent sur leur mise en œuvre.
- L'élaboration des bétons nécessite de n'utiliser que des granulats ayant une forme assez ramassée, à l'exclusion des granulats plats
- En technique routière, les granulats plats ne peuvent être utilisés car ils conduisent à des couches de roulement trop glissantes.
- Le coefficient d'aplatissement des granulats permet de caractériser la forme des granulats dont la dimension est comprise entre 4 et 63 mm.

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Forme des granulats

La forme des granulats influence :

- la facilité de mise en œuvre et le compactage du béton,
- la compacité du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment,

La forme est d'autant meilleure qu'elle est proche d'une sphère ou d'un cube.

La forme est définie par le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats qui est le pourcentage d'éléments tels que $G/E > 1,58$.

Elle est mesurée par un double tamisage sur des tamis à mailles carrées qui trient suivant la grosseur, et sur des cribles à barres parallèles qui trient suivant l'épaisseur.

Le coefficient d'aplatissement des granulats permet de caractériser la forme des granulats dont la dimension est comprise entre 4 et 63 mm.

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Forme des granulats

a- Principe de l'essai

L'essai consiste à effectuer deux tamisages successifs :

- Un tamisage sur tamis permet de classer l'échantillon en différentes classes granulaires d_i/D_i .
- Un tamisage des différentes classes granulaires d_i/D_i , sur des grilles à fentes parallèles d'écartement : $D_i/2$

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Forme des granulats

b- Appareillage



4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Forme des granulats

c- Mode opératoire

- Echantillonner le granulat à tester selon les modalités définies dans l'analyse granulométrique par tamisage.
- Sécher l'échantillon à l'étuve à $110 \pm 5^\circ$ C jusqu'à masse constante (la masse est considérée constante lorsque deux pesées successives séparées d'une heure ne diffèrent pas de plus de 0,1 %) et laisser refroidir.
- Dans le cas d'une coupure d/D, éliminer tous les grains passant au tamis de d/2 (avec 4 mm au minimum), et ceux retenus au tamis de 1,4 D (avec 80 mm maximum).
- Peser une masse M_0 de granulats. La masse de la prise d'essai doit être conforme aux valeurs indiquées dans le tableau ci-après.

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Forme des granulats



Grille à fentes

Largeurs des fentes des grilles utilisées dans la mesure du coefficient d'aplatissement (en mm)

Granulat élémentaire d_i/D_i	Largeur de fente de la grille
63/80	$40 \pm 0,3$
50/63	$31,5 \pm 0,3$
40/50	$25 \pm 0,2$
31,5/40	$20 \pm 0,2$
25/31,5	$16 \pm 0,2$
20/25	$12,5 \pm 0,2$
16/20	$10 \pm 0,1$
12,5/16	$8 \pm 0,1$
10/12,5	$6,3 \pm 0,1$
8/10	$5 \pm 0,1$
6,3/8	$4 \pm 0,1$
5/6,3	$3,15 \pm 0,1$
4/5	$2,5 \pm 0,1$

4.1. Granulats

Classification des granulats

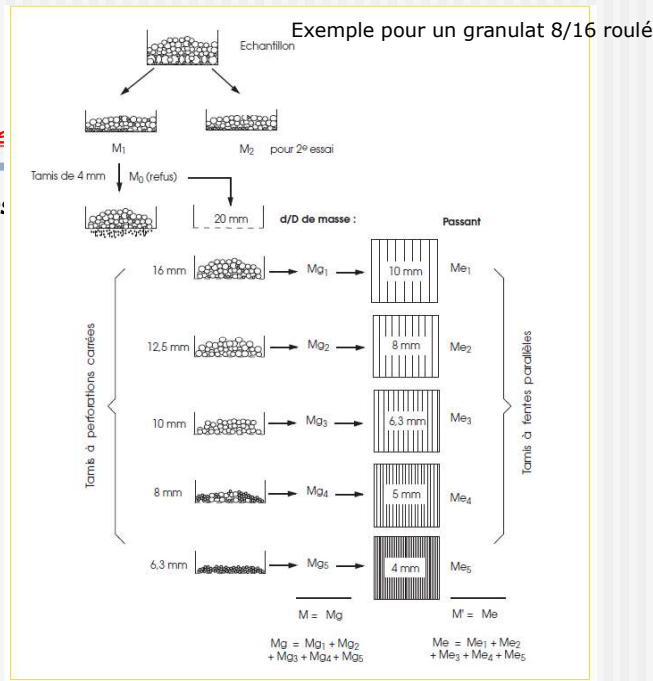
→ Forme des granulats

- On prend un échantillon de masse $M \geq 0,2D$; D en mm, M en kg.
- Recueillir les différentes fractions d/D en prenant bien soin de récupérer chaque élément, et les peser au gramme près : soit M_{g_1} , M_{g_2} , M_{g_3} , etc,
- Tamiser manuellement ensuite chaque classe granulaire (d_i/D_i) sur une grille à fentes parallèles dont l'écartement $E = D_i/2$.
- Peser, au gramme près, le passant sur la grille correspondant à chaque classe granulaire d/D : soit M_{e_1} , M_{e_2} , M_{e_3} , etc, les valeurs sont obtenues en grammes.

Classification de

→ **Forme de**

Schéma de synthèse de la manipulation



4.1. Granulats

Classification des granulats

→ **Forme des granulats**

- Coefficient d'aplatissement élevé compris entre 20 et 40% => gravillon de forme défavorable (plate ou allongée) .
- Coefficient d'aplatissement généralement compris entre 5 et 20% => gravillon de forme favorable (sphérique, cubique, nodulaire)
- Coefficient d'aplatissement recommandé dans l'industrie du béton est <20%, avec une tolérance maximale de 5%.

EXEMPLE DE FEUILLE D'ESSAIS ET DE RÉSULTAT OBTENU

Nature du granulat : 8/16 roulé		Date de l'essai : 03/03/2008	
Provenance : ÉPERNON		Opérateur : Dupont	
Tamisage sur tamis		Tamisage sur grille	
Classes granulaires d/D (mm)	Mg (g)	Ecartement des grilles (mm)	Passant Me (g)
31,5 / 40		20	
25 / 31,5		16	
20 / 25		12,5	
16 / 20	415	10	10
12,5 / 16	1 935	8	35
10 / 12,5	2 045	6,3	235
8 / 10	605	5	200
6,3 / 8		4	
5 / 6,3		3,15	
4 / 5		2,5	
M = Σ Mg = 5 000 M0 = 5 080		M' = Σ Me = 480	
$A \text{ (ou } F) = \frac{M'}{M} \times 100 = 9,6 \%$			

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

→ **Taille des grains des granulats : Granulométrie**

Pour obtenir un béton résistant, étanche et durable, il faut:

- que le béton à l'état frais soit facile à mettre en œuvre et à compacter (pour réduire la porosité).
- un maximum de granulats par unité de volume de béton (pour réduire la quantité de pâte liante nécessaire pour remplir les vides).
- que la proportion de chaque dimension des grains doit être choisie de façon à remplir les vides laissés par les grains de dimensions supérieures.
- réduire la teneur en éléments fins au minimum requis pour obtenir une bonne maniabilité et une bonne compacité.

4.1. Granulats

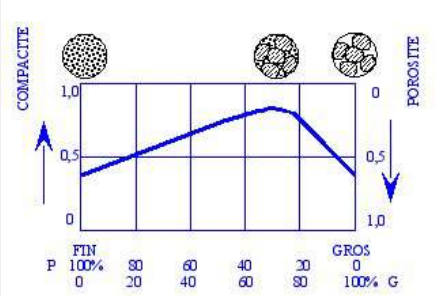
Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

→ **Taille des grains des granulats : Granulométrie**

Les analyses granulométriques apporteront quelques éléments de réponses à ces conditions.

Condition essentielle pour obtenir le moins de vides possibles (meilleure compacité) dans un mélange de sable et gravillon = 35 % de sable de 0/5 et 65 % de gravillons 5/20.



4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

→ **Taille des grains des granulats : Granulométrie**

Les granulats sont désignés par d/D c-à-d les dimensions s'étalent de « d » pour les petits éléments à « D » pour les gros éléments.

La classe des granulats est définie par tamisage au travers d'une série de tamis dont les mailles ont les dimensions suivantes en mm :

0,063 - 0,08 - 0,125 - 0,16 - 0,2 - 0,25 - 0,315 - 0,4 - 0,5 - 0,63 - 0,8 - 1 - 1,25 - 1,6 - 2 - 3,15 - 4 - 6,3 - 8 - 10 - 12,5 - 14 - 16 - 20 - 25 - 31,5 - 40 - 50 - 63 - 80 - 100 - 125.

Les tamis dont les dimensions sont soulignées correspondent à la série de base préconisée lors d'une étude granulométrique.

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

→ **Taille des grains des granulats : Granulométrie**

L'analyse granulométrique permet de déterminer la proportion des différents constituants solides d'un granulat en fonction de leur grosseur à l'aide de tamis.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas.



4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

→ **Taille des grains des granulats : Granulométrie**

Le **refus** est le matériau retenu par un tamis donné,

Le **tamisas** ou le **passant** est le matériau qui passe à travers les mailles d'un tamis.



une série de tamis placée sur la table vibrante

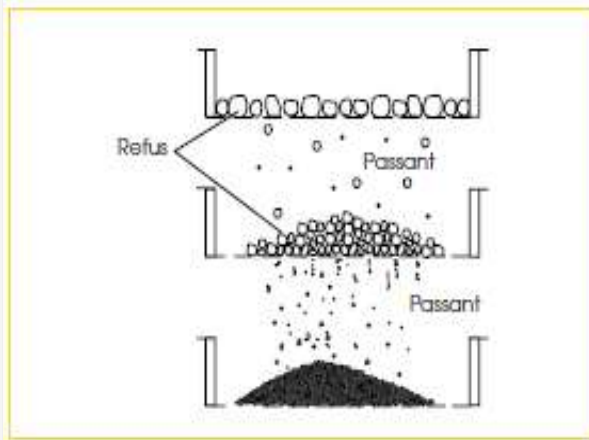
4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

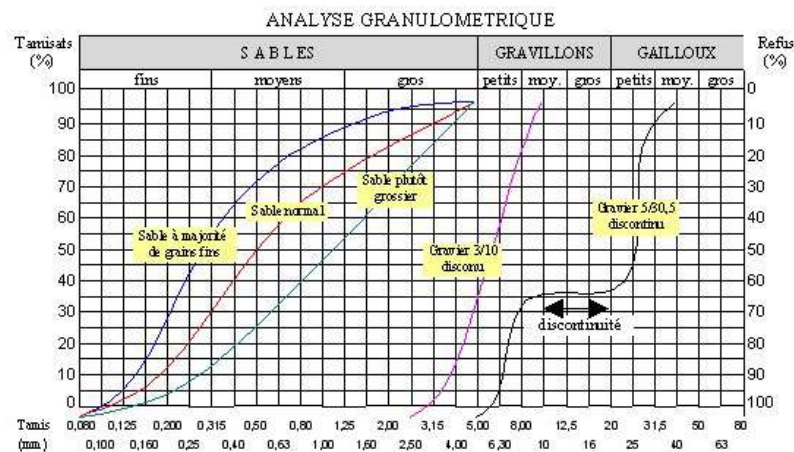
→ **Taille des grains des granulats : Granulométrie**

Analyse granulométrique par tamisage



4.1. Granulats

Classification des granulats



Courbes granulométriques dans différents cas

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques physiques :

→ **Taille des grains des granulats : Granulométrie**

Les pourcentages ainsi obtenus sont exprimés sous forme d'une courbe granulométrique. Ainsi en fonction de la dimension des grains, on distingue :

Classes granulaires des granulats

APPELLATION		Dimension de la maille des tamis en (mm)
Pierres cassées et cailloux	Gros	50 à 80
	Moyens	31,5 à 50
	Petits	20 à 31,5
Gravillons	Gros	12,5 à 20
	Moyens	8 à 12,5
	Petits	5 à 8
Sable	Gros	1,25 à 5
	Moyens	0,31 à 1,25
	Petits	0,08 à 0,31
Fines, farines et fillers		inférieur à 0,08

4.1. Granulats

→ **Taille des grains des granulats : Granulométrie**

d- Mode opératoire

- Sécher la prise d'essai en la portant à une température de $(110 \pm 5^\circ \text{C})$ jusqu'à masse constante. Laisser refroidir, peser et inscrire le résultat, soit M_1
- Laver jusqu'à ce que l'eau passant à travers le tamis de $63\mu\text{m}$ soit claire la masse M_1 pour évaluer la teneur des fines du granulat. On poursuit le lavage.



4.1. Granulats

→ Taille des grains des granulats : Granulométrie

- Refus du tamis de 63 µm récupéré puis séché à 110 ±5° C jusqu'à masse constante. On laisse refroidir, on pèse et on inscrit le résultat, soit M_2 .
- Verser le matériau lavé et séché (ou l'échantillon sec directement) dans la colonne de tamis. Cette colonne est constituée d'un certain nombre de tamis emboîtés, et disposés de haut en bas, dans un ordre de dimension de mailles décroissant, avec le fond et le couvercle.
- L'expérience prouve que le lavage n'élimine pas nécessairement l'ensemble des fines. Il est donc nécessaire d'introduire un tamis de contrôle de 63µm dans la colonne.
- Agiter la colonne, manuellement ou mécaniquement, puis reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui présente la plus grande ouverture et on agite manuellement chaque tamis en s'assurant qu'il n'y a pas de perte de matériau, en utilisant, par exemple, un fond et un couvercle.

4.1. Granulats

→ Taille des grains des granulats : Granulométrie

- L'exécution du tamisage sur un tamis peut être considérée comme achevée lorsque le refus ne change pas de plus de 1,0 %, en 1 min de tamisage.
- Peser le refus au tamis ayant la dimension de maille la plus grande et noter sa masse R_1 .
- Effectuer la même opération pour le tamis immédiatement en dessous, et noter la masse du refus R_2
- Poursuivre la même opération pour tous les tamis qui sont dans la colonne, afin d'obtenir la masse des différentes fractions de matériaux retenus et noter ces masses, $R_3, R_4, \dots, R_{i-1}, \dots, R_n$.
- Peser le matériau tamisé, restant dans le fond le cas échéant, et inscrire la valeur de sa masse soit P .

4.1. Granulats

→ Taille des grains des granulats : Granulométrie

Sans vider le récipient, le tamis suivant est à son tour vidé dans le récipient.
La balance indique le cumul des masses des granulats refusés dans chaque tamis

Un récipient pour recueillir les granulats, est posé sur la balance. La balance est tarée.
Le plus grand tamis est vidé dans le récipient.



4.1. Granulats

→ Taille des grains des granulats : Granulométrie

e- calcul et expression des résultats

- Pour chaque tamis, on calcule la masse du tamisat T_i et on calcule les tamisats cumulés T_c
$$T_i = M_2 - R_i$$
$$T_c = \sum T_i$$
- On calcule le pourcentage cumulé des différents tamisats de la masse sèche d'origine M_1 passant jusqu'au tamis de 63µm non compris.
$$\%T_c = 100 * T_c / M_1$$

- On calcule le pourcentage de fines (f) passant à travers le tamis de 63µm conformément à l'équation suivante ;
$$f = 100 * ((M_1 - M_2) + P) / M_1$$

où :

M_1 est la masse séchée de la prise d'essai, en kilogrammes ;

M_2 est la masse séchée du refus au tamis de 63 mm, en kilogrammes ;

P est la masse du tamisat restant dans le fond, en kilogrammes

4.1. Granulats

GRANULARITE — TAMISAGE EN 933-1	LABORATOIRE :
Identification de l'échantillon	Date :
	Operateur :
Procéde utilisé : lavage et tamisage / tamisage par voie sèche (rayer la mention inutile)	

Masse sèche totale $M_1 =$

Masse sèche après lavage $M_2 =$

Masse sèche des fines retirées par lavage $M_1 - M_2 =$

Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus (R) (kg)	Pourcentage de refus ($R/M_1 \times 100$)	Pourcentages cumulés de tamisat $100 - (R/M_1 \times 100)$
	R_1		
	R_2		
(au nombre entier le plus proche)			
Matériau resté au fond $P =$			

Pourcentage de tamisat de fines (f) sur le tamis de $63 \mu\text{m} = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 =$
(à la première décimale la plus proche)

$\sum R_i + P =$ <input type="text"/>	Observations :
$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} \times 100 =$ <input type="text"/>	< 1 %

La masse sèche de la prise d'essai devrait être portée en M_1 , lorsqu'elle est déterminée directement, ou en M_1' , lorsqu'elle est calculée à partir d'une prise d'essai en double.

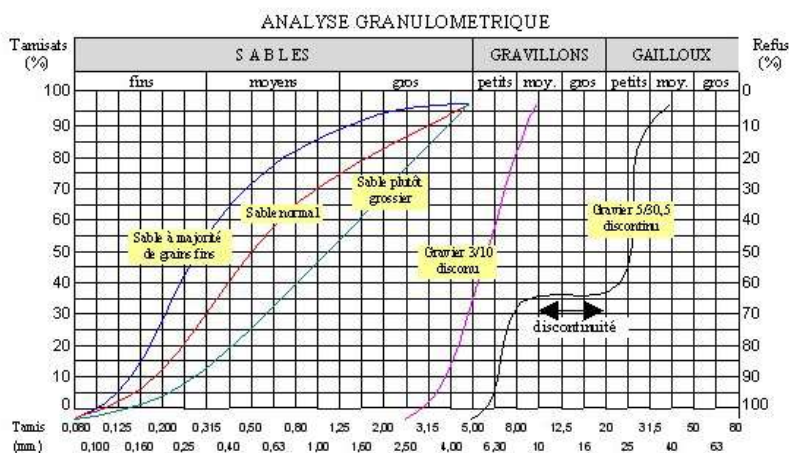
→ Taille

ANALYSE GRANULOMETRIQUE				Dossier : N°:	
Demandeur :		Origine :			
Prélevé le :		Par :			
Cote mailles tamis mm	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisats %	Poids Humide :	
80,00				Poids sec :	
63				Teneur en eau :	
50					
40,00					
31,50					
25					
20					
16					
14					
12,50					
10					
8					
6,30					
5					
4					
3,15					
2,50					
2					
1,60					
1,25					
1					
0,80					
0,63					
0,50					
0,40					
0,315					
0,25					
0,2					
0,16					
0,125					
0,1					
0,08					
0,063					

→ Granulométrie

4.1. Granulats

→ Taille des grains des granulats : Granulométrie



Courbes granulométriques dans différents cas

4.1. Granulats

→ Taille des grains des granulats : Granulométrie

La forme des courbes granulométriques apporte les renseignements suivants :

- Les limites d et D du granulat en question ;
- La proportion d'éléments fins ; par exemple les trois sables sont des sables 0/5 mm mais les proportions de grains fins (<0,5 mm par exemple) sont pour chacun d'eux : 25%, 45% et 60% ;
- La continuité ou la discontinuité de la granularité ; par exemple, la courbe du gravier 5/31,5 présente un palier s'étendant de 10 à 20 mm signifiant que le granulat en question ne contient pas de grains compris entre 10 et 20 mm.

A noter :

1. Dans le cas d'un béton ou d'un mortier, le % des fines dans les sables doit être inférieur à 10%.
2. Dans le cas d'un béton dont le gravier doit être 5/25, il faut éliminer tous les éléments supérieurs à 25 mm et inférieurs à 5 mm par tamisage.

4.1. Granulats

→ Taille des grains des granulats : Granulométrie

Module de finesse d'un granulat :

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

Si il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF).

Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100 de la somme des refus, exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 et 5 mm

4.1. Granulats

→ Taille des grains des granulats : Granulométrie

Le module de finesse est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante.

Exemple :

Si un sable a les pourcentages de refus suivants dans les tamis correspondants ci-dessous :

D = 0,16	= 93%	} Total somme des refus: 266
D = 0,315	= 81%	
D = 0,63	= 57%	
D = 1,25	= 27%	
D = 2,5	= 8%	
D = 5 mm	= 0	

Son module de finesse $M_f = \frac{1}{100} \times 266 = 2,66$

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8.

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon la nature des granulats :

→ Granulats courants

Les granulats courants sont ceux de masse volumique ϵ [2 ; 3 t/m³].

Ce sont généralement les Basaltes, Quartzites, Grès, Porphyre, Diorite, granites, Schistes.

Pour la composition des bétons, on utilise en général des matériaux naturels alluvionnaires : sables et graviers.

Cependant, lorsque ces matériaux font défaut localement, il est possible d'utiliser des roches éruptives ou sédimentaires transformées en granulat par concassage. Calcaires durs, silico-calcaires.

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon la nature des granulats :

→ Granulats courants



Basalte



Grès



Diorite



Granite

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon la nature des granulats :

→ **Granulats Légers**

Utilisés pour la confection de bétons légers. Ces bétons présentent en général des résistances d'autant plus faibles qu'ils sont plus légers, mais cette dernière qualité peut, dans certains cas, être particulièrement intéressante (préfabrication, isolations, gain de poids sur fondations difficiles ou onéreuses, etc.).

La densité absolue de ces granulats est généralement < 1 .

Exemple : Argile expansée, Schistes expansés, Pierre ponce, Pouzzolane.

4.1. Granulats



Vermiculite



Ponce



Perlite



Mâchefer

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon la nature des granulats :

→ **Granulats lourds**

- Granulats lourds = granulats très denses, essentiellement employés pour la confection des bétons lourds utilisés pour la construction d'ouvrages nécessitant une protection contre les rayonnements produits, par exemple, dans les réacteurs atomiques.
- On distingue par exemple:
 - La barytine, sa densité absolue est 4,2 à 4,7
 - La magnétite, sa densité absolue est 4,5 à 5,1

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon la nature des granulats :

→ **Granulats lourds**

Essentiellement employés pour la confection des bétons lourds utilisés pour la construction d'ouvrages nécessitant une protection contre les rayonnements produits

Exemple des réacteurs atomiques :

la protection est d'autant plus efficace que l'épaisseur est plus grande et la densité du béton plus élevée. On utilise en particulier :

- La barytine, sa densité absolue est 4,2 à 4,7
- La magnétite, sa densité absolue est 4,5 à 5,1
- Les riblons, la densité absolue est celle du fer : 7,6 à 7,8
- La grenaille d'une densité absolue de : 7,6 à 7,8

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon la nature des granulats :

→ **Granulats lourds**



Magnétite



Barytine

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon la dureté :

Pratiquement, on compare les duretés des granulats (minéraux) courant à celle de l'acier, le verre et l'ongle

Dureté (échelle de MOHS)	Granulat de référence (minéral)	
10	Diamant	
9	Corindon	
8	Topaze	
7	Quartz	
6	Orthose	← ACIER
5	Apatite	← VERRE
4	Fluorine	
3	Calcite	
2	Gypse	
1	Talc	← ONGLE

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon la dureté :

Il s'agit de caractériser la résistance d'une face d'un granulat à la rayure, c-à-d à la destruction mécanique de sa structure cristalline.

La dureté d'un granulat se juge par référence à l'échelle de dureté de MOHS. Un minéral est dit plus dur qu'un autre s'il raye celui-ci.

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques mécaniques :

Les caractéristiques mécaniques des granulats sont déterminées par des essais tentant de reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats, par exemple le degré d'usure pour les granulats utilisés pour les bétons routiers

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques mécaniques :

a) Essai Micro Deval : Résistance à l'usure

C'est un essai dont le principe est de reproduire, dans un cylindre en rotation, des phénomènes d'usure. Les modalités de cet essai font l'objet de la norme NF P 18-572

4.1. Granulats

→ Essai Micro Deval : Résistance à l'usure

a- Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer l'usure produite, dans des conditions définies, par frottements réciproques des granulats dans un cylindre en rotation avec une charge abrasive.

b- Appareillage



Appareil de Micro deval



cylindre ou jarre



Charge abrasive et échantillon

4.1. Granulats

→ Essai Micro Deval : Résistance à l'usure

b- L'échantillon pour essai

- L'essai doit être effectué sur des granulats ayant une granularité comprise entre 10 mm et 14 mm avec:
 - 60 % à 70 % des granulats passent au travers d'un tamis de 12,5 mm, ou
 - 30 % à 40 % des granulats passent au travers d'un tamis de 11,2 mm.
- La masse de l'échantillon doit être au moins égale à 2kg pour les granulats appartenant à la classe granulaire comprise entre 10 mm et 14 mm.
- La prise d'essai doit consister en deux éprouvettes, d'une masse de (500 ± 2) g chacune.

c- mode opératoire





Échantillon après séchage
et tamisage à 1,6mm

4.1. Granulats

→ Essai Micro Deval : Résistance à l'usure

- Introduire dans chaque cylindre d'essai une éprouvette de masse M. Ajouter un nombre suffisant de billes d'acier pour obtenir une charge abrasive de $(5\ 000 \pm 5)$ g.
- Ajouter $(2,5 \pm 0,05)$ l d'eau dans chaque cylindre.
- Mettre les cylindres en rotation à une vitesse de (100 ± 5) min⁻¹ pendant 2h ou $(12\ 000 \pm 10)$ tours.
- Après essai, recueillir le granulat et les billes d'acier dans un bac
- Tamiser le matériau dans le bac sur le tamis de 1,6mm; la charge abrasive sera retenue sur un tamis de 8mm.
- Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive (à l'aide d'un aimant par exemple).
- Sécher le refus à 1,6mm à l'étuve à $(110 \pm 5)^\circ$ C, jusqu'à masse constante
- Peser ce refus au gramme près, soit m' le résultat de la pesée.



Before Micro-Deval Test

After Micro-Deval Test

4.1. Granulats

→ Essai Micro Deval : Résistance à l'usure

d- Expression des résultats

Pour chaque éprouvette, calculer le coefficient Micro-Deval MDE à partir de l'équation suivante :

$$MDE = 100 \cdot (M - m') / M$$

où :

MDE est le coefficient Micro-Deval de l'essai en présence d'eau ;
M est la masse de l'échantillon mise à l'essai
m' est la masse de refus à 1,6 mm, en grammes.

Cette caractéristique est déterminée par un essai de laboratoire dit « Micro Deval » (NM 10.1.148)

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques mécaniques :

b) Essai Los Angeles: Résistance à la fragmentation et l'usure

Le principe est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Il fait l'objet de la norme NF P 18-573

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produits en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine LOS ANGELES.

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques mécaniques :

b) Essai Los Angeles: Résistance à la fragmentation et l'usure

Le principe est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Il fait l'objet de la norme NF P 18-573

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produits en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine LOS ANGELES.

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques mécaniques :

a- principe de l'essai

- Faire rouler dans un tambour rotatif un échantillon de granulat mélangé à des boulets d'acier. À la fin, on évalue la quantité de matériau retenu sur le tamis de 1,6 mm.

Classes granulaires (mm)	Fractions	Nombre de boulets	Poids total de la charge (g)	Poids des fractions (g)
4 - 6,3		7	3080 ± 20	5000 ± 2
6,3 - 10		9	3960 ± 25	5000 ± 2
10 - 14		11	4840 ± 25	5000 ± 2
10-25	10-16 16-25	11 11	4840 ± 25 4840 ± 25	3000 2000
16 -31,5	16 - 25 25 - 31,5	12 12	5280 ± 25 5280 ± 25	2000 3000
25 - 50	25 - 40 40 - 50	12 12	5280 ± 25 5280 ± 25	3000 2000

b- appareillage

Charge abrasive
(11 billes de 47mm
de Φ)

Cylindre



Mise en place
du granulat....



e- Calcul et expression des résultats

Le coefficient Los Angeles LA, est calculé à partir de l'équation suivante :

$$LA = 100 * (M - m') / M$$

où :

m' : est la masse du refus à 1,6 mm, en grammes.

M : est la masse de la prise d'essai

Enregistrer le résultat arrondi à l'unité la plus proche.

- Vérifier que le tambour soit propre avant d'y mettre l'échantillon. Placer avec précaution les boulets dans la machine, puis y introduire la prise d'essai. Remettre le couvercle et faire 500 tours à la machine, à une vitesse constante de 31 tr/min à 33 tr/min.
- Verser le granulat sur un plateau placé sous l'appareil en veillant à éviter toute perte de matériau. Vider le tambour et le nettoyer soigneusement en éliminant toutes les fines, surtout autour de la plaque saillante.
- Enlever soigneusement les boulets du plateau en veillant à ne perdre aucune particule du granulat.
- Analyser le matériau recueilli sur le plateau par lavage et tamisage au tamis à 1,6 mm.
- Sécher le refus à 1,6 mm à une température de 110 ± 5 ° C, jusqu'à obtention d'une masse constante.

4.1. Granulats

Classification des granulats

→ Selon les caractéristiques mécaniques :

b) Essai Los Angeles: Résistance à la fragmentation et l'usure

Les granulats sont classés en 6 catégories allant de A à F, chacune d'elle devant les conditions suivantes :

CATEGORIES	L _A + M _{DE}	L _A	M _{DE}
A	≤ 25	≤ 20	≤ 15
B	≤ 35	≤ 25	≤ 20
C	≤ 45	≤ 30	≤ 25
D	≤ 55	≤ 35	≤ 30
E	≤ 80	≤ 45	≤ 45
F	> 80	> 45	> 45

L_A - Coefficient Los Angeles.

M_{DE} - Coefficient Micro Duval.

Catégories des granulats selon la résistance au chocs et à l'usure

4.2. Ciment (Liant)

Introduction

Le ciment est un liant hydraulique car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau.

Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium

Les romains furent les premiers à fabriquer un véritable liant hydraulique en mélangeant de la chaux aérienne avec des cendres volcaniques (=Pouzzolane).

En 1756, un anglais a mis au point un produit à partir de pierres de l'île de Portland, capable de faire prise sous l'eau. On parla pour la première fois de ciment. D'où l'origine du nom donné aujourd'hui au ciment (Ciment Portland).

4.2. Ciment

Principe de fabrication ciment portland

Ciments usuels fabriqués à partir d'un mélange de calcaire (CaCO_3) environ de 80% et d'argile ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) environ de 20%.

Ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis.

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes:

- préparation du cru
- cuisson
- broyage et conditionnement

La cuisson à 1450°C du mélange composé de calcaire et d'argile.

Le clinker est ensuite broyé avec environ 5% de gypse pour donner du ciment Portland artificiel (C.P.A.) .

4.2. Ciment

Principe de fabrication ciment portland

Ciments usuels fabriqués à partir d'un mélange de calcaire (CaCO_3) environ de 80% et d'argile ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) environ de 20%.

Ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis.

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes:

- préparation du cru
- cuisson
- broyage et conditionnement

La cuisson à 1450°C du mélange composé de calcaire et d'argile.

Le clinker est ensuite broyé avec environ 5% de gypse pour donner du ciment Portland artificiel (C.P.A.) .

4.2. Ciment

Principe de fabrication ciment portland

Composition du cru :

Composition chimique (poids)			
Chaux (CaO)	Silice (SiO ₂)	Alumine (Al ₂ O ₃)	Oxyde ferrique (Fe ₂ O ₃)
65 à 70 %	18 à 24 %	4 à 8 %	1 à 6 %

4.2. Ciment

Principe de fabrication ciment portland

a) Fabrication par voie humide et semi-humide

Procédé plus ancien, plus simple mais demande plus d'énergie.

Dans ce procédé, les matériaux calcaire et l'argile concassés sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d'eau) avec des grains de diamètre inférieur à 200µm.

La pâte est ensuite stockée dans de grands bassins où elle est continuellement malaxée. Ce mélange est appelé le cru.

Des analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

4.2. Ciment

Principe de fabrication ciment portland

> Voie humide

Pâte envoyée à l'entrée d'un four rotatif d'acier chauffé à son extrémité par une flamme intérieure.

La pâte perd son eau dans le four puis se clinkérise vers 1 450°C.

Le clinker est ensuite refroidi.

> Voie semi-humide

La pâte sortant des cuves de stockage, essorée sur un filtre-presse.

Transformée ensuite en bâtonnets de 2 cm de diamètre. Bâtonnets ensuite introduits sur une grille pour subir un séchage, rentrent dans un four pour être clinkérisés.

Le clinker est ensuite refroidi.

4.2. Ciment

Principe de fabrication ciment portland

b) Fabrication par voie sèche et semi-sèche

Après avoir finement broyé, la poudre est transportée depuis le silo homogénéisateur jusqu'au four, soit par pompe, soit par aérogليسeur.

> Voie sèche

La poudre obtenue alimente un four rotatif composé de deux parties:

- Une partie verticale appelée le pré-chauffeur où la poudre chauffée descend par gravité

- une partie horizontale où la poudre est clinkérisée. Le clinker est ensuite refroidi puis stocké.

4.2. Ciment

Principe de fabrication ciment portland

Voie semi-sèche

La poudre stockée est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20 mm de diamètre à l'aide d'une assiette granulatrice.

Une assiette granulatrice est un cylindre de 2 à 4 m de Ø muni d'un fond incliné à 50%.

L'assiette reçoit la poudre et de l'eau et transforme le mélange en boulette. Ces boulettes passent ensuite dans d'un four rotatif pour y être clinkérisées.

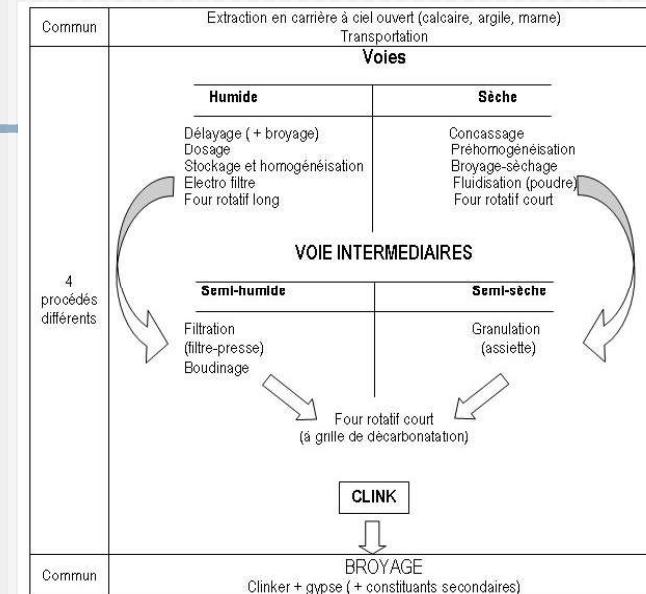


Schéma de la fabrication du ciment

4.2. Ciment

Principe de fabrication ciment portland

c) Broyage et conditionnement

Le clinker obtenu par l'un des procédés est stocké dans les halls qui alimente des broyeurs à boulet.

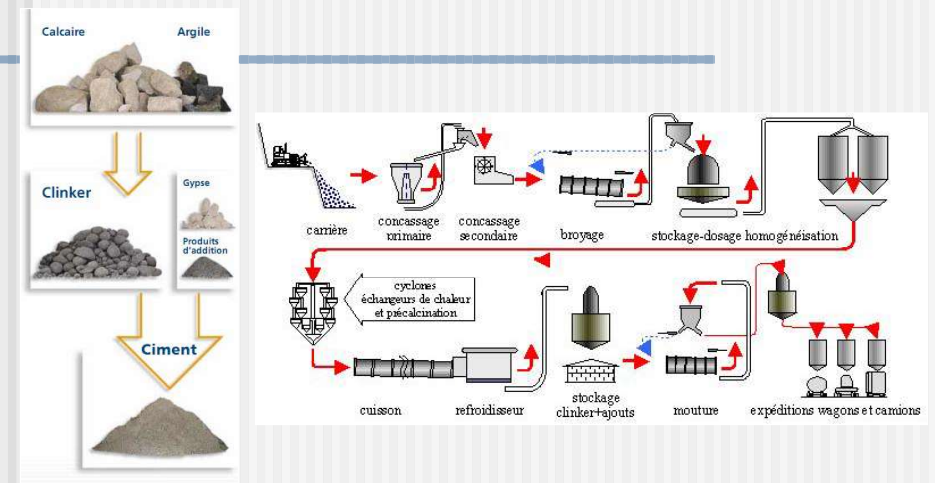
Broyeurs à boulet = cylindres d'acier comportant 2 ou 3 chambres (de 8 à 12 m de long et de 2 à 4 m de Ø) munis intérieurement de boulets d'acier de 20 à 90 mm de diamètre.

Broyeurs produisent environ 30 à 200 T/h.

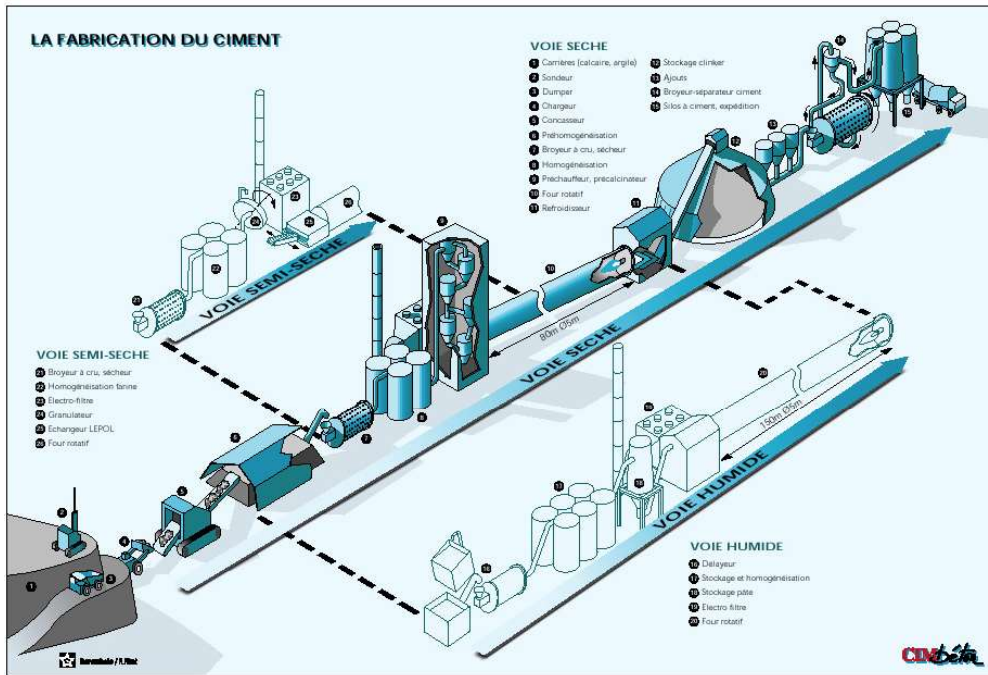
Pendant le broyage, on ajoute 5% de gypse et des constituants secondaires.

Quelque fois des agents de mouture (ex. chlorure) permettant d'éviter la ré-agglomération des grains déjà moulus sont ajoutés.

Ces agents facilitent le remplissage et la vidange des silos et des camions.



LA CIMENTERIE



L'ÉLÉMENT DE BASE

Après cuisson, on obtient le **clinker** composé de :

- Carbonate (CaCO_3) fourni par le **Calcaire**
- Silice (SiO_2), Oxyde de fer (Fe_2O_3), Alumine (Al_2O_3) fournis par l'**Argile**



LE CIMENT

Pour fabriquer un ciment, on utilise :



Clinker

Gypse

Ajouts Eventuels

20% → 95%

+

< 5%

+

0% → 80%

4.2. Ciment

Principe de fabrication ciment portland

d) Constituants du clinker

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont:

- silicate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C3S) (50-70% du clinker).
- silicate bicalcique $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C2S) (10-30% du clinker).
- aluminat tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C3A) (2-15% du clinker).
- alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminat tétracalcique) $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C4AF) (5-15% du clinker).

Le clinker contient encore en faibles quantités des alcalins (Na_2O , K_2O), de la magnésie (MgO), et diverses traces de métaux.

4.2. Ciment

Principe de fabrication ciment portland

Autres constituants du ciment

Les ciments avec constituants secondaires renferment en plus du clinker et du gypse des produits laitiers, cendres volantes, pouzzolanes , ... à raison de 10 à 20 % environ.

Laitier granulé de haut fourneau

- Sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques.
- Obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

4.2. Ciment

Principe de fabrication ciment portland

Autres constituants du ciment

Cendres volantes

Sont les produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépeussierage des gaz de fumée des centrales thermiques utilisant le charbon. On distingue :

- cendres volantes siliceuses ayant des propriétés pouzzolaniques;
- cendres volantes calciques ayant des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.

Les pouzzolanes naturelles

- Sont des roches d'origine volcanique.
- Contiennent des éléments chimiques du clinker à l'état naturel appelés propriétés pouzzolaniques.

4.2. Ciment

Principe de fabrication ciment portland

Autres constituants du ciment

Les pouzzolanes artificielles

Certains matériaux tels que les argiles et les schistes peuvent après chauffage jusqu'à une certaine température développer des propriétés analogues aux pouzzolanes naturelles. On les appelle pouzzolanes artificielles.

Fillers

Roches calcaires ou siliceuses broyées à une finesse élevée (grains de $\varnothing < 50 \mu\text{m}$, certains Fillers parfois appelés « fumée de silice »). Les fillers en générale améliorent considérablement la résistance.

4.2. Ciment

Principales catégories de ciment

Les ciments sont classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

- En fonction de la composition

Sont cinq types principaux, notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains (la notation française est indiquée entre parenthèse):

CEM I: Ciment portland (CPA - dans la notation française),

CEM II: Ciment portland composé (CPJ),

CEM III: Ciment de haut fourneau (CHF),

CEM IV: Ciment pouzzolanique (CPZ),

CEM V: Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau 2.2. Les constituants marqués d'une étoile (*) sont considérés comme constituants secondaires et leur total ne dépasse pas 5%.

	Cim. Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
Laitier (S)	*	6%≤	21%≤	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
Pouzzolanes (Z)	*	total	total	*	*	*	10%≤ total ≤35% (fumée ≤10%)	36%≤ total ≤55% (fumée ≤10%)	18%≤ total ≤30%	31%≤ total ≤50%
Cendre siliceuses (V)	*	≤20%	≤35%	*	*	*			*	*
Fumée de silice (D)	*	(fumée)	(fumée)	*	*	*			*	*
Cendres calcaires (W)	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

4.2. Ciment

Utilisation des ciments

CPJ 35 :

Son domaine d'emploi privilégié est les enduits, mortier et chape . Ce n'est pas un ciment de structure.

Peut être aussi utilisé :

- en maçonnerie, en béton courant (non armé ou armé), fondation, poutre de petite portée, poteau.
- pour les blocs préfabriqués en mortier ou en béton non armé. Ex : agglomérés, hourdis (corps creux).
- pour la stabilisation des sols (grave ciment).
- pour les travaux en grande masse peu sollicité en traction. Ex : barrage.

4.2. Ciment

Principales catégories de ciment

- En fonction de leur résistance normale

Il existe ainsi 4 classes principales : 35 , 45, 55 et HP (HP pour « Haute Performance»).

Il existe des sous classes R (pour les ciments rapides et contrôlés pour leurs part à 2 jours). On retrouve donc par ailleurs les sous-classes : 45R, 55R et HPR .

Les plus utilisés en Afrique sont les CPJ 35 et CPA 45.

Classe	Sous classe	Résistance à la compression en Mpa		
		à 2 jours		à 28 jours
		Limite inférieure nominale	Limite inférieure nominale	Limite supérieure nominale
CPA 35	-	-	25,0	45,0
CPA 45	-	-	35,0	55,0
CPA 45 R	R	15,0	35,0	55,0
CPA 55	-	-	45,0	65,0
CPA 55 R	R	22,5	45,0	65,0
T.H.R. (Très Haute Résistance)	-	30,0	55,0	-

4.2. Ciment

Utilisation des ciments

CPA 45 :

Pour BA (béton armé) sollicité (poteau, poutre, dalle) ; c'est le ciment de structure courant :

- Béton armé,
- Béton précontraint,
- Dallage industriel,
- Béton routier,
- Ouvrage de génie civil

CPA 55 R :

BA très fortement sollicité (ossature porteuse) et avec prise rapide:

- BA avec décoffrage rapide.
- Eléments préfabriqués en BA (poutre, poutrelle, pré-dalle).
- Béton précontraint.

Les CHF et CLZ sont surtout destinés aux fondations, aux travaux souterrains, milieux agressif, travaux en grande masse, travaux d'injection.

4.2. Ciment

Utilisation des ciments

Autres types de ciments :

- Ciments alumineux (ciment réfractaire à 40 % d'alumine), résistant aux milieux agressifs ; prise normale mais durcissement très rapide ; recommandé en milieu froid ; ciment difficile à utiliser,
- Ciment Prompt prise très rapide ; prend en quelques minutes ; utilisé pour le scellement et réparation, ou encore en à la projection (construction de tunnel, talus de soutènement, ...);
- Ciment blanc (souvent CPA 55 et R)
- Ciment prise mer
- Ciment pour eaux sulfatées
- Ciment expansif ou encore à retrait compensé
- Ciment réfractaire (résiste jusqu'à 2000°C) ; en général des ciments alumineux (forte teneur en alumine, de 50 à 80 %)

4.2. Ciment

Caractéristiques du ciment portland

Les temps de début de prise peuvent varier de quelques minutes (ciment prompt) à quelques heures (CPA).

La période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment, est le durcissement.

Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température.

4.2. Ciment

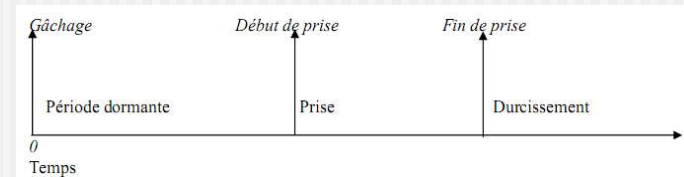
Caractéristiques du ciment portland

Prise et durcissement

Lorsqu'on réalise une gâchée de pâte de ciment, de mortier ou de béton, on constate après un certain temps un raidissement du produit : c'est le début de prise.

Ce raidissement s'accroît jusqu'à ce que le produit obtienne une résistance appréciable en fin de prise.

Les réactions qui se passent dès le début du gâchage et qui se poursuivent dans le temps sont complexes. Il se produit une micro-cristallisation. La multiplication de ces cristaux dans le temps explique l'augmentation de résistance mécanique.



4.2. Ciment

Caractéristiques du ciment portland

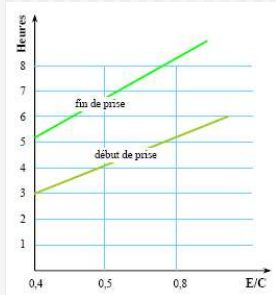
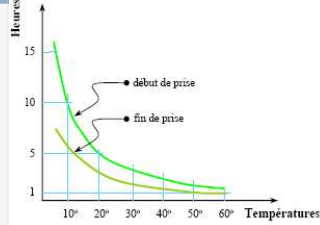
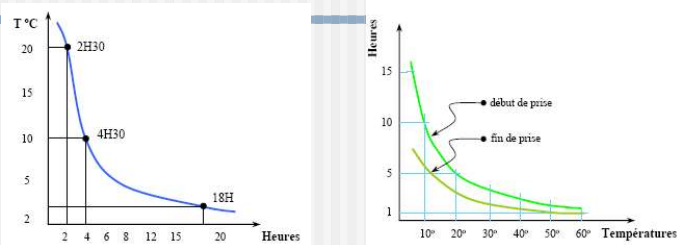
Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels :

- la nature du ciment,
- la finesse de mouture du ciment; plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court,
- la température; à zéro degré la prise est stoppée, plus la température est élevée plus la prise est rapide,
- la présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise,
- l'excès d'eau de gâchage qui a, entre autres inconvénients, une action retardatrice sur la prise .

Pratiquement tous les ciments ont des temps de prise de l'ordre de 2h30 à 3 h.

4.2. Ciment

Influence de la température sur la prise des ciments.



Influence du E/C (eau/ciment) sur le temps de prise .

4.2. Ciment

Principaux essais sur les ciments

a_ Masse volumique apparente

C'est la masse par unité de volume.

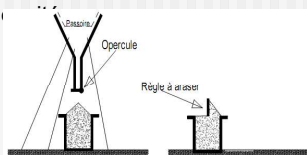
b_ Densité apparente

Est un nombre sans dimension. C'est le rapport de la masse volumique apparente considéré à celle de l'eau pure à 4° C = 1g/cm³.

Elle varie avec le degré de tassement du ciment. Pour cela, on utilisera un entonnoir muni d'une passoire qui limite la hauteur de chute de ciment dans un litre taré.

Cet entonnoir permet d'avoir un tassement identique lors de tous les essais.

La valeur moyenne de la densité apparente D_{ap} est 1.



4.2. Ciment

Caractéristiques du ciment portland

Adjuvants

Sont des produits liquides ou en poudre que l'on ajoute en petite quantité dans les gâchées de béton et qui sont destinées à leur conférer des propriétés particulières.

Parmi les adjuvants, il y en a qui agissent sur la prise :

- Les accélérateurs de prise,
- Les retardateurs de prise.

Les premiers sont utilisés lorsqu'on est astreint à des délais de décoffrage très courts ou lorsque l'on bétonne en temps froid (5 à 10° C).

Les seconds de prise sont utilisés lorsque l'on bétonne par temps chaud ou pour éviter les reprises de bétonnage.

Il existe aussi des adjuvants pour rendre les bétons étanches (béton hydrofuge) ou encore résistant au gel, etc

4.2. Ciment

Principaux essais sur les ciments

c_ Masse volumique absolue

Elle varie en fonction de la composition du ciment, tout en restant comprise entre 3,0 et 3,2 g/cm³

La méthode de mesure de la masse volumique absolue est la même qu'il s'agisse d'un ciment, d'un gravier ou d'un sable.

Le ciment est pesé et son volume est déterminé par déplacement d'un liquide. Avec le ciment on utilise un liquide qui ne réagit pas lui, et qui a un faible coefficient de dilatation (Benzène - CCl₄).

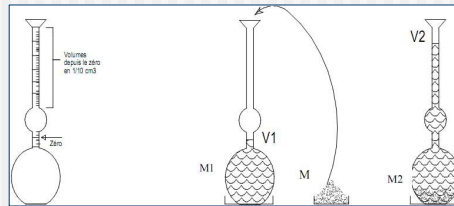
4.2. Ciment

Principaux essais sur les ciments

Mesure au volumétre de Châtelier:

- Un volumétre d'une contenance minimale de 50 cm³.
- Un récipient contenant de l'eau à 20 ± 1°C.
- Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le ciment, du toluène par exemple (le tétrachlorure, le benzène).
- Une balance avec une précision adaptée à la masse de l'échantillon utilisé.
- Un thermomètre, précis à 0,1°C, permettant de connaître la température du laboratoire.

$$\gamma_s = \frac{\text{Poids de ciment (en g)}}{\text{volume absolu du ciment (en g)}}$$



4.2. Ciment

Principaux essais sur les ciments

d_ Mesure de la finesse (surface spécifique)

Est une caractéristique importante lors du gâchage : plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète.

Généralement exprimée par sa surface massique: c'est la surface totale des grains (exprimé en cm²) contenus dans une masse unité de poudre (g).

L'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface.

La surface spécifique des ciments courants est comprise entre 2500 et 4500 cm²/g.

La surface spécifique est mesurée le plus souvent avec le perméabilimètre de BLAINE.

4.2. Ciment

Principaux essais sur les ciments

L'essai a pour but de calculer le débit d'air susceptible de passer à travers la poudre amenée à une compacité fixée.

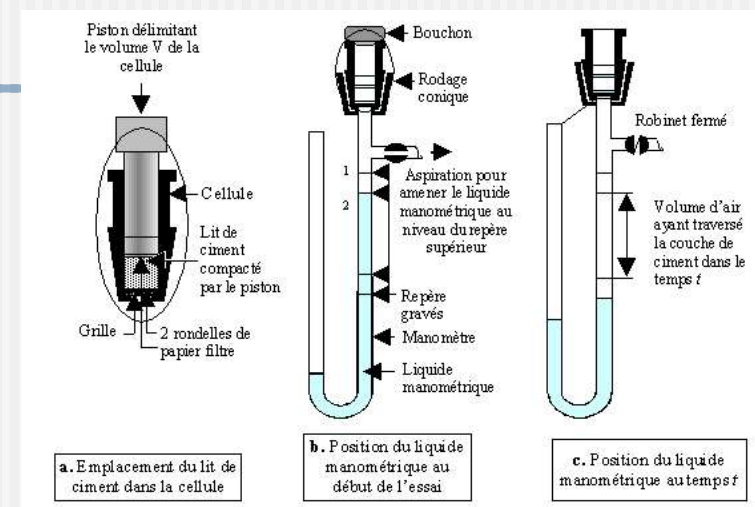
On mesure la perméabilité d'une couche de ciment tassée dont la porosité est connue = 0,5.

On aspire l'air au travers de la couche de ciment par l'intermédiaire d'une poire et on crée une dépression grâce à un tube manométrique et on mesure le temps de descente du liquide entre deux repères.

La perméabilité étant liée à la surface spécifique des grains.

Vitesse d'écoulement de l'air à travers un corps granulaire est d'autant plus faible que les grains composant de ce corps sont fins.

4.2. Ciment



4.2. Ciment

Méthodologie : Pour la mesure de la vitesse d'écoulement de l'air à travers la couche de ciment :

Etape 1 : Placer la grille plus une rondelle de papier filtre, plus la quantité de ciment (m) calculée. Ajouter une deuxième rondelle de papier filtre.

Etape 2 : Tasser et ôter le piston.

Etape 3 : Vérifier le niveau du liquide (repère 4).

Etape 4 : Placer la cellule sur l'ajutage et s'assurer de l'étanchéité de l'ensemble.

Etape 5 : Aspirer le liquide jusqu'au repère 1 et fermer le robinet.

Etape 6 : L'air traverse alors le ciment. Chronométrer au 1/5 ème de seconde près, le temps (t) mis par le niveau du liquide pour passer du repère 2 au repère 3.

Etape 7 : Noter la température : en déduire la valeur de la viscosité de l'air, à partir des annexes de la norme NF EN 196-6.

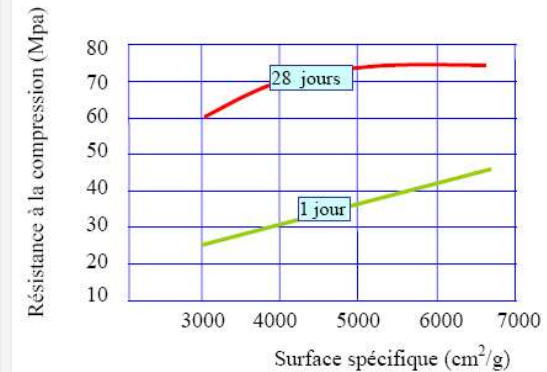
Etape 8 : En déduire la surface massique

$$S = k \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}}$$

- . S - Surface spécifique (cm²/g).
- . k - Constante de l'appareil.
- . e - Porosité de la couche tassée.
- . t - Temps mesuré en secondes.
- . ρ - Masse volumique (g/cm³).
- . η - Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises).

4.2. Ciment

Principaux essais sur les ciments



Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression

4.2. Ciment

Principaux essais sur les ciments

e_ Détermination du pourcentage d'eau normale (Essai de consistance)

Il s'agit de déterminer la quantité d'eau à ajouter à un poids de ciment pour obtenir une pâte dite normale.

L'essai est réalisé à l'aide de l'appareil de VICAT muni d'une sonde dite de VICAT.

La sonde de VICAT de 10 mm de Ø, est laissée sans vitesse initiale depuis la surface d'un moulage de pâte de 40 mm de haut. Elle s'enfonce sous son propre poids pour s'arrêter à une distance (d) du fond.

La pâte est dite normale lorsque la sonde s'arrête à 6 ± 1 mm du fond. On exprime le résultat sous le rapport E/C.



4.2. Ciment

Principaux essais sur les ciments

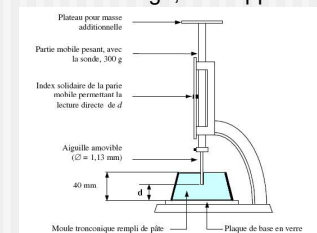
f_ Essai de prise

Les début et fin de prise des pâtes de ciment (liants hydrauliques) sont importants à connaître afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons.

Ils sont mesurés sur pâte normale à l'aide de l'appareil de VICAT muni d'une aiguille de VICAT de 1,13 mm de diamètre.

Quand, sous l'effet d'une charge de 300g, l'aiguille s'arrête à une distance (d) du fond du moule telle que d= 4mm ± 1 mm, on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « temps de début de prise ».

Le temps de fin de prise est général que l'instant où l'aiguille ne laisse plus de trace à la surface de la pâte.



4.2. Ciment

Principaux essais sur les ciments

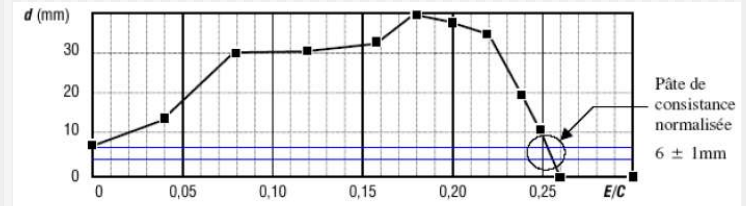
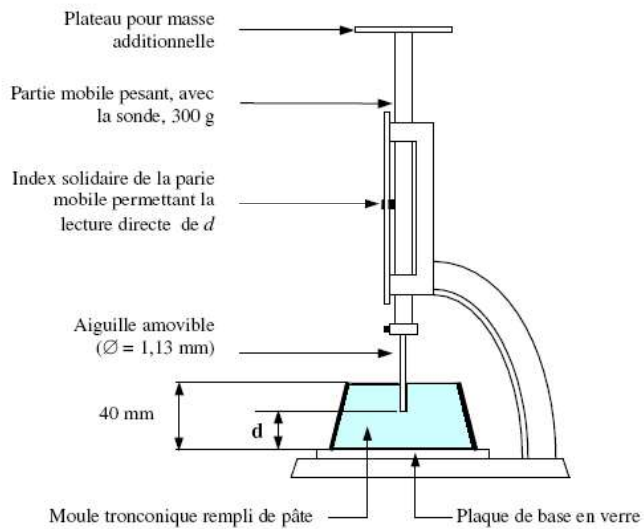


Fig. 5- Evolution de la consistance d'une pâte de ciment en fonction de E/C

4.3. Chaux

a Définition

Les liants hydrauliques sont des poudres fines qui ont la propriété de former une pâte durcissant aussi bien à l'air que sous l'eau.

Il existe deux types de liant hydraulique : la chaux et le ciment.

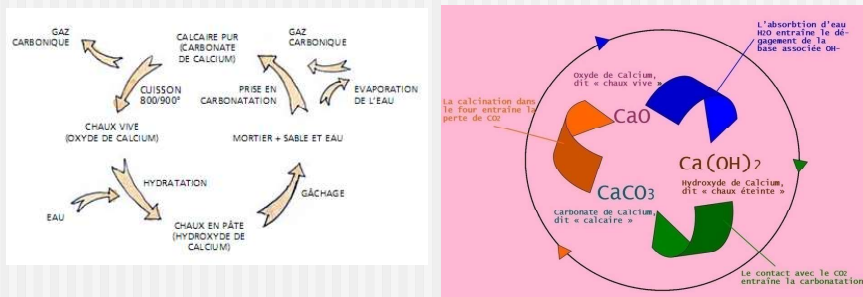
Ces liants hydrauliques diffèrent par leur mode de fabrication.

Ils sont tous élaborés à partir de pierre calcaire principalement.

La chaux est le produit de la cuisson d'un calcaire, suivi d'une extinction à l'eau.

4.2. Chaux (Liants)

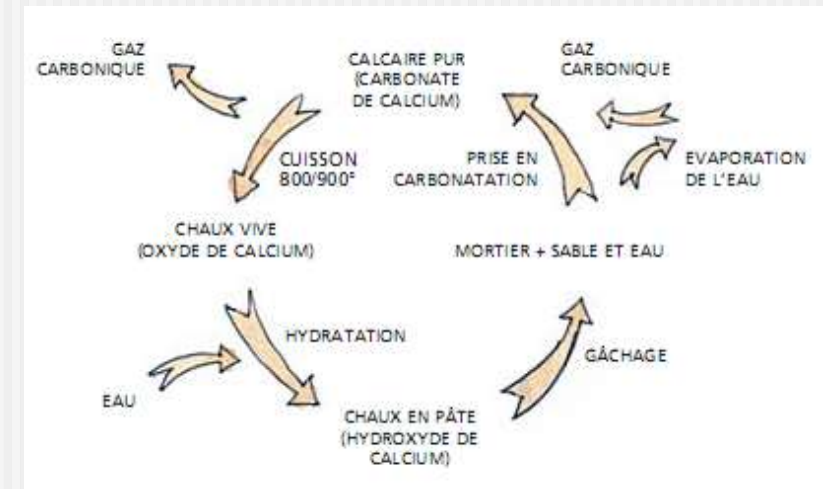
b Cycle de la chaux



	Langage commun	Langage technique	Formules chimiques	Poids en g
ETAT 1	PIERRE CALCAIRE	Carbonate de chaux	$CaCO_3$	100 g
ETAT 2	+ FEU	CUISSON	- CO_2	-44 g
	= CHAUX VIVE	Oxyde de calcium	= CaO	=56 g
ETAT 3	+ EAU	EXTINCTION	+ H_2O	+18 g
	= CHAUX ÉTEINTE	Hydroxyde de calcium	= $Ca(OH)_2$	=74 g
ETAT 4 = 1	+ EAU du mortier + AIR (- Eau évaporée)	PRISE HYDRAULIQUE ET PRISE AÉRIENNE	+ CO_2	+44 g -18 g
	CHAUX CARBONATÉE	Carbonate de chaux	= $CaCO_3$	= 100 g

4.3. Chaux

b Cycle de la chaux



4.3. Chaux

c Types de chaux

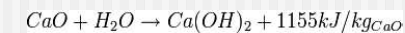
- Chaux aérienne :

Est obtenue par calcination d'un calcaire très pur à une température variable de 800 à 900 °C.

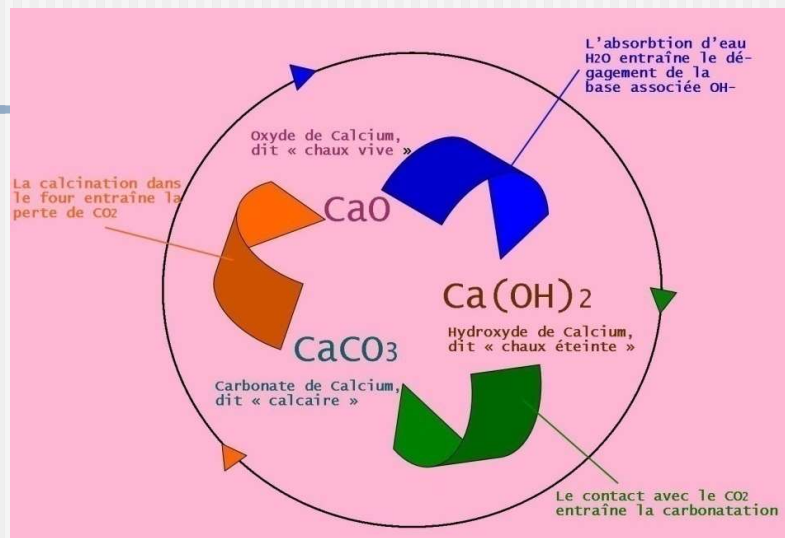
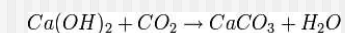
$CaCO_3$ constituant l'essentiel du calcaire, se dissocie pour donner l'oxyde de calcium (CaO , chaux vive) et du CO_2 .

Egalement aériennes, les chaux magnésiennes proviennent d'un calcaire magnésien.

La transformation de chaux vive en chaux éteinte s'effectue par ajout d'eau :



La prise de la chaux aérienne s'effectue par carbonatation :



4.3. Chaux

c Types de chaux

- Chaux hydraulique :

La cuisson du calcaire argileux donne une chaux hydraulique qui fait prise par réaction à l'eau.

La chaux sera plus hydraulique et plus résistante si le pourcentage d'argile est plus élevé.

Après extinction, ce type de chaux doit être utilisé dans les 24h avant qu'elle ne fasse prise.

4.3. Chaux

d Utilisation de la chaux dans la construction

L'utilisation de la chaux a progressivement diminué au profit du ciment.

Aussi, la chaux doit retrouver une utilisation dans les domaines où son emploi est préférable, grâce à ses qualités de plasticité, d'élasticité, de perméabilité à la vapeur d'eau.

Ces qualités sont particulièrement adaptées à la réalisation d'enduits et de badigeons.

4.3. Chaux

d Utilisation de la chaux dans la construction

Exemples d' usages de la chaux aérienne :

- Les finitions teintées.
- Les mortiers comprenant de la terre ou un sable terreux.
- Les travaux de finition lents (le mortier peut se conserver si on l'enferme dans un film plastique).

Situations à éviter :

- Les murs humides.
- Les sous couches devant recevoir une finition, à moins de couper la chaux aérienne avec une chaux hydraulique.

4.3. Chaux

d Utilisation de la chaux dans la construction

Exemples d' usages de la chaux hydraulique :

- Enduire les supports forts (pierres dures).
- Les parties basses des murs exposés aux remontées d'humidité.
- Monter des murs en pierre.
- Maçonner des tuiles.
- Les mortiers rebattus (préparés à l'avance).

Situations à éviter :

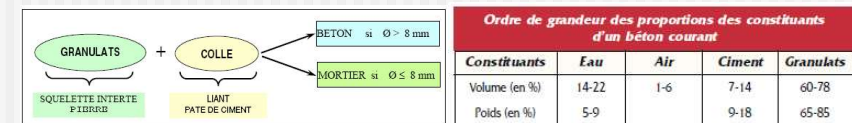
- Les chaux hydrauliques fortes sur les supports faibles. On utilise alors une NHL 2.
- Les supports en plâtre, à moins d'un avis du fabricant de chaux garantissant l'absence de réaction avec le plâtre.

4.4. Béton

a Définition

Le béton est devenu le symbole de la construction contemporaine

- Matériau de structure le plus utilisé au monde.
- Indispensable pour la construction des ouvrages (ponts, dalots, murs de soutènement), des bâtiments (poutres, chaînage, dallage), ...
- Mélange en proportion convenable de liant (ciment, chaux), d'agrégats (graviers, sable) et d'eau.

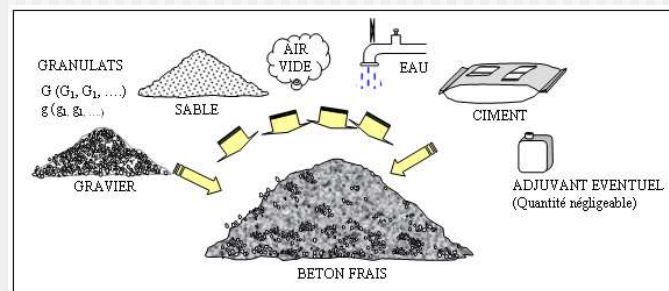


4.4. Béton

b Fabrication

Le béton de faible quantité peut être fabriqué manuellement à l'image des mortiers. Pour les grandes quantités, il est fait appel à l'emploi de bétonnière.

Les constituants du béton:



4.4. Béton

b Fabrication

Préparation du béton:

De l'eau, du ciment, des granulats : l'apparente simplicité de la fabrication du béton est trompeuse.

Les bétons font appel à des compétences scientifiques très pointues.

Dosage, proportions, qualité du ciment et des granulats sont autant de variables qui influent sur les propriétés du béton.

Des adjuvants peuvent être ajoutés en faible quantité (moins de 10 kg/m³) pour doter le béton de caractéristiques spécifiques :

- Réducteurs d'eau pour produire un béton de qualité, très fluide avec moins d'eau,
- Superplastifiants ou fluidifiants pour produire des bétons autoplacants et autonivelants,
- Hydrofuges de masse pour bétons imperméables,
- Entraîneurs d'air rendent le béton insensible au gel et aux produits dégivrants,
- Accélérateurs de prise permettent de « décoffrer » rapidement,
- Retardateurs utilisés pour maintenir l'ouvrabilité du béton.

4.3. Béton

b Fabrication

Préparation du béton courant :

Pour l'établissement des abaques, trois classes granulaires ont été retenues :

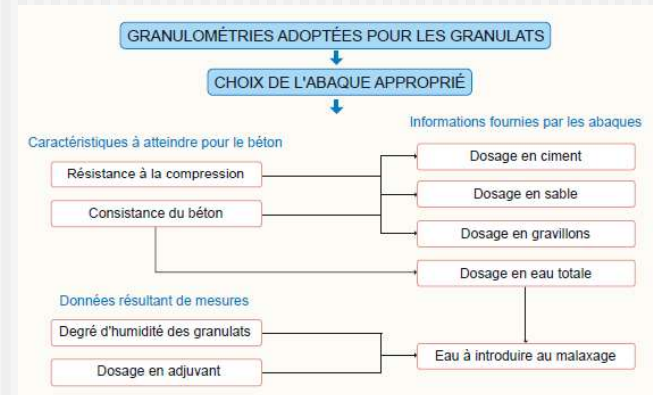
- un sable 0/4 ;
- deux gravillons 5,6/12,5 et 5,6/20.
- Ciment de structure

4.4. Béton

b Fabrication

Préparation du béton:

Méthode pratique de composition : Abaques de Dreux



4.4. Béton

b Fabrication

Préparation du béton:

Méthode pratique de composition : Abaques de Dreux

CAS D'UN BÉTON FIN = 12,5 mm.

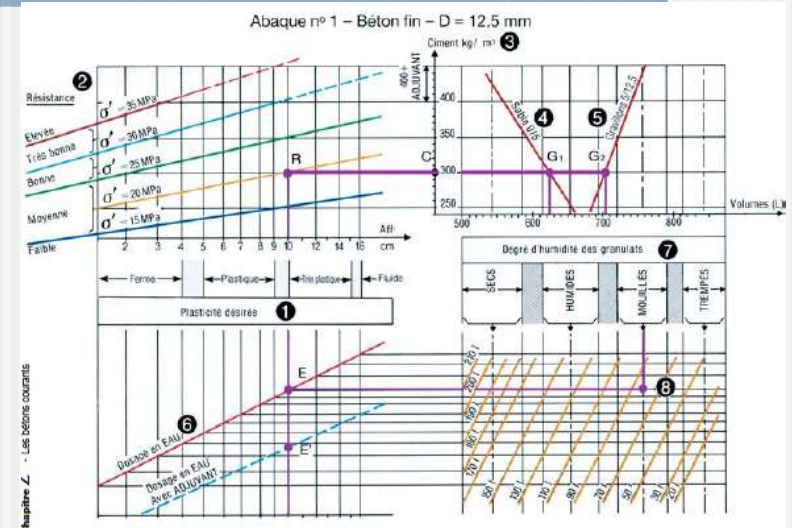
Abaque n° 1.

On désire :

1. un béton très plastique (affaissement 10 cm)
2. une résistance moyenne : 20 MPa (environ)
3. ciment (classe 32,5) 300 kg/m³
4. sable 0/4 mm à l'état sec 625 litres
5. gravillons 5,6/12,5 mm 705 litres
6. dosage en eau – point E
7. on suppose que les granulats sont « mouillés »
8. la lecture sur la grille donne 80 litres d'eau environ à ajouter.

4.4. Béton

b Fabrication



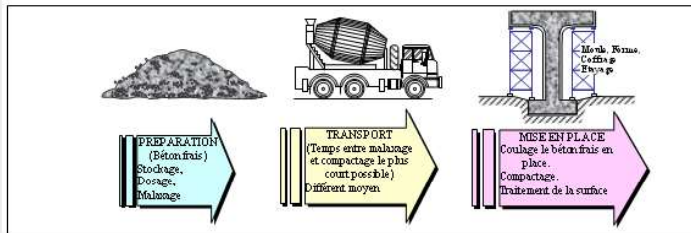
4.4. Béton

b Fabrication

Préparation du béton:

Les différents constituants sont mesurés proportionnellement à la quantité de liant utilisé.

- Mélanger le sable et le ciment
- Ajouter ensuite le gravier nécessaire et brasser de nouveau jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.
- L'eau est ajoutée que progressivement jusqu'à l'obtention de la plasticité souhaitée.



4.4. Béton

b Fabrication

Préparation du béton:

Dosage en eau :

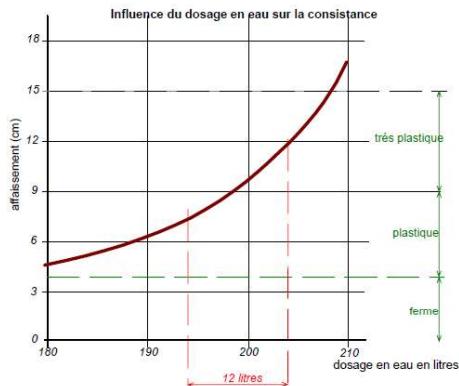
Paramètre :

- permettant de régler la consistance du béton,
- Son augmentation en traine une diminution de la résistance du béton et par conséquent de sa durabilité.

4.4. Béton

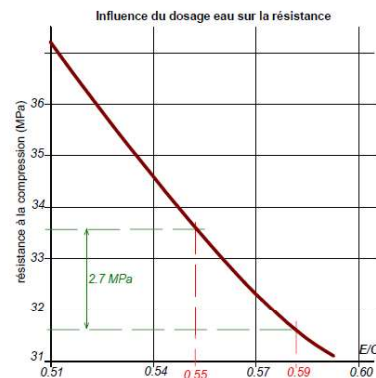
b Fabrication

Préparation du béton:



Béton : CPA-CEM I 42.5 dosé à 350 kg/m³, D = 20 mm, granulats siliceux concassés

Le passage de la consistance plastique à la consistance très plastique se fait par une augmentation de 12 litres d'eau, soit une variation de E/C de 0.55 à 0.59



Béton : CPA-CEM I 42.5 dosé à 350 kg/m³, D = 20 mm, granulats siliceux concassés

La variation de E/C de (0.55 - 0.59 = -0.04) conduit à une variation de la résistance de -2.70 MPa.

4.4. Béton

c Propriétés des bétons

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés à l'état frais, alors qu'il est plastique et qu'on peut le travailler; et à l'état durci, alors que sa forme ne peut plus être modifiée mais que ses caractéristiques continuent à évoluer durant de nombreux mois, voire des années.

Le béton frais

- Ouvrabilité (propriété essentielle) le rend apte à remplir n'importe quel volume, c.-à-d. l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures.

- Facteurs influant sur l'ouvrabilité: type et dosage en ciment, forme des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et dosage en eau.

4.4. Béton

c Propriétés des bétons

Le béton durci

- Porosité : un facteur déterminant de la durabilité du béton durci car elle influence la résistance, la carbonatation et la tenue
- Résistance mécanique à la compression : souvent recherchée pour le béton durci. Elle dépend en particulier du type et du dosage du ciment, de la porosité du béton et du facteur E/C.

Parmi les formules qui permettent de prévoir les résistances, celle de Féret est la plus connue.

$$R = K(C/C + E + V)^2$$

R = résistance du béton

k = coefficient dépendant de la classe de ciment, du type de granulats et du mode de mise en œuvre

C = dosage en ciment

E = dosage en eau

V = volume d'air subsistant

4.4. Béton

c Propriétés des bétons

Le béton durci

- Retrait hydraulique avant prise et en cours de prise : dû à un départ rapide d'une partie de l'eau de gâchage, par évaporation ou par absorption (coffrage, granulats poreux). Il provoque une forte contraction de la pâte qui fait fissurer la surface externe.
- Retrait thermique : dû à des baisses rapides de T provenant:
 - * soit du ciment lui-même lors de son hydratation aux premiers âges, qui provoque une élévation de T, suivie de son refroidissement;
 - soit des variations climatiques du milieu.
- Pour un béton usuel, l'ordre de grandeur du retrait total est de 200 à 300 µm/m.

4.4. Béton

d Fonctions des bétons

Fonctions essentielles assurées par les bétons :

- fonction structure (poteaux, poutres, voiles por porteurs, planchers) ;
- fonction plancher (dalles pleines, poutrelles armées ou précontraintes plus hourdis) ;
- fonction enveloppe (béton banché, panneaux préfabriqués, éléments maçonnés) ;
- fonction couverture (dalle béton utilisée en terrasses, tuiles en béton teinté).

4.4. Béton

e Types de bétons

En fonction des besoins particuliers du chantier, des bétons aux propriétés particulières peuvent être fabriqués et livrés.

- Bétons usuels armés ou non (gamme de résistance 20 à 40 MPa).
- Bétons précontraints : pour réaliser des pièces fortement sollicitées à la flexion. Il s'agit de techniques qui consistent à tendre (comme un ressorts) l'armature du béton, et donc à comprimer, au repos, ce dernier.
- Bétons à Hautes Performances (BHP) (gamme de résistance 60 à 100 MPa). Ils sont également plus durables, plus étanches grâce à une porosité très faible.

4.4. Béton

e Types de bétons

- Béton Auto-plaçant (BAP) : est très fluide et se met en place sans compactage ni vibration. Il remplit de lui-même les moindres interstices.
- Bétons légers (800 à 2000 kg/m) pour la réhabilitation, l'isolation thermique et pour le gain de poids d'un ouvrage. Il est obtenu par ajout au béton, des granulats légers (polystyrène, ponce, granulats de bois, de schistes, argile expansé, ...) permettant de réduire sa masse volumique.
- Bétons lourds pour le confinement de matières radioactives.
- Bétons fibrés (métal, verre, synthétique) pour la réalisation de plaques minces et pour améliorer la tenue à la fissuration.

4.5. Mortier

e Types de bétons

- Béton Auto-plaçant (BAP) : est très fluide et se met en place sans compactage ni vibration. Il remplit de lui-même les moindres interstices.
- Bétons légers (800 à 2000 kg/m) pour la réhabilitation, l'isolation thermique et pour le gain de poids d'un ouvrage. Il est obtenu par ajout au béton, des granulats légers (polystyrène, ponce, granulats de bois, de schistes, argile expansé, ...) permettant de réduire sa masse volumique.
- Bétons lourds pour le confinement de matières radioactives.
- Bétons fibrés (métal, verre, synthétique) pour la réalisation de plaques minces et pour améliorer la tenue à la fissuration.

4.6. Matériaux routiers

a Liants routiers

Liants hydrocarbonés :

- Goudrons (de moins en moins utilisés)
- Bitumes:
 - *Bitumes naturels: résidus d'anciens gisements de pétrole*
 - *Asphalte naturel: roche calcaire imprégnée d'hydrocarbures*
 - *Bitume de pétrole : distillation du pétrole brut*

2 fonctions :

- *maintenir une cohésion entre les grains de granulats et assurer l'imperméabilisation du matériau pour la couche de roulement*
- *Se déforment sans cassure ni arrachement (cohésion) et s'adhèrent fortement aux granulats (adhésivité).*

4.6. Matériaux routiers

a Liants routiers

Liants hydrocarbonés :

Types	Origine	adhésivité	fluidité	vieillessement
goudron	Distillation de la houille	bonne	Grande (mise en œuvre à 100°C)	Rapide
bitume	Distillation du pétrole	Moins bonne	Moins fluide (mise en œuvre à 180°C)	Lentement

Le goudron n'est plus utilisé car son innocuité n'est pas démontré.

4.6. Matériaux routiers

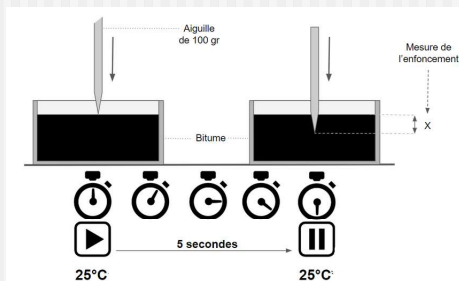
a₁ Liant routier : Bitumes

Caractéristiques des bitumes :

→ Mesure de consistance :

Pénétrabilité à l'aiguille

- Mesure de l'enfoncement dans le bitume chauffé à 25°C (15°C) pendant 5s d'une aiguille sous une masse de 100g.
- 5 classes : 180-220, 80-100, 60-70, 40-50, 20-30.



Lien montrant le mode d'essai :
Source : <https://www.wikip.fr/classement-des-bitumes>

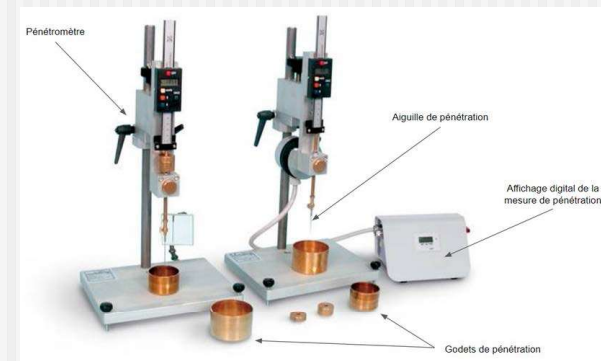
4.6. Matériaux routiers

a₁ Liant routier : Bitumes

Caractéristiques des bitumes :

→ Mesure de consistance :

Pénétrabilité à l'aiguille



Source : <https://www.wikip.fr/classement-des-bitumes>

4.6. Matériaux routiers

a₁ Liant routier : Bitumes

Caractéristiques des bitumes :

→ Mesure de consistance :

Température bille anneau

- Repère de changement de consistance avec l'augmentation de la T°
- = Point de ramollissement appelé également température bille et anneau (TBA)
- Principe : mesurer la température à laquelle une bille d'acier de 3,5 g traverse un anneau de laiton rempli de bitume, le tout immergé dans un bain d'eau (si $30^{\circ}\text{C} < \text{TBA} \leq 80^{\circ}\text{C}$), ou de glycérine (si $80^{\circ}\text{C} < \text{TBA} \leq 150^{\circ}\text{C}$) chauffé à la vitesse constante de $+5^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

4.6. Matériaux routiers

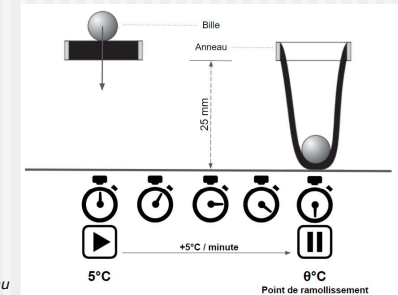
a₁ Liant routier : Bitumes

Caractéristiques des bitumes :

→ Mesure de consistance :

Température bille anneau

- Sous l'effet du poids de la bille et de la température, le bitume flue. Quand la poche ainsi créée touche le plateau inférieur de l'équipage, on note la température atteinte qui caractérise le point de ramollissement (TBA).



Lien montrant le mode d'essai:
<https://www.wikip.fr/classement-des-bitumes/essai-bille-anneau>

4.6. Matériaux routiers

a₁ Liant routier : Bitumes

Caractéristiques des bitumes :

→ Mesure de consistance :

Température bille anneau

- 1) Préparation de l'anneau de laiton
- 2) Montée en Température
- 3) Mesure de la Température de ramollissement



T.B.A. = température en °C

► Spécifications NF EN 12591: - 5 catégories: 34/43, 42/48, 45/51, 50/56 et 55/63

source : cours route ups master 2011 i impression

4.6. Matériaux routiers

a₁ Liant routier : Bitumes

Caractéristiques des bitumes :

→ Mesure de consistance :

Spécifications des bitumes routiers

	Unité	Méthode d'essai	Classes								
			20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
Pénétrabilité à 25 °C	x 0,1 mm	EN 1426	20-30	30-45	35-50	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220	250-330
Point de ramollissement	°C	EN 1427	55-63	52-60	50-58	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43	30-38

4.6. Matériaux routiers

a₁ Liant routier : Bitumes

Classification des bitumes

→ Bitumes purs :

- Employés pour la construction et l'entretien des chaussées
- Obtenus par raffinage à partir de bruts pétroliers.
- Aucun ajout destiné à modifier leur consistance ou leurs propriétés

4.6. Matériaux routiers

a₁ Liant routier : Bitumes

Classification des bitumes

→ Bitumes purs :

Spécifications des bitumes purs selon la norme NM 03.4.158

	Unité	Méthode d'essai	Classes				
			20/30	35/50	50/70	70/100	160/220
Pénétrabilité à 25°C	x 0,1 mm	EN 1426	20-30	35-50	50-70	70-100	160-220
Point de ramollissement	°C	EN 1427	55-63	50-58	46-54	43-51	35-43

- Grade 20/30 utilisés pour enrobés bitumineux des routes à fort trafics.
- Grades 35/50 (plus utilisés au Maroc) pour enrobés bitumineux destinés aux couches de liaison et de roulement.
- Grade 50/70, 70/100 et 160/220 sont utilisés pour la fabrication des émulsions de bitume.

4.6. Matériaux routiers

a₁ Liant routier : Bitumes

Classification des bitumes

→ Bitumes fluidifiés :

- Obtenus par mélange de bitume pur et de diluants légers provenant de la distillation du pétrole (essence, kérosène, gasoil)
- Ne sont plus utilisés au Maroc depuis l'arrêt de la SAMIR en 2015.
- Sont remplacés par les émulsions de bitumes.

→ Bitumes fluxés :

- Obtenus par mélange de bitume pur et de diluants légers provenant de la distillation du goudron brut (huile de houille)

4.6. Matériaux routiers

a₁ Liant routier : Bitumes

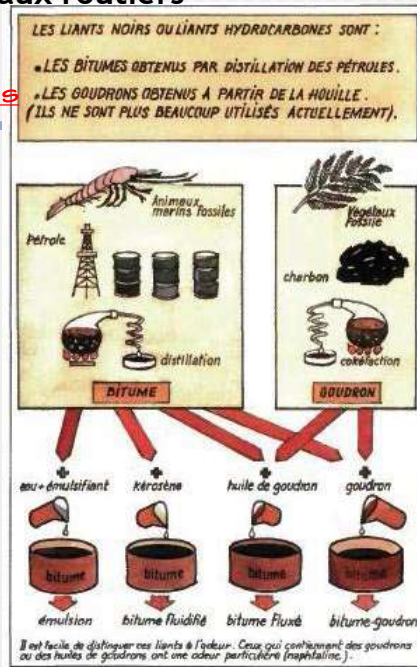
Classification des bitumes

→ Emulsions de bitume :

- Obtenus par dispersion dans de l'eau de fines gouttelettes de bitume en présence d'un émulsifiant
- Emulsifiants : composés organiques de la classe des amines.

4.6. Matériaux routiers

a₁ Liant routier : Bitumes



4.6. Matériaux routiers

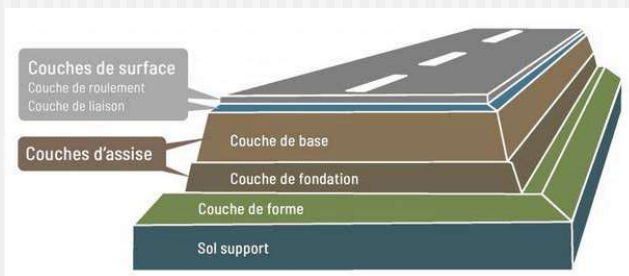
b Matériaux (Granulats) non traités

Matériaux utilisés en assise de chaussée

Une chaussée est normalement* composée de 3 parties :

- Couche de surface : couche de roulement + couche de liaison
- Couches d'assise faites couches de base et de fondation.
- Support : couche de forme éventuellement sur le sol ou directement l'ancienne chaussée.

* Toutes les couches n'existent pas nécessairement



4.6. Matériaux routiers

a₁ Liants routiers hydrauliques

Composés généralement de fines dont les propriétés chimiques permettent une prise en présence d'eau (voir chapitre "liants").

- Ciments
- Laitiers
- Cendres volantes
- Pouzzolanes
- Chaux grasses

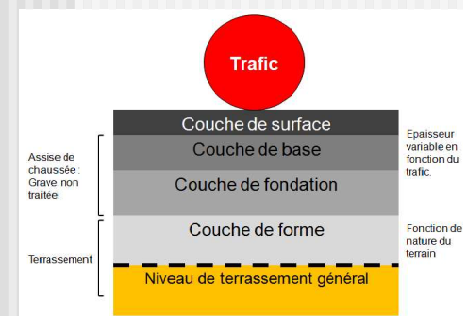
Sont utilisés pour remplacer les liants bitumineux.

Permettent d'augmenter la cohésion des graves

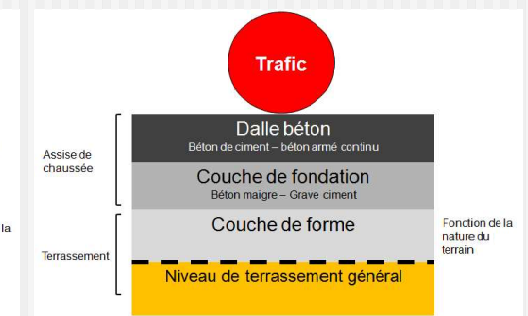
4.6. Matériaux routiers

b Matériaux (Granulats) non traités

Chaussée souple



Chaussée dure



Source:
<https://www.wikitp.fr/structure-de-chausseeacutees>

4.6. Matériaux routiers

b Matériaux (Granulats) non traités (MNT)

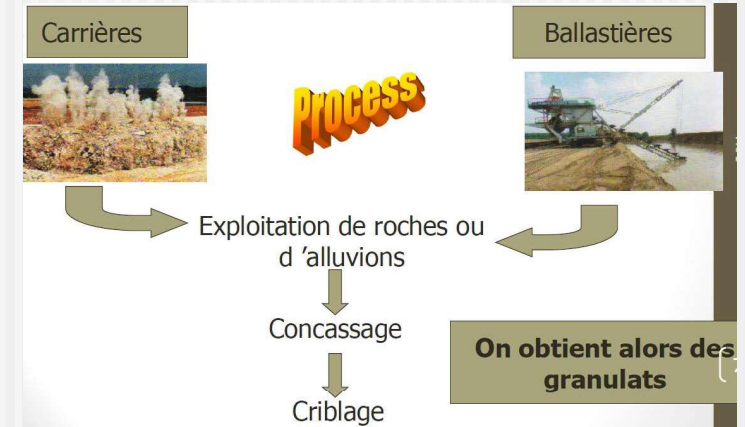
→ Rôles des couches :

Chaussée		Rôles
De surface	De roulement	S'opposer à la pénétration de l'eau
	De liaison	Résister aux efforts horizontaux des pneumatiques par cisaillement (accélération, freinage, rotation des roues non motrices)
D'assises	De base	Résister à la pression verticale
	De fondation	Interface
Plate-forme support de chaussée (PST)		
De forme		Uniformiser la portance du sol
Arase terrassement (AR)		
Sol support		Possibilité de traiter aux liants hydrauliques

4.6. Matériaux routiers

b Matériaux (Granulats)

Quel type de matériau faut-il utiliser pour confectionner une chaussée ?
(Voir chapitre granulats)



4.6. Matériaux routiers

b Matériaux (Granulats)

→ Classification des granulats :

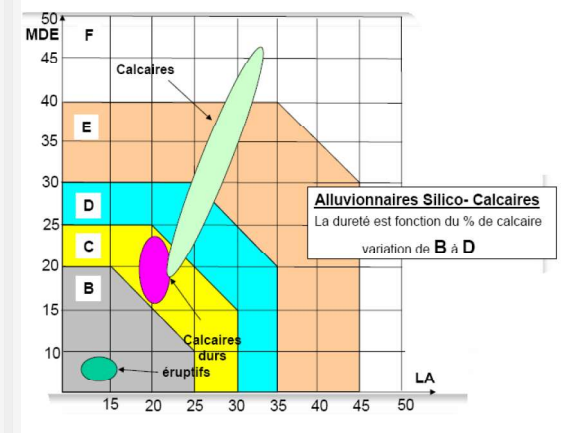
Composés généralement de fines dont les propriétés chimiques permettent une prise en présence d'eau (voir chapitre "liants").

TERME	DEFINITION
FILLER	La plupart des grains passent au tamis de 0,063mm
FINES	Fraction granulométrique d'un granulat qui passe au tamis de 0,063mm
SABLE	Mélanges bitumineux et enduits: $D \leq 2 \text{ mm}$
	Matériaux traités et non traités $0/6,3\text{mm}$
GRAVILLON	Mélanges bitumineux et enduits: $d \geq 2\text{mm}$ et $D \leq 45 \text{ mm}$
	Matériaux traités et non traités : $d \geq 1\text{mm}$ et $D > 2 \text{ mm}$
GRAVE	Granulats formés d'1 mélange de gravillons et de sable (peut provenir d'1 mélange ou d'1 fabrication directe)

4.6. Matériaux routiers

b Matériaux (Granulats)

→ Classes de résistance mécanique des granulats :



4.6. Matériaux routiers

b Matériaux (Granulats=graves) non traités (GNT)

→ Tout venant :

- Chassée souple Utilisables pour la couche unique ou de forme ou de fondation
- Granularité : 0/100, 0/150, 0/250, 0/300
- Attention à la teneur en fines et donc sensibles à l'eau

4.6. Matériaux routiers

b Matériaux traités (GT)

→ Grave non traité (GNT) :

- GNA : grave non traitée à granulométrie 0/31,5 issue d'un concassé pur ou ayant une propreté non mesurable.
- GNB : grave non traitée à granulométrie 0/31,5 issue d'un mélange de sables et gravillons selon une formule préétablie.
- CND : grave non traitée à granulométrie 0/31,5 ou 0/40 non concassée (rarement utilisée en couche de base pour les routes revêtues).
- Granularité : 0/14 ; 0/20 ; 0/31,5 ; 0/63 (mm)
- Utilisables pour la couche de forme avec géotextile, couches de fondation et base

4.6. Matériaux routiers

b Matériaux traités

→ Grave traité au liant hydrocarboné : Exemples

Béton bitumineux

Couche de roulement :

- Béton Bitumineux Souple (BBS 2) faible trafic
- Epaisseur : 3 à 6 cm
- Granulat à granularité : 0/10
- % Liants : 5,8 à 6,2 %

Grave bitume

Couche d'assise :

- GB : grave bitume
- Epaisseur : de 6 à 14 cm
- Granularité : 0/14
- % liants : 3,8 à 4,2 %

4.6. Matériaux routiers

b Matériaux traités

→ Grave traité au liant hydraulique (GTLH) : Exemples

Grave ciment

Couches : forme et assises

- GC : grave ciment
- Epaisseur : 18 à 28 cm
- Granularité : 0/14 et 0/20
- % liants : 3 à 4 %

4.7. Métaux

a Définition

Se distinguent :

- métaux ferreux (fer, fonte, acier)
- métaux non ferreux (Al, Zn, Cu, Pb)
- alliages (laiton, bronze, duralium, etc) .

Métaux ferreux:

Se différencient par leur teneur en carbone qui influence leur résistance mécanique.

- Fer : moins de 0,1 % de C
- Aciers doux : 0,1 à 0,3 % C = fers profilés
- Aciers mi durs : 0,3 à 0,35 % C = pièces de force
- Aciers durs : 0,35 à 2 % C = outils durs et tranchants
- Fonte : 2,5 à 6 % = moulage des tuyaux

4.7. Métaux

a Définition

Métaux non ferreux:

Cuivre

Extrait à partir de la chalcopryrite CuFeS_2 .

Métal rouge ou jaune ($d = 8,9$), malléable et ductile.

- S'oxyde à l'air libre (vert de gris),
- Bon conducteur d'électricité et chaleur,
- S'emploie en tuyauterie (eau chaude),
- En couverture (tôles de 0,1 à 0,5 mm d'épaisseur),
- En câble conducteur (électricité).

Etain

S'obtient à partir de la cassitérite (SnO_2).

Métal blanc et mou ($d = 7,3$) qui ne s'emploie qu'avec d'autres métaux: Sn et Cu donnent le bronze.

Préserve de l'oxydation.

4.7. Métaux

a Définition

Plomb

Métal lourd ($d = 11,34$) mou, malléable, obtenu à partir de la galène, et utilisé en :

- tuyaux pour les canalisations d'eau et gaz,
- isolation phonique,
- protection contre les radiations.

Chrome

Obtenu par la réduction de la chromite (FeCr_2O_4) par le charbon dans un four électrique.

Utilisé comme constituant secondaire d'aciers ou comme placage sur les métaux ferreux.

4.7. Métaux

a Définition

Zinc

Obtenu à partir de la blende ZnS.

Métal gris, peu oxydable ($d = 7,1$).

S'emploie pour protéger les aciers (galvanisation), pour les couvertures, les gouttières, ...

Aluminium

S'obtient par l'électrolyse de l'aluminium extraite de la bauxite. Métal blanc, léger ($d = 2,7$), ductile, malléable.

Utilisé pour les canalisations électriques, les couvertures, les ouvertures.

4.7. Métaux

a Définition

Alliages :

Aciers spéciaux

Alliage de fer et d'autres métaux :

- Aciers semi inoxydables (avec du cuivre)
- Aciers inoxydables avec : Cr+Ni, Cr+Ni+Ti, Cr+Ni+Zn

Cr augmente la résistance

Autres alliages

Laiton : alliage de Cu et Zn,

Bronze : alliage de Cu et Sn,

Duralium : alliage de Al, Cu et Mn, (grande résistance sous faible poids),

Maillechort : alliage de Cu, Ni et Zn,

Alpax : alliage de Al et Si (se moule facilement).

4.7. Métaux

b Usages dans la construction

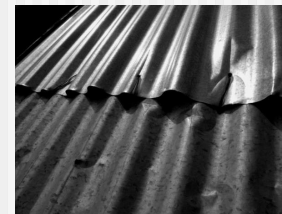
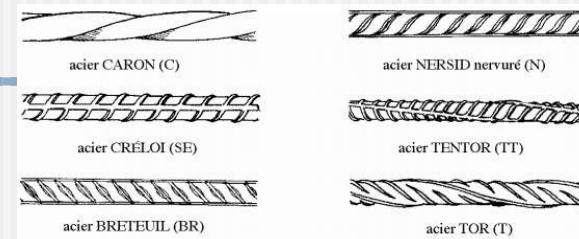
Pour les structures autoportées et portées (poutrelles, charpentes métalliques, câbles, pieux, palplanches...),

Pour les armatures du béton armé.

Pour les habillages et les équipements (tôles et panneaux de couverture et de bardage, tuyaux, radiateurs, robinetterie, serrurerie, ...),

Pour le matériel de chantier et l'outillage.

4.7. Métaux



4.8. Conclusion

L'objectif de ce cours est de savoir des connaissances sur :

- les matériaux utilisés en construction ainsi que les différents constituants employés pour leur fabrication,
- le principe de fabrication, les propriétés principales des matériaux et les applications en fonction de leurs propriétés,
- la durabilité des matériaux de construction ainsi que leur dégradation en tenant compte des conditions environnementales.